

Fusion nucléaire, énergie de demain?



Jacques FRiC- Société Astronomique de France: le 07/3/2026

Prologue

- Quand on entend « nucléaire » on pense aux centrales nucléaires installées. Celles-ci utilisent bien l'énergie de liaison du noyau atomique, en cassant (**fission**) des noyaux lourds, comme celui de l'uranium, en noyaux d'éléments plus légers, pour récupérer de l'énergie.
- La **fusion** nucléaire qui est à l'œuvre de manière naturelle dans les étoiles, comme notre Soleil, fait l'inverse, elle fusionne les noyaux d'éléments légers (par exemple, comme l'hydrogène) en noyaux plus lourds (Hélium).
- Pourquoi investir des sommes astronomiques dans la fusion alors que la fission est opérationnelle et semble donner satisfaction? Éléments de réponse à la fin...
- *Le diaporama, comporte beaucoup de diapositives. Je ne présenterai pas toutes. Les autres sont des précisions.*

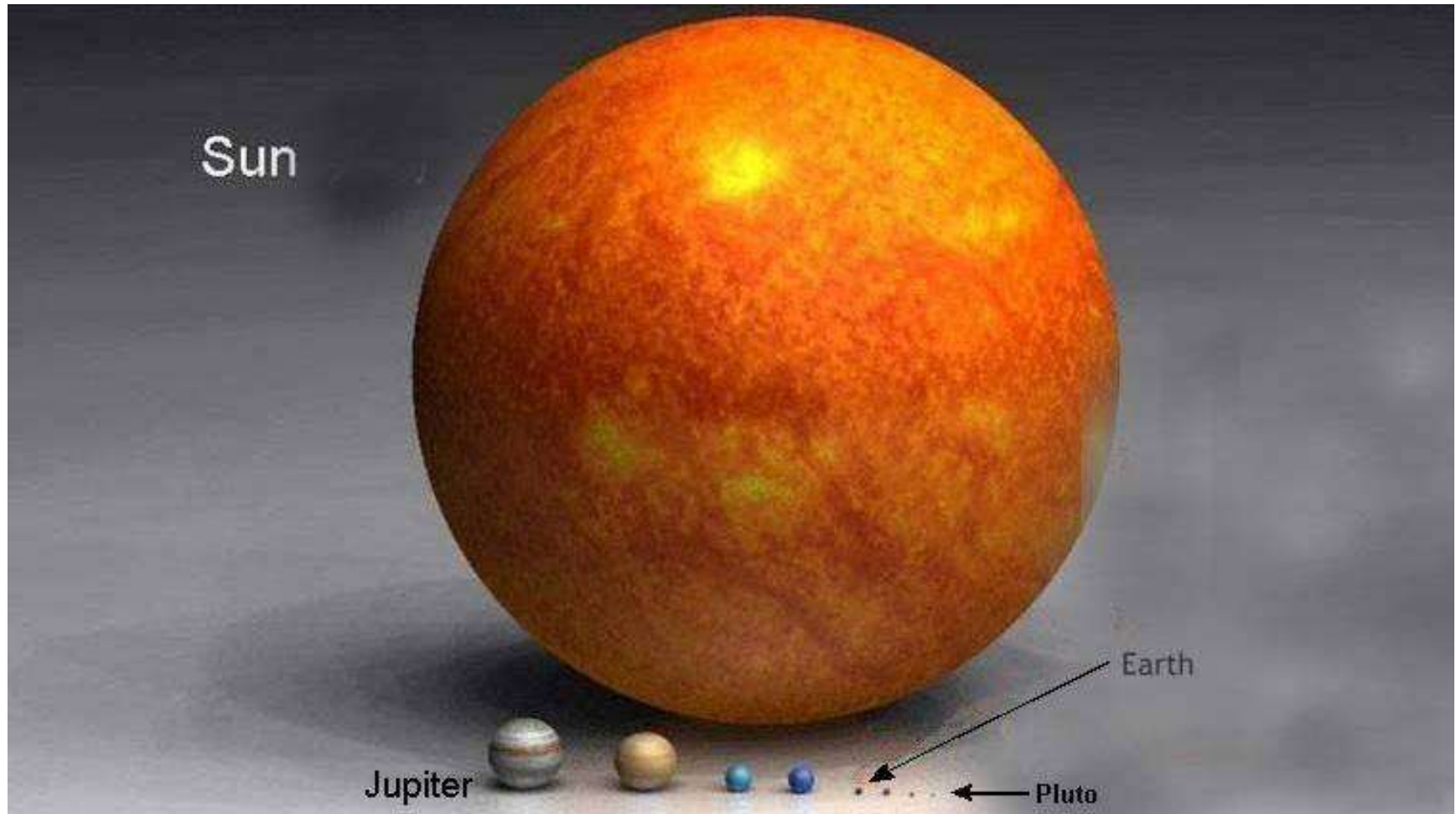
1^{ère} Partie

La fusion nucléaire à l'œuvre dans le Soleil

Pour plus de détail sur cette partie, on peut consulter la conférence sur le Soleil que j'ai donnée, le 21/12/2019 à la commission cosmologie de la SAF:

https://cosmologie.saf-astronomie.fr/E=mc2_energie_du_soleil.pdf

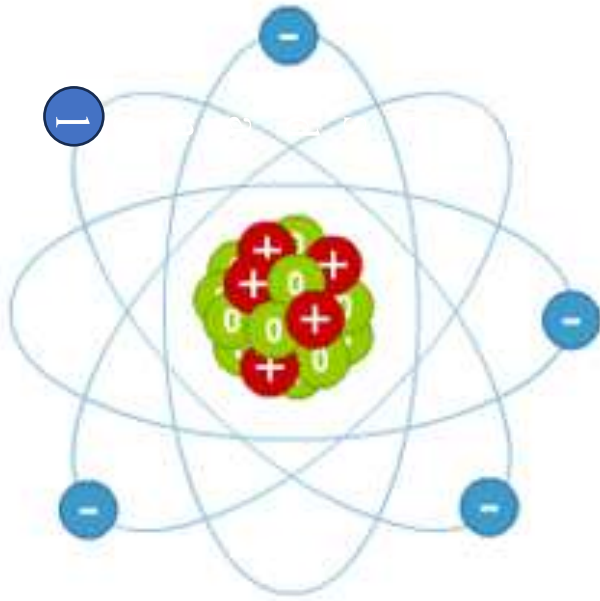
Le Soleil est une étoile, comme celles qu'on voit la nuit, mais qui est beaucoup plus près de nous..



C'est une boule de gaz (en atomes, 92% d'hydrogène, 7.8% hélium) dont le cœur est en fusion. Sa taille est gigantesque, son rayon vaut 100 fois celui de la Terre.

Les atomes

Vision classique (simpliste) de l'atome



Représentation schématique d'un atome avec son noyau et ses électrons, l'échelle n'est pas respectée, la taille de l'atome est 100 000 fois plus grande que celle des nucléons.

.Lorsque les électrons ne sont plus liés au noyau, ce qui se produit quand la température est élevée, on obtient un **plasma**, mélange non structuré de noyaux et d'électrons.

L' atome (neutre vu de loin)

- L'atome est caractérisé par son nombre de protons qui détermine son élément chimique, le nombre de neutrons associés indique son isotope.
- L'atome neutre comporte autant d'électrons (qui ont une charge électrique opposée) que de protons.
- Les réactions chimiques se font au niveau de la couche électronique (10^{-10} m). L'ordre de grandeur de l'énergie de liaison entre le noyau et la couche électronique est l'eV.
- En conséquence, les réactions chimiques produisant des molécules liant des atomes (dont le noyau n'est pas modifié) dégagent des énergies de cet ordre (1eV = . $1,602 \cdot 10^{-19}$ J)
- Les réactions nucléaires qui modifient le nombre de protons et/ou le nombre de neutrons du noyau dont d'énergie de liaison est de l'ordre du MeV, dégagent des énergies de cet ordre.

Le noyau de l'atome

Protons et neutrons, appelés génériquement nucléons, forment un noyau atomique de dimension femtométrique, 10^{-15}m .

Les protons étant chargés positivement, ils se repoussent au sein du noyau, mais l'intensité de cette répulsion électrostatique est, un peu inférieure, à celle de l'attraction (force nucléaire) entre nucléons **induite** par l'interaction forte à des distances inférieures à 2,5 fm.

Les neutrons qui ne sont pas chargés, mais dont les quarks qui le composent sont sensibles à l'interaction forte, vont assurer la cohésion du noyau pour tous les atomes autres que l'hydrogène.

La fusion (thermo)nucléaire

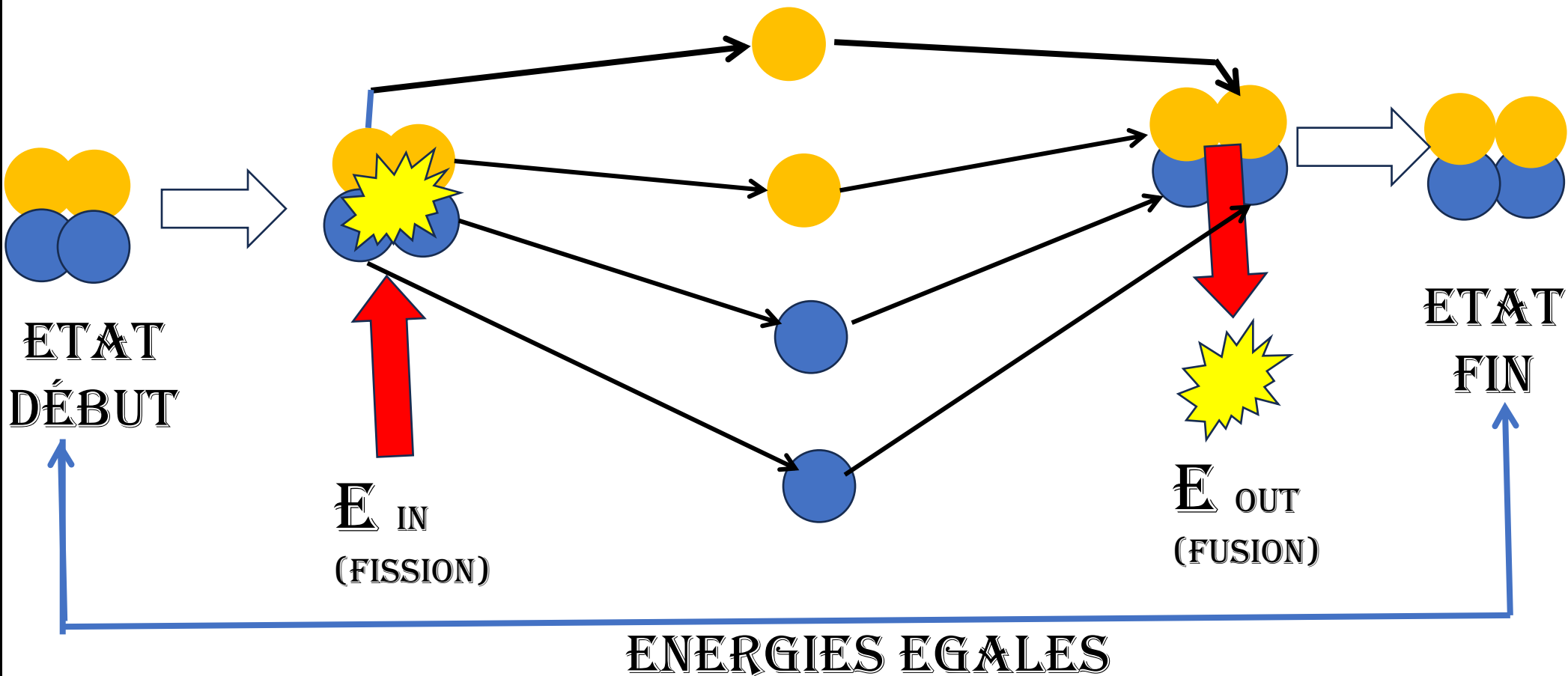
La **fusion nucléaire**, dite parfois **fusion thermonucléaire**, est un processus où deux noyaux atomiques s'assemblent pour former un noyau plus lourd. Cette réaction est à l'œuvre de manière naturelle et longtemps stable, dans le Soleil et la plupart des étoiles de l'univers.

La cohésion du noyau résulte d'une énergie de liaison entre les nucléons. Il faut fournir de l'énergie pour séparer les constituants du noyau. Inversement lorsqu'on va fusionner des nucléons pour constituer un noyau cette énergie de liaison va être libérée.

La fusion (thermo)nucléaire

Pour séparer ces nucléons (fission) et revenir à 4 nucléons libres il faut fournir l'énergie $(\Delta M)c^2$. C'est celle qui avait été libérée dans la fusion des 4 nucléons.

Pour un système fermé, l'énergie du système est conservée.



Source de l'énergie de fusion

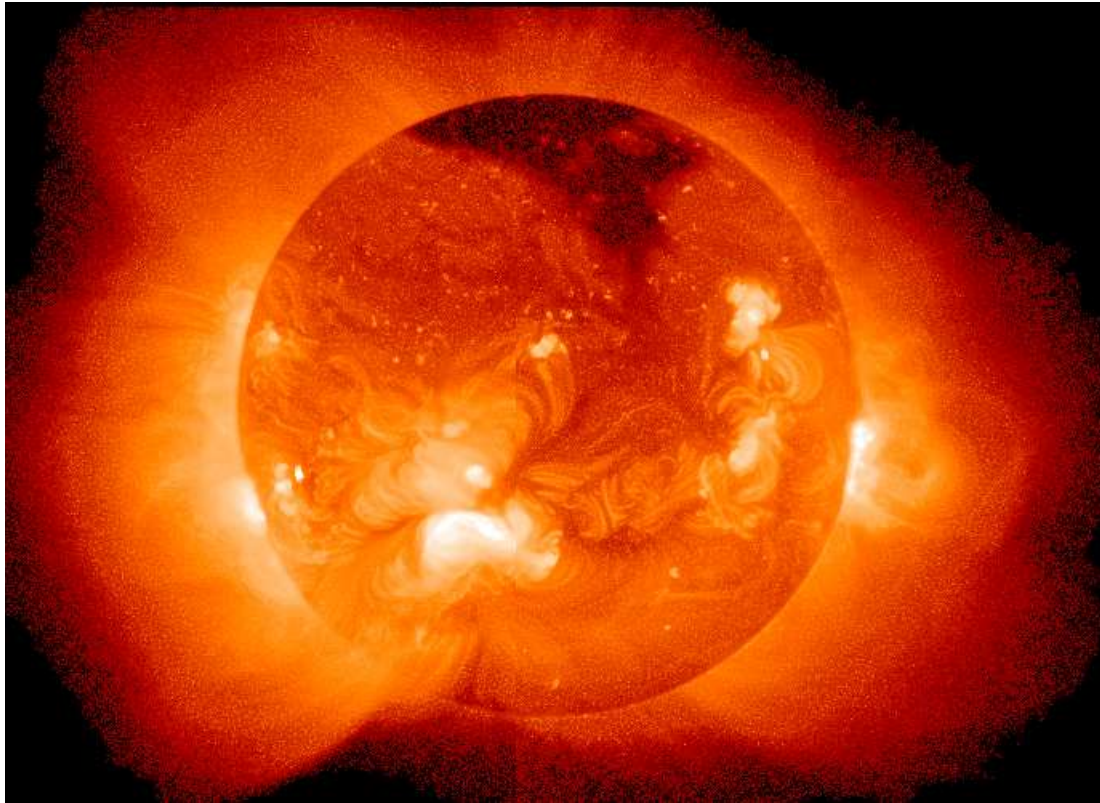
L'énergie de fusion nucléaire n'est pas l'énergie de la matière des nucléons ($E = Mc^2$), mais c'est l'énergie de liaison entre nucléons dans le noyau.

Du fait de l'équivalence masse énergie cela se traduit par un défaut de masse dans le noyau par rapport à la somme des masses de ses constituants, pris isolément.

Exemple:

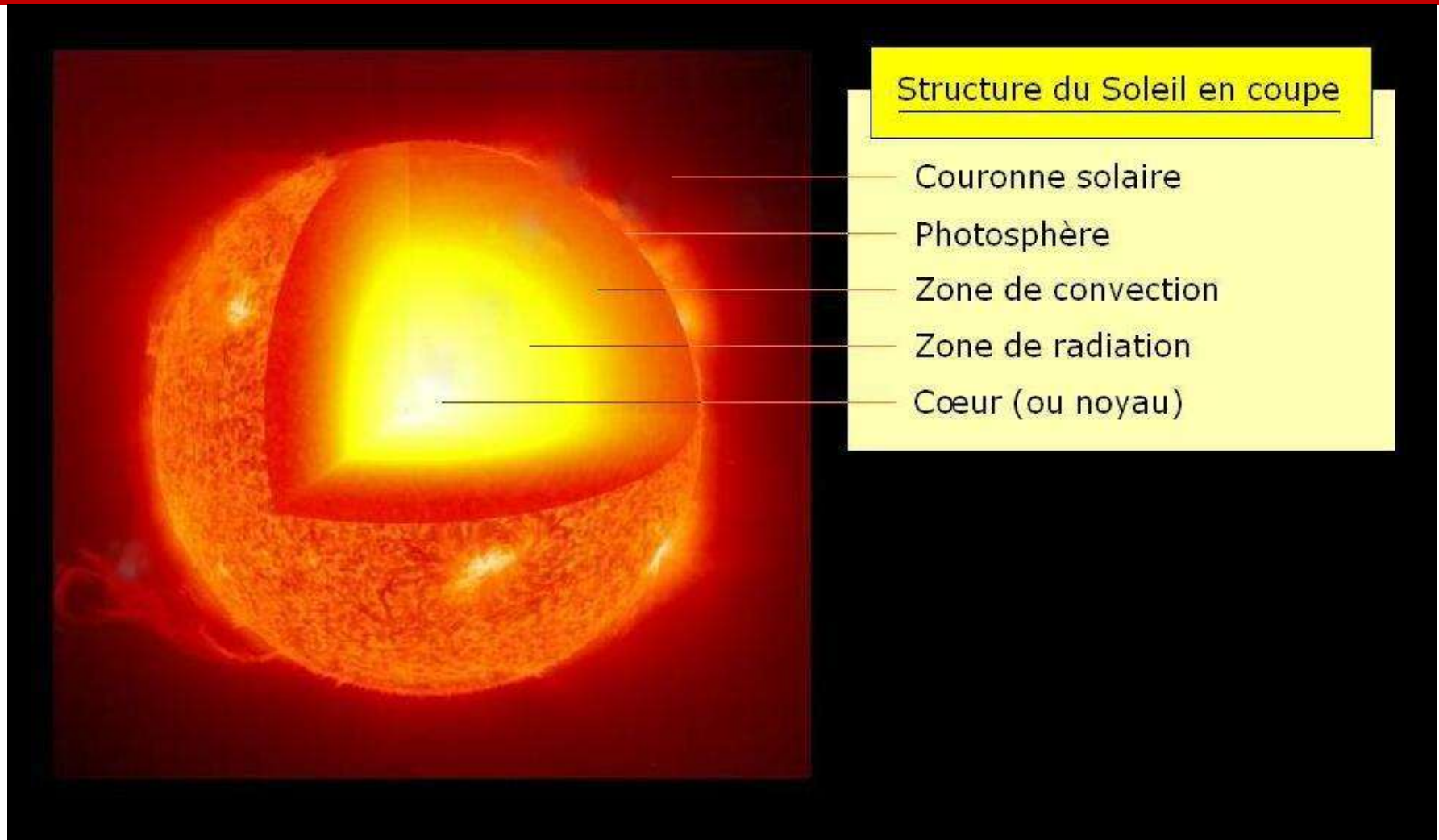
Cas de l'hélium: La masse ($M - \Delta M$) du noyau (2 protons + 2 neutrons) est inférieure à la somme $\sum(2m_p + 2m_n) = M$ des masses m_p et m_n des nucléons libres. ΔM est le défaut de masse. L'énergie libérée lors de la fusion vaut $E = (\Delta M)c^2$. Dans le cas de l'hélium $\Delta M = M (7.10^{-3})$.

La fusion nucléaire source d'énergie du Soleil



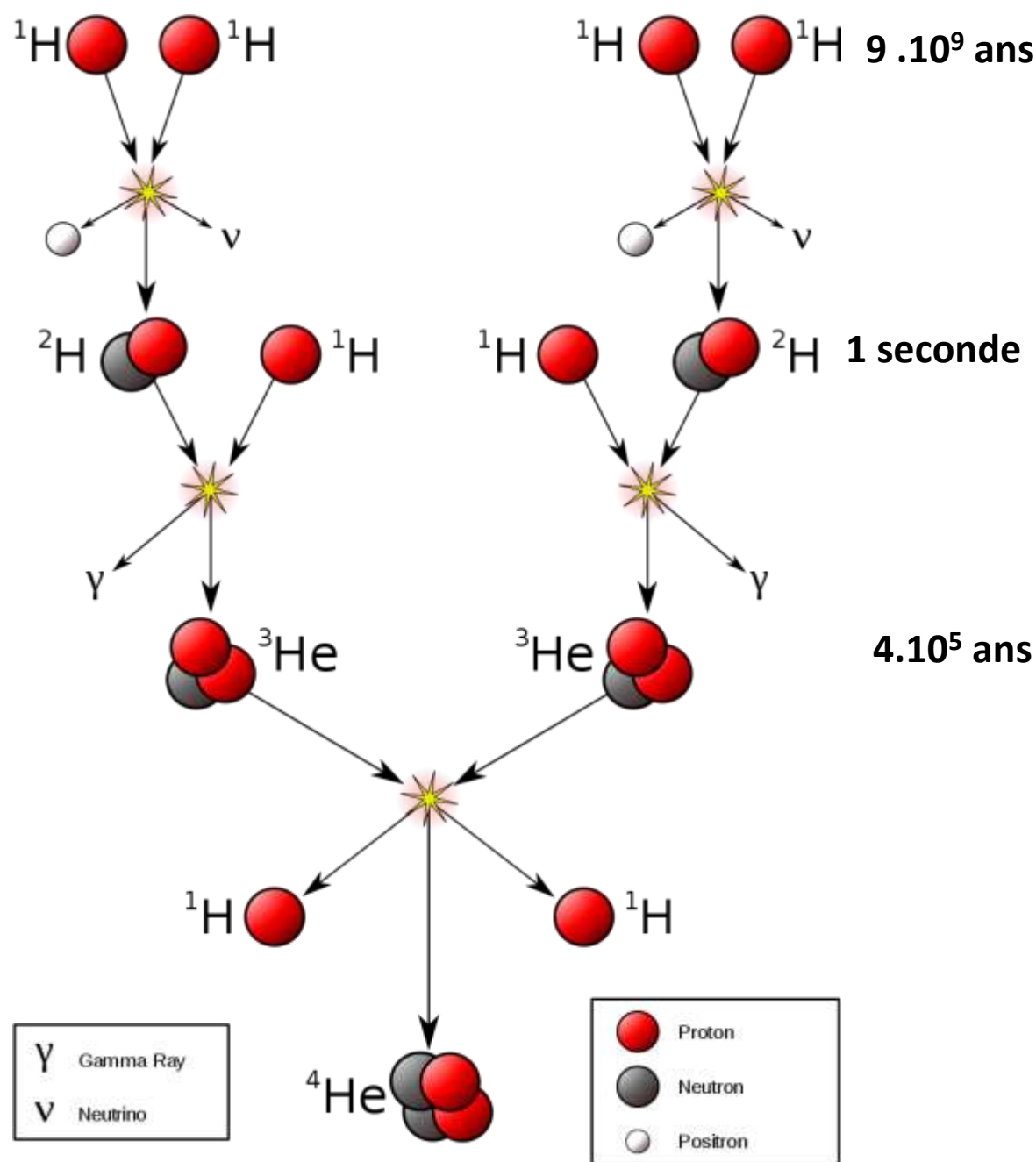
Le Soleil, siège de nombreuses réactions de fusion nucléaire.

La structure interne du Soleil



Les réactions de fusion se produisent au cœur du Soleil où la température atteint 15 millions de degrés et où la densité du plasma atteint 150 T/m^3 , masse plasma énorme et très dense.

Réactions nucléaires du Soleil



La réaction **proton + proton** est la réaction principale dans le Soleil, mais pas la seule. Le temps moyen pour que la réaction se produise est donné. Le positron créé s'annihile avec 1 électron. Notons que ^2H comme ^3He disparaissent à la fin de la chaîne de réactions. Peu de ^2H : brûlé au début de la formation du Soleil.

La diffusion des photons

- Les réactions nucléaires produisent (entre autres) des photons de très haute énergie (plusieurs MeV).
- La majorité des photons rayonnés à la surface sont dans le visible: énergie $\approx 0,5$ eV.
- Les photons des réactions nucléaires ont été pour la majorité diffusés des millions de fois lors de leur parcours (700 000km environ) du centre du Soleil jusqu'à la surface.
- Un plasma est très « opaque » pour les photons. On estime que le temps de transit de l'énergie d'un photon, (en fait de la gerbe qui en résulte), du cœur à la surface se situe entre 10 000 et 170 000 ans.

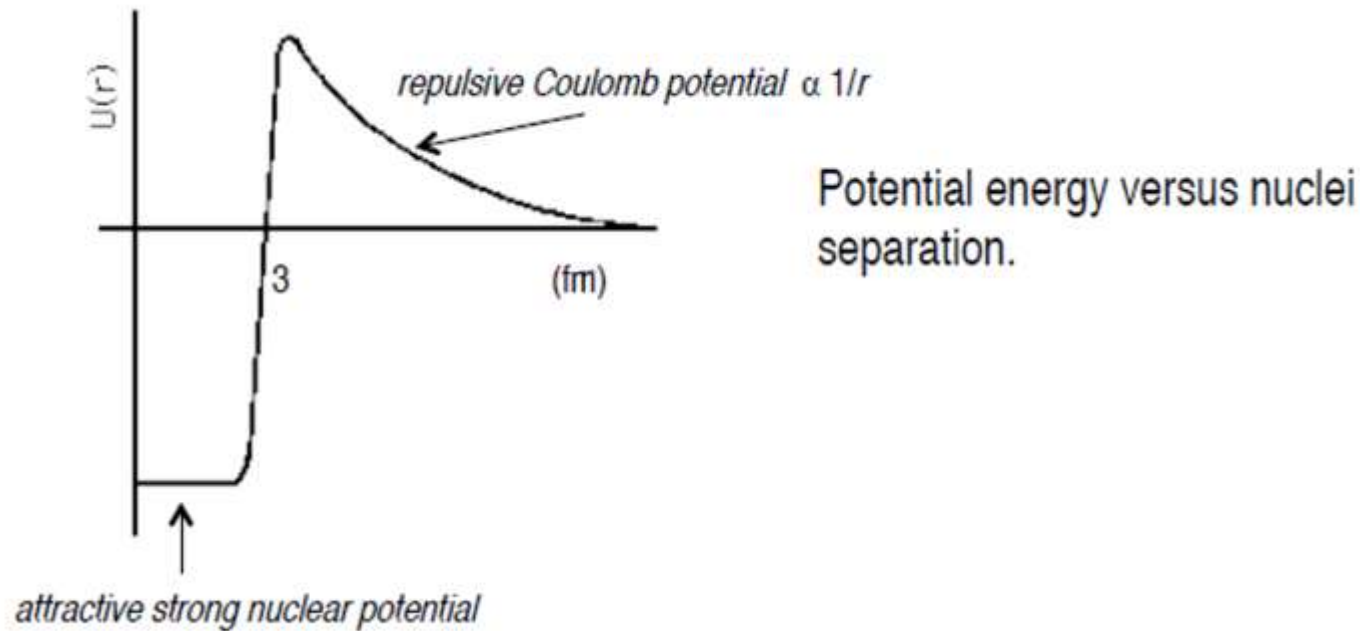
Réactions nucléaires du Soleil

Interaction entre protons

Il faut une température très élevée, c.a.d une très vitesse élevée des protons leur conférant une énergie cinétique très élevée, pour que ces réactions puissent se produire.

En effet, dans la réaction citée, pour que 2 protons puissent se rapprocher suffisamment pour se rencontrer, il faut qu'ils puissent surmonter la répulsion, qui croît en inverse carré de la distance, soit 4 fois plus quand la distance est de moitié, quand ils se rapprochent, étant chargés tous les deux positivement.

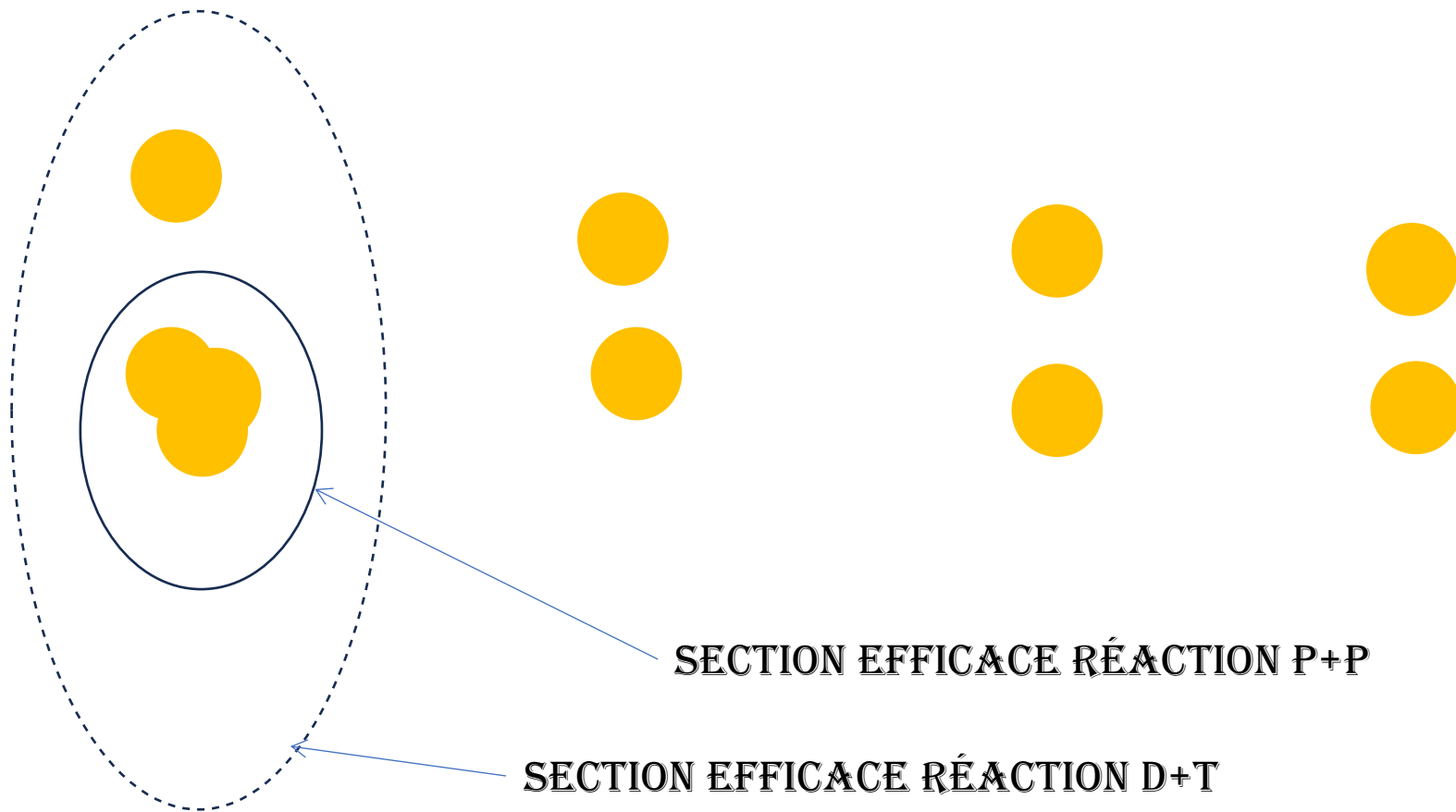
Barrière de potentiel electrostatique



Pour fusionner deux charges positives doivent franchir la barrière de potentiel du champ électrique, à portée infinie, dont la force répulsive croît en $1/r^2$ pour atteindre la frontière du puits de potentiel où la force nucléaire domine (typiquement $3 \cdot 10^{-15}$ m, ce qui est 3 fois la taille du noyau).

La **section efficace**, est la surface circulaire section de la sphère autour de la particule où la capture sera effective pour une réaction de fusion. Cela dépend de la réaction et de l'énergie des particules.

Section efficace (exemple: cas proton-proton)



- On voit comment la probabilité de réaction dépend de la section efficace (zone de capture) qui dépend de la réaction qui dépend également de la vitesse (température) et de la densité: voir critère de Lawson.

Réactions nucléaires du Soleil

Interaction entre protons

Alors, la « force nucléaire » qui est à très courte distance supérieure à répulsion électromagnétique va pouvoir les lier.

A noter que cette supériorité n'est pas très importante, comme en témoigne le fait que l'Hélium 2 (2 protons seulement) n'est pas stable.

Heureusement il y a les neutrons.

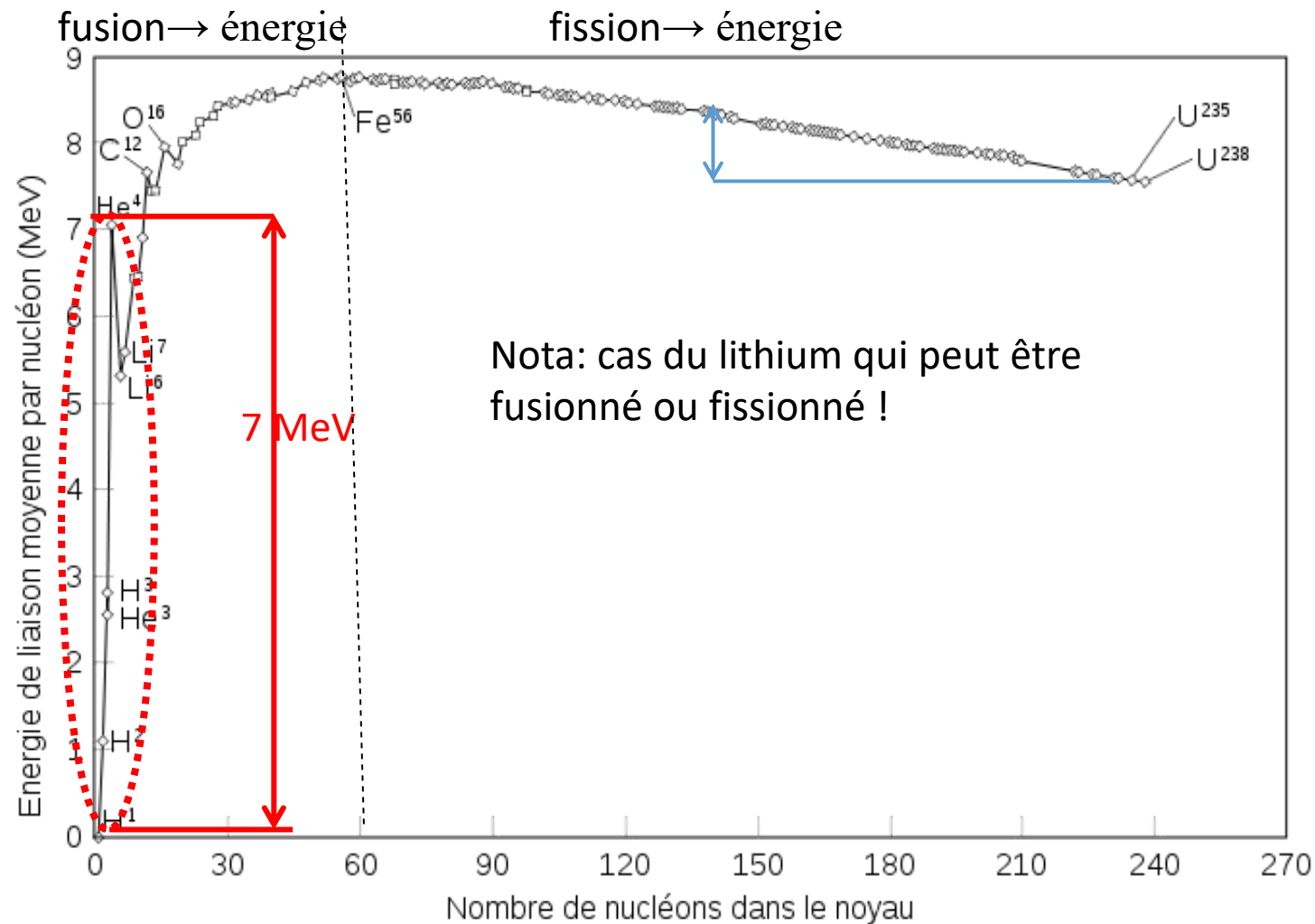
Réactions nucléaires du Soleil

Le rôle essentiel des neutrons

La capture d'un neutron, par le noyau atomique, ne subit pas cette répulsion et au contraire elle est favorisée pour les neutrons de faible énergie. Les neutrons jouent le rôle de ciment entre les nucléons. Sans eux il n'y aurait pas de noyau autre que l'hydrogène et pas de chimie, en particulier organique, donc nous ne serions pas là.

C'est le sauvetage in extremis de 1 neutron sur 7, au bout de 200s de carnage, lors de la nucléosynthèse primordiale, qui a permis que l'aventure se poursuive pour aboutir jusqu'à nous.

L'énergie de liaison du noyau



Dans l'hélium l'énergie de liaison est de 7 MeV par nucléon, soit 28 MeV pour le noyau. Cette énergie va être libérée lors de la fusion. C'est 10 millions de fois celle d'une réaction chimique. Le noyau du deuterium est fragile : son énergie de liaison/nucléon est de 1 MeV.

Periodic Table of the Elements

Periodic Table of the Elements

Atomic Number
Boiling Point
Symbol
Name
Atomic Mass

Normal boiling points are in °C.
SP = Triple Point
Pressure is listed if not 1 atm.
Allotrope is listed if more than one allotrope.

1 IA 1A H Hydrogen 1.008	2 IIA 2A He Helium 4.003																	3 IIIA 3A B Boron 10.811	4 IVA 4A C Carbon 12.011	5 VA 5A N Nitrogen 14.007	6 VIA 6A O Oxygen 15.999	7 VIIA 7A F Fluorine 18.998	8 VIIIA 8A Ne Neon 20.180
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012																	5 Al Aluminum 26.982	6 Si Silicon 28.086	7 P Phosphorus 30.974	8 S Sulfur 32.066	9 Cl Chlorine 35.453	10 Ar Argon 39.948
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305	13 Al Aluminum 26.982	14 Si Silicon 28.086	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948																
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.88	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.972	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.80						
37 Rb Rubidium 85.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium 98.906	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.906	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.905	54 Xe Xenon 131.29						
55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.327	57-71 Lanthanide Series	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.85	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.383	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)						
87 Fr Francium 223.020	88 Ra Radium 226.025	89-103 Actinide Series	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (269)	109 Mt Meitnerium (268)	110 Ds Darmstadtium (269)	111 Rg Roentgenium (272)	112 Cn Copernicium (285)	113 Nh Nihonium (284)	114 Fl Flerovium (289)	115 Mc Moscovium (288)	116 Lv Livermorium (293)	117 Ts Tennessine (294)	118 Og Oganesson (294)						

Normal boiling points are in °C.
SP = Triple Point
Pressure is listed if not 1 atm.
Allotrope is listed if more than one allotrope.

Atomic Number
Boiling Point
Symbol
Name
Atomic Mass

Lanthanide Series

Actinide Series

57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.115	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium 144.913	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.965	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.967
89 Ac Actinium 227.028	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium 237.048	94 Pu Plutonium 244.064	95 Am Americium 243.061	96 Cm Curium 247.070	97 Bk Berkelium 247.070	98 Cf Californium 251.080	99 Es Einsteinium (254)	100 Fm Fermium 257.095	101 Md Mendelevium 258.1	102 No Nobelium 259.101	103 Lr Lawrencium (262)

Alkali Metal Alkaline Earth Transition Metal Basic Metal Semimetal Nonmetal Halogen Noble Gas Lanthanide Actinide

Equilibre hydrostatique

Le Soleil comme toute étoile est un objet très simple: une simple boule de gaz (principalement de l'hydrogène) en équilibre hydrostatique.

En chaque point, la force de pression du gaz chauffé qui tend à le dilater, dans l'étoile, compense exactement la force de gravité qui, au contraire tend à le contracter. Cet état d'équilibre explique la forme sphérique du Soleil.

C'est au centre du Soleil que la température est maximale : 15,5 millions de degrés Celsius.

Equilibre hydrostatique

La pression atteint 340 milliards de fois la pression atmosphérique terrestre.

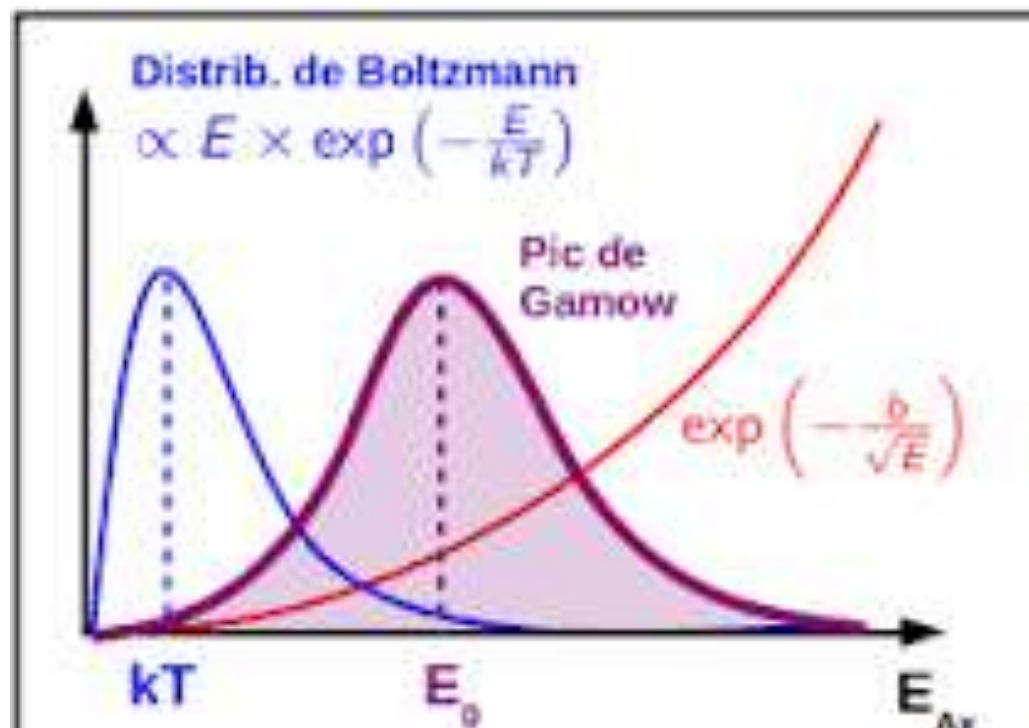
La densité est de 158 tonnes par mètre cube.

La température diminue progressivement à mesure que l'on se rapproche de la surface.

Dans la photosphère, épaisse de 500 km, d'où provient toute la lumière visible, la température est de 5800 °K

Une combustion « poussive ? »

A la température (15.10^6 °K) au cœur, les réactions nucléaires très rares. La section efficace de cette réaction étant minuscule, 10^{-23} inférieure à celle de (D + T), c'est la conjonction de la probabilité de fusion selon la distribution de Boltzmann et de la probabilité de fusion par effet tunnel qui produit un pic de probabilité appelé pic de Gamow.



Une combustion poussive

Cette production d'énergie « poussive » fait qu'il peut la dispenser très longtemps (des milliards d'années), ce qui permet, au terme d'une longue évolution, la vie évoluée que nous connaissons. Nous ne serions sans doute pas là si cela n'avait pas été le cas.

La température de l'étoile dépend de sa masse.

Elle est de 15 millions de °K pour le Soleil, Elle est plus élevée pour des étoiles plus massives et moins élevée pour des étoiles moins massives.

Ceci résulte du processus de formation des étoiles.

Bilan énergétique du Soleil

Il est le fournisseur quasi-exclusif d'énergie pour la surface de la Terre. Cette énorme boule gazeuse est constituée principalement d'hydrogène.

La transformation de l'hydrogène en hélium par fusion nucléaire s'accompagne d'une libération colossale d'énergie par seconde :

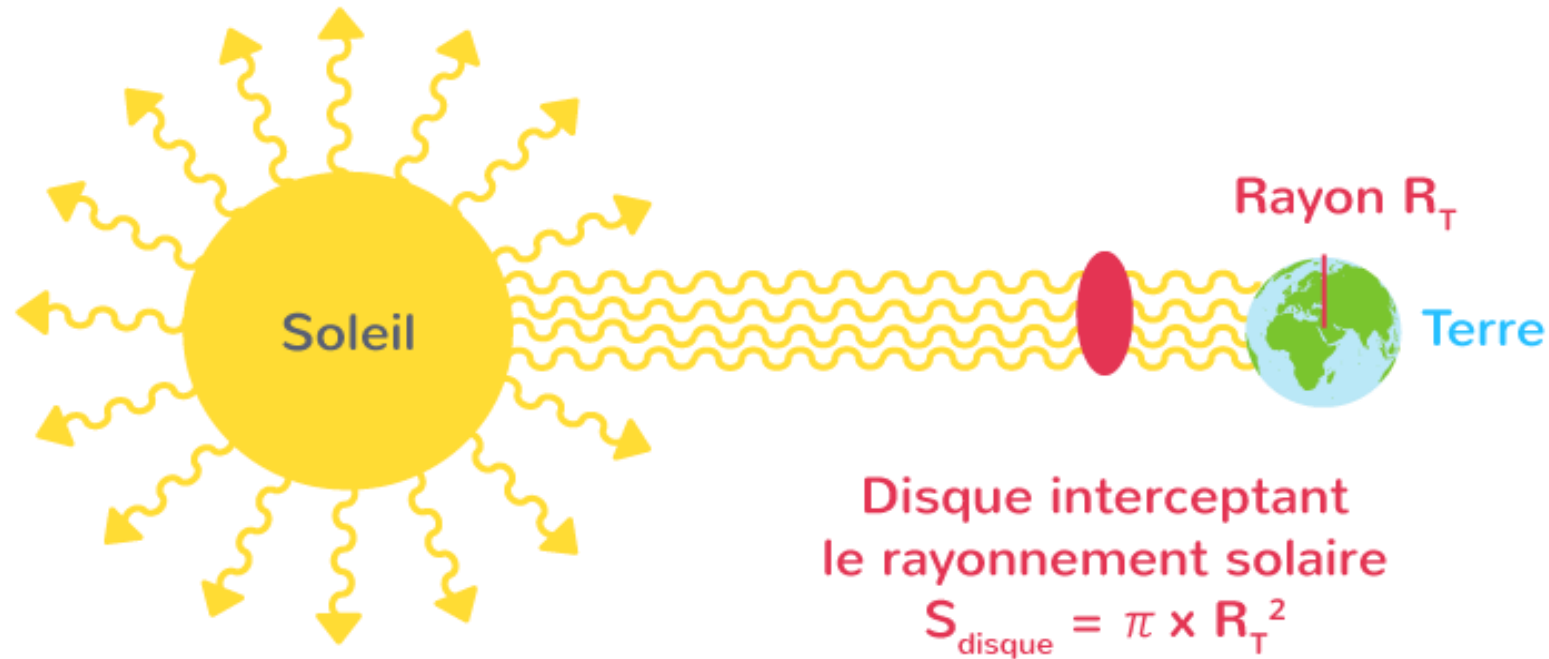
$3,85 \cdot 10^{26}$ watts,

385 000 000 000 000 000 000 000 000 watts

Soit environ **385 000 000 000 000 000 (3.85 10^{17})**
centrales nucléaires modernes de 1 GW).

Bilan énergétique du Soleil

La Terre, du fait de l'éloignement de son étoile (150 millions de kilomètres en moyenne) ne reçoit que **1 milliardième** de cette énergie soit 3.85×10^{17} watts.



Pourtant, cette énergie est suffisante pour entretenir la dynamique de la vie et du climat.

Bilan énergétique du Soleil

La formule $E = m.c^2$ nous montre que le Soleil transforme en énergie (il s'allège) à chaque seconde 4,6 millions de tonnes.

Il brûle presque 1 milliard de tonnes d'hydrogène par seconde, car le rendement, est inférieur à 0,7% de l'énergie de masse $E = Mc^2$ de l'hydrogène, puisque c'est l'énergie de liaison qui est libérée pour le bilan de la fusion, en plusieurs étapes, de quatre nucléons en Hélium.

Bilan énergétique du Soleil

Depuis sa naissance (il y a 4 milliards d'années environ) il a transformé en hélium $1,5 \cdot 10^{26}$ kg d'hydrogène sur ces $2 \cdot 10^{30}$ kg (soit environ 0,01%), ce qui représente, tout de même, environ la masse de 25 Terres.

La Terre pèse $6 \cdot 10^{24}$ kg!

Mais comme la masse du Soleil est de 330 000 fois celle de la Terre, c'est très peu pour lui...

Energie renouvelable ?

Le Soleil s'est formé il y a environ 4 milliards d'années et on pense qu'il devrait encore briller de manière assez stable pendant plusieurs milliards d'années avant d'entamer un processus où il va évoluer. Après une phase de géante et supergéante rouge, il sans doute finir en naine blanche, cadavre d'étoile où les réactions nucléaires ont cessé.

Cette durée de vie « limitée » est très grande à l'échelle humaine (l'histoire humaine se compte en milliers ou dizaines de milliers d'années), **c'est pourquoi on parle d'énergie renouvelable même si ce n'est pas tout à fait vrai.**

Electricité solaire sur Terre

- On peut directement convertir directement l'énergie solaire en électricité par des cellules photovoltaïques.
- Ces équipements ont un rendement assez faible (environ 20% à 25% aujourd'hui, mais comme ils sont simples à installer, ils ont proliféré, et, de plus, on peut espérer des améliorations du rendement, dans le futur.
- On peut aussi utiliser des miroirs qui concentrent les rayons pour chauffer un fluide (par exemple) à une température élevée et réaliser une machine thermique. Le rendement peut être plus élevé, mais la mise en œuvre, plus délicate, limite la prolifération.

Electricité solaire sur Terre

Centrale photovoltaïque



Electricité solaire sur Terre

Centrale thermique à miroirs



Electricité solaire sur Terre

- Notons que l'énergie hydraulique et l'énergie éolienne sont aussi des énergies solaires.
- car dans le 1^{er} cas:
- c'est le Soleil qui vaporise l'eau des océans en nuages lesquels vont générer des pluies sur les montagnes générant des cours d'eau.
- et dans le 2^{ième} cas:
- c'est le Soleil qui, en chauffant différemment différentes régions sur Terre, va provoquer les vents entre ces régions.

Electricité solaire sur Terre

Centrale hydroélectrique (barrages)



Electricité solaire sur Terre: éoliennes



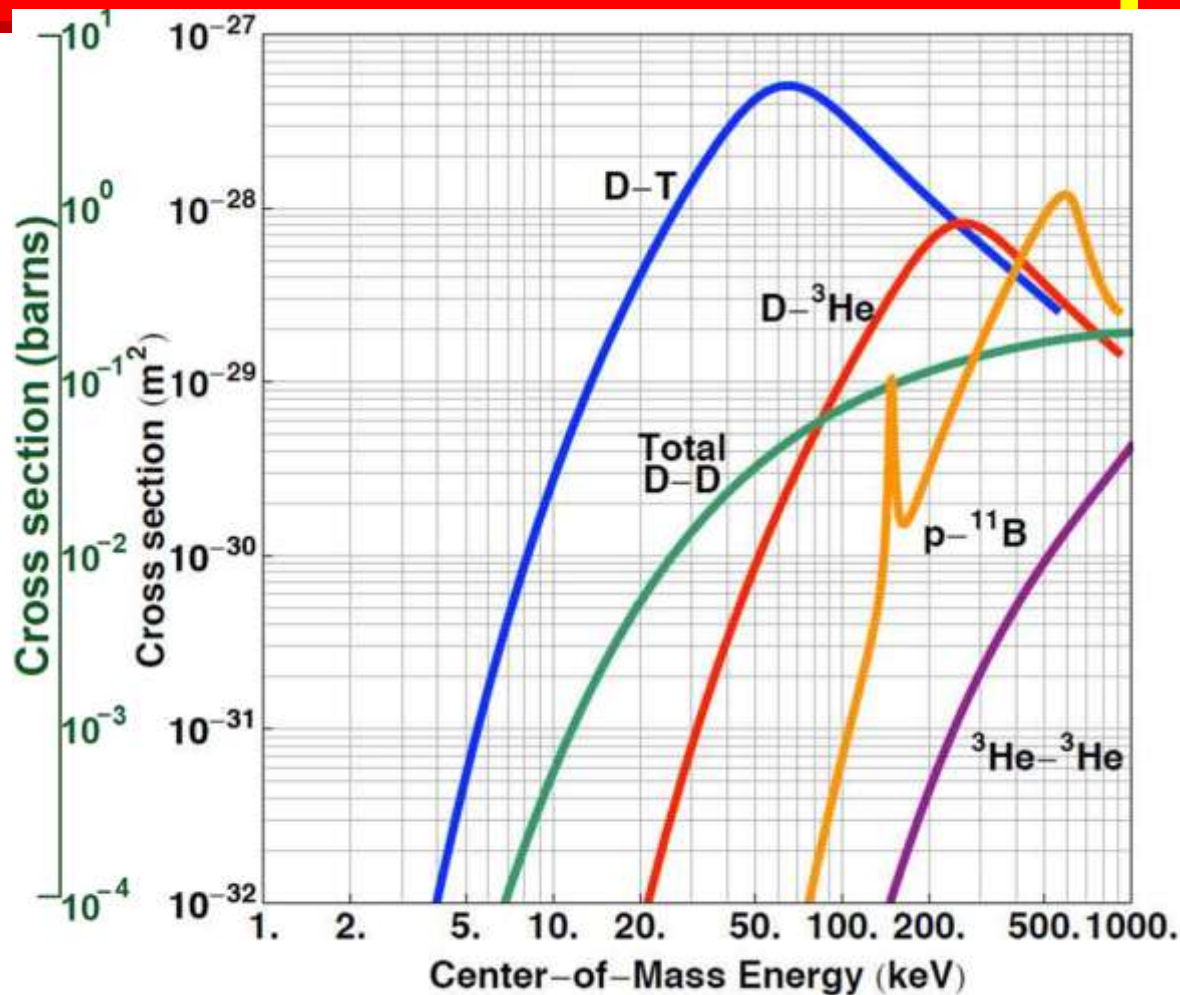
2^{ième} Partie

Maitriser la fusion pour
produire de l'électricité

Réaliser la fusion nucléaire sur Terre

- La réaction $^1_1\text{H} + ^1_1\text{H}$ à l'œuvre dans le Soleil est très performante mais nécessite une masse gigantesque et une densité du plasma de 150 T/m^3 pour être entretenue à une température de seulement 15 millions de degrés Kelvin.
- Sur Terre, vu la quantité de plasma à fusionner (par exemple, qq grammes au total dans l'anneau d'ITER vs $2 \cdot 10^{29} \text{ kg}$ de plasma du Soleil si on ne considère que le noyau) dont la densité est environ $4 \cdot 10^{10}$ fois inférieure, la fusion, pour être entretenue nécessiterait des températures de l'ordre du milliard de degrés Kelvin.
- On va alors chercher à s'orienter vers d'autres réactions, certes moins performantes, mais moins exigeantes en température.

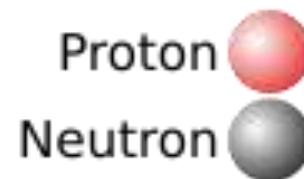
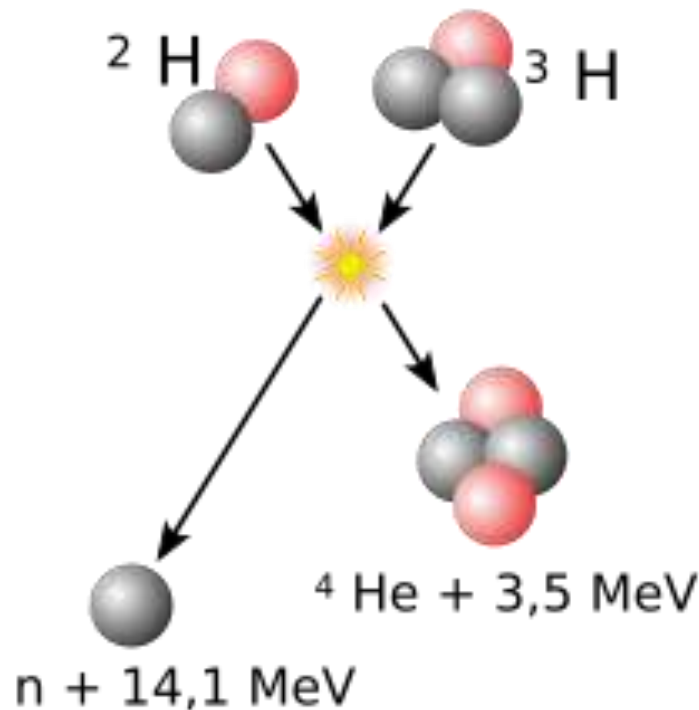
Quelle réaction a utiliser pour ITER?



La réaction tritium + deuterium dont la section efficace est 10^{25} fois supérieure à (H + H) aux énergies envisagées est un bien meilleur candidat pour la fusion contrôlée.

La courbe de la réaction (H+H) n'est pas représentée car serait très en dessous du graphe (entre 10^{-50} et 10^{-40} dans cette plage de température).

Réaction utilisée dans les tokamaks



Dans cette réaction, deutérium + tritium, qui sont des isotopes de l'hydrogène, on a indiqué le détail de l'énergie cinétique libérée qui est de 17.6 MeV pour 5 nucléons soit 3.52 MeV par nucléon, au lieu de 7 MeV/nucléon dans la réaction $^1\text{H} + ^1\text{H}$ décrite précédemment.

Autres réactions dans les tokamaks

Dans un mélange de Tritium (T) et de Deutérium (D), même si la réaction souhaitée ($D + T$) est la plus efficace, dans ce mélange des réactions $D+D$ et $T+T$ vont fatalement se produire:

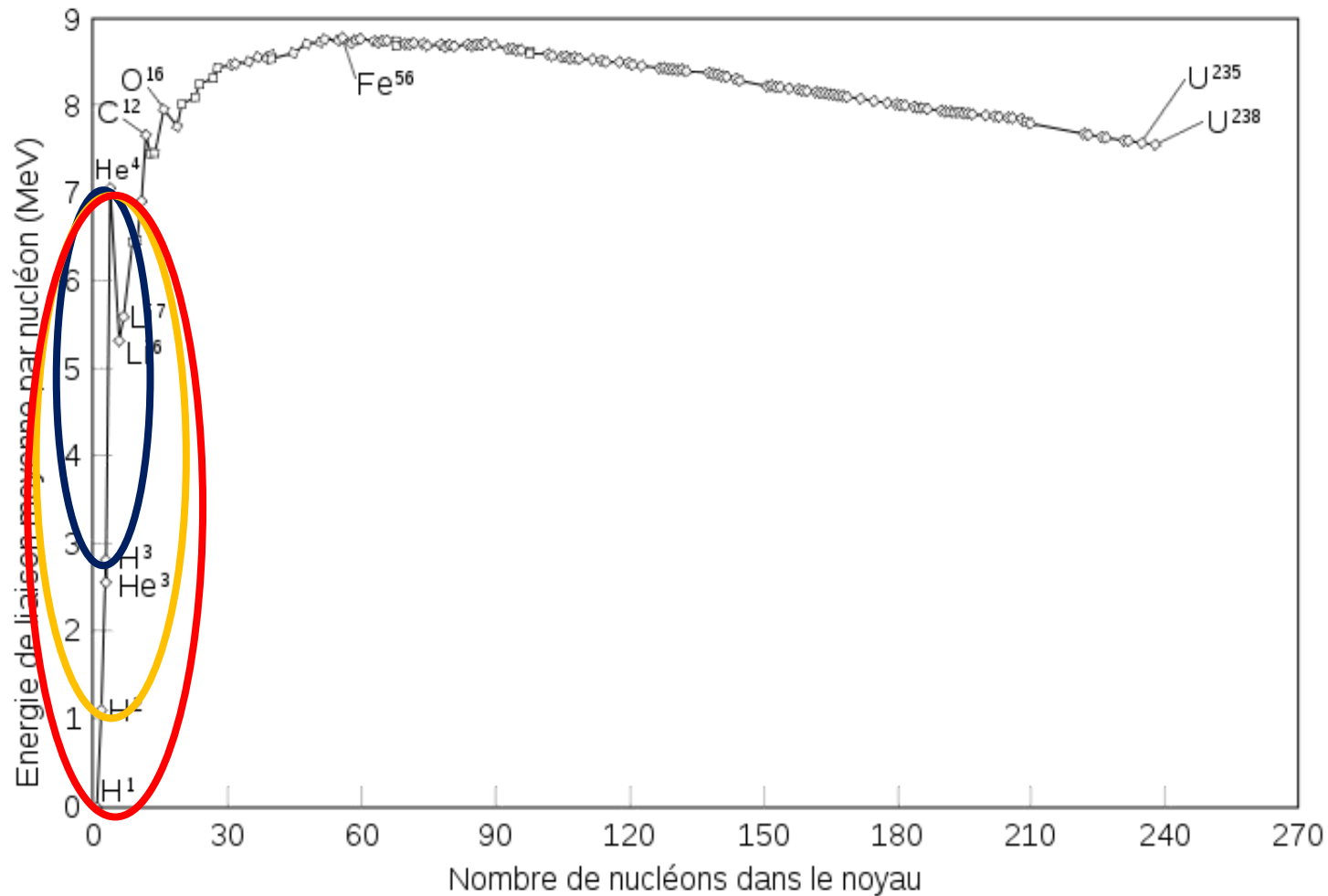


Et ainsi de suite avec les nouveaux éléments créés, par exemple:



Ces réactions secondaires sont plus rares; d'une part elles ont une section efficace bien moindre aux températures concernées et d'autre part pour certaines (4) elles concernent des éléments issus de la fusion, donc en quantité plus limitées. Notons que la réaction 1 (hélas de probabilité faible) qui produit du tritium est bien utile.

L'énergie de liaison du noyau



L'énergie libérée lors de la fusion H^2 (deutérium) + H^3 (tritium) $\rightarrow$ He (Hélium) va être inférieure à celle de la réaction $H^1 + H^1$.

Conditions pour la fusion contrôlée

- Il faut parvenir à chauffer le plasma à plus de 100 millions de degrés environ, pour amorcer la fusion, température que le réacteur nucléaire doit supporter.
- Il faut que l'énergie dégagée par cette fusion soit supérieure à l'énergie injectée. Une partie de l'énergie dégagée entretient la fusion et le surplus c'est la production utile d'énergie.
- Notons que dans les expériences actuelles, on a des approches de fonctionnement « continu » (comme un moteur électrique) ou pulsé (comme un moteur à explosion).

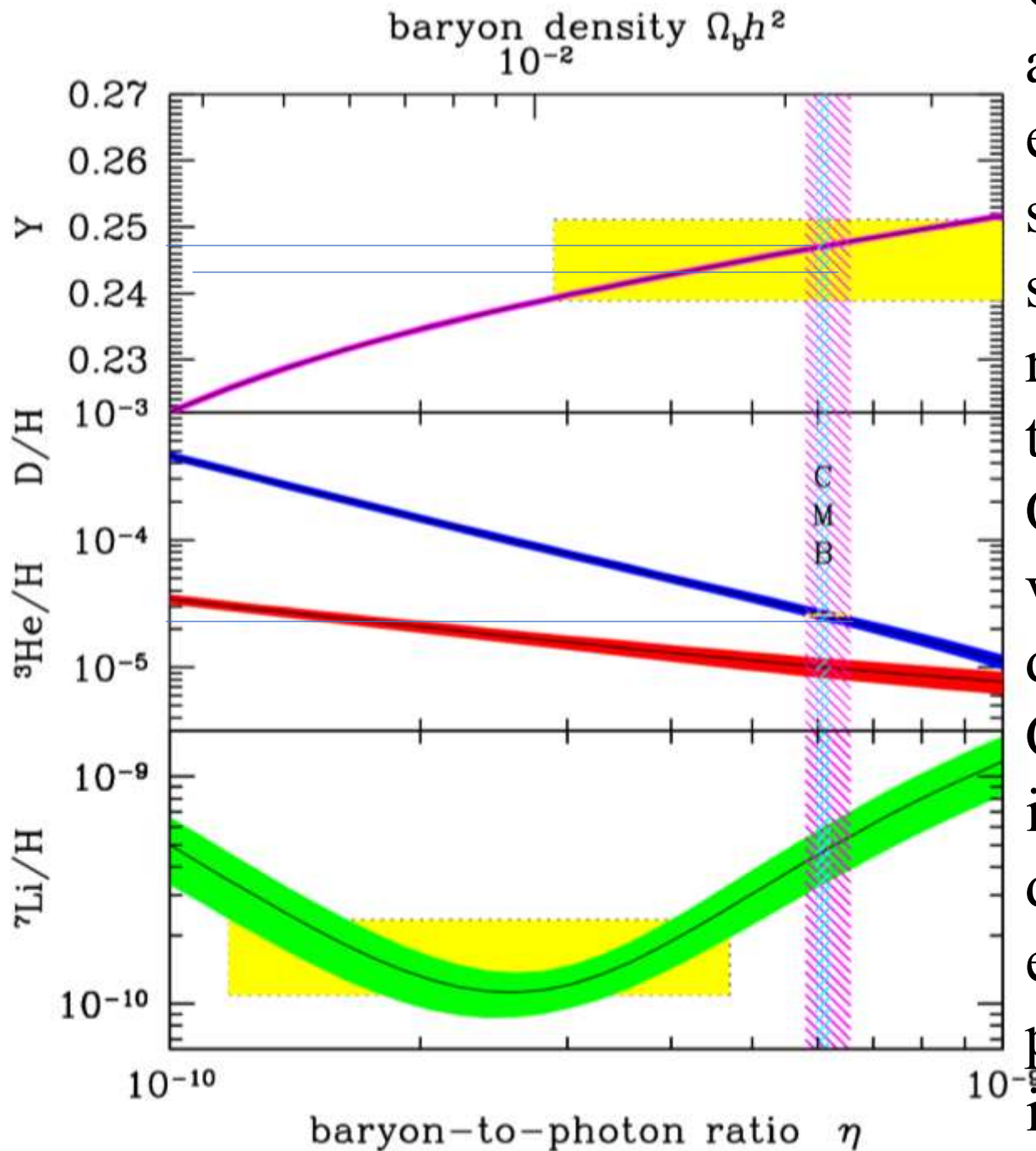
La fusion nucléaire sur Terre

- De très grandes quantités d'énergie sont libérées par le processus de fusion nucléaire.
- Pouvoir reproduire ce phénomène sur Terre **permettrait en théorie de satisfaire pour longtemps les besoins énergétiques de l'humanité.**
- C'est précisément l'enjeu majeur de la recherche sur la fusion nucléaire « contrôlée ».
- Les combustibles nécessaires à la fusion sont deux isotopes de l'hydrogène :

Les combustibles utilisés: 1-Deutérium

- Le **deutérium**, disponible en quantités pratiquement illimitées dans l'eau des mers : avec 33 g de deutérium par mètre cube d'eau de mer (molécule HDO), les ressources excéderaient 10 milliards d'années de consommation annuelle mondiale d'énergie (référence : année 2000).
- Un gramme de deutérium, combiné à du tritium, pourrait fournir autant d'électricité que 3 tonnes de pétrole.
- Le deutérium est stable, l'écrasante majorité du deutérium présent dans l'univers a été synthétisée lors de la nucléosynthèse primordiale. C'est un marqueur du passé lointain.

Les combustibles utilisés: Deutérium



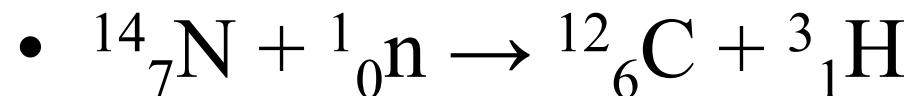
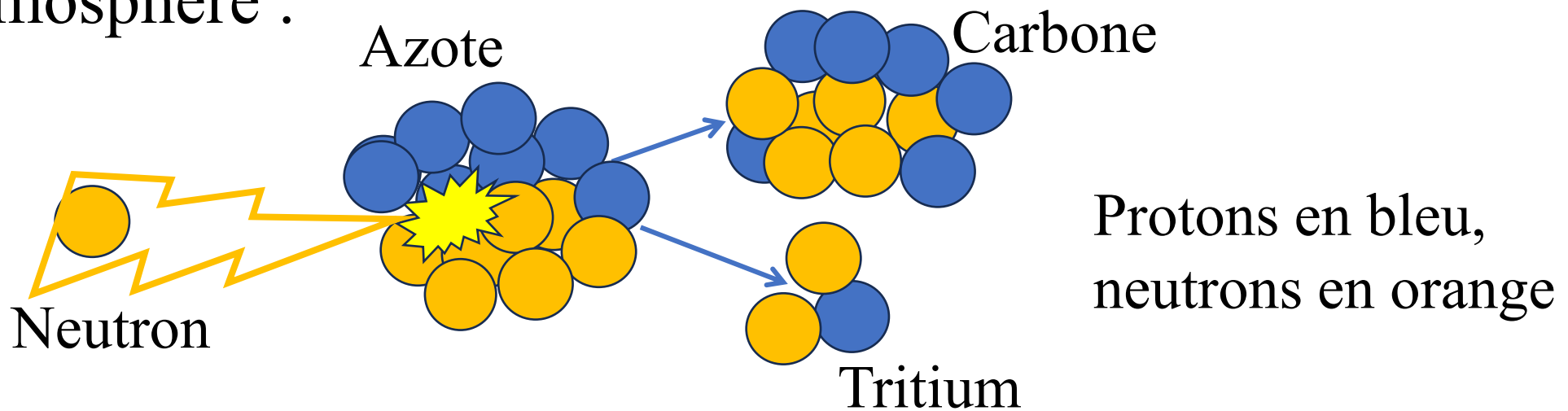
Ce graphique donne les abondances, en masse, des éléments de l'univers synthétisés lors de la synthèse primordiale. Le ratio D/H est un indicateur très important.

On voit que le ratio D/H vaut $2,2 \cdot 10^{-5}$ contre $3,3 \cdot 10^{-5}$ dans les océans sur Terre. Cette différence nous informe sur la formation de la Terre et de son évolution et varie selon les planètes, ce qui nous informe sur elles.

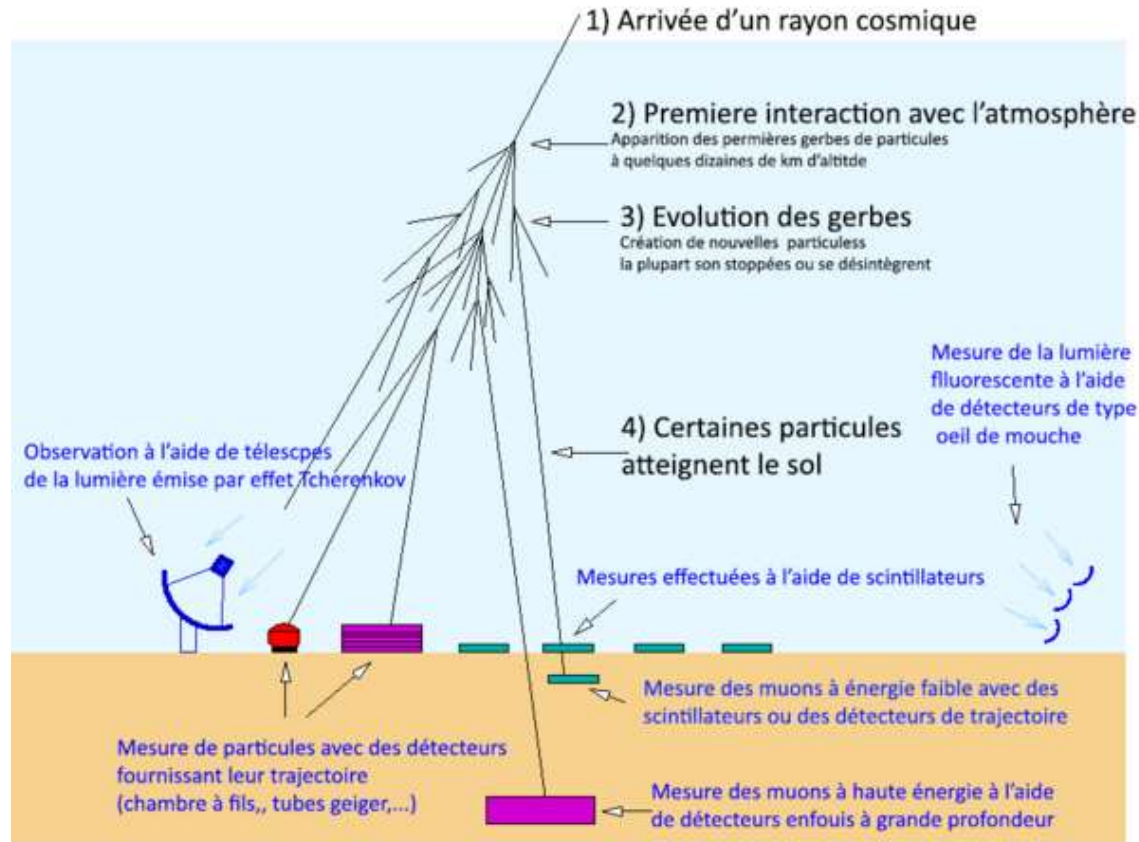
Le cas critique du tritium

Les combustibles utilisés:-2 le Tritium

- **Tritium d'origine naturelle**, au total 3.5 kg sur Terre, résultant d'un équilibre entre sa désintégration (période 12 ans) et son renouvellement (200g/an) par l'interaction entre les rayons cosmiques et l'azote de la haute atmosphère :



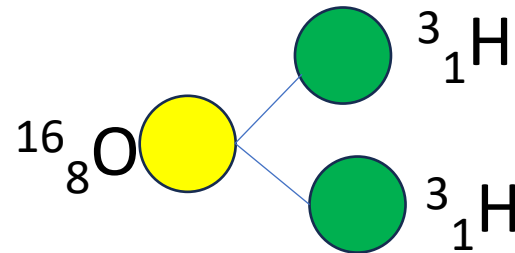
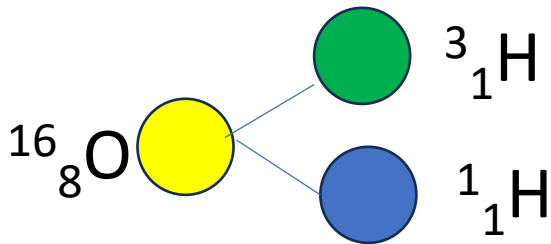
Effets des rayons cosmiques



- Les rayons cosmiques de très haute énergie engendrent d'immenses gerbes pouvant contenir 10 milliards de particules secondaires, voire plus. Celles-ci se répandent sur des zones pouvant atteindre 20 kilomètres carrés à la surface de la Terre, et elles peuvent alors être observées par des détecteurs.

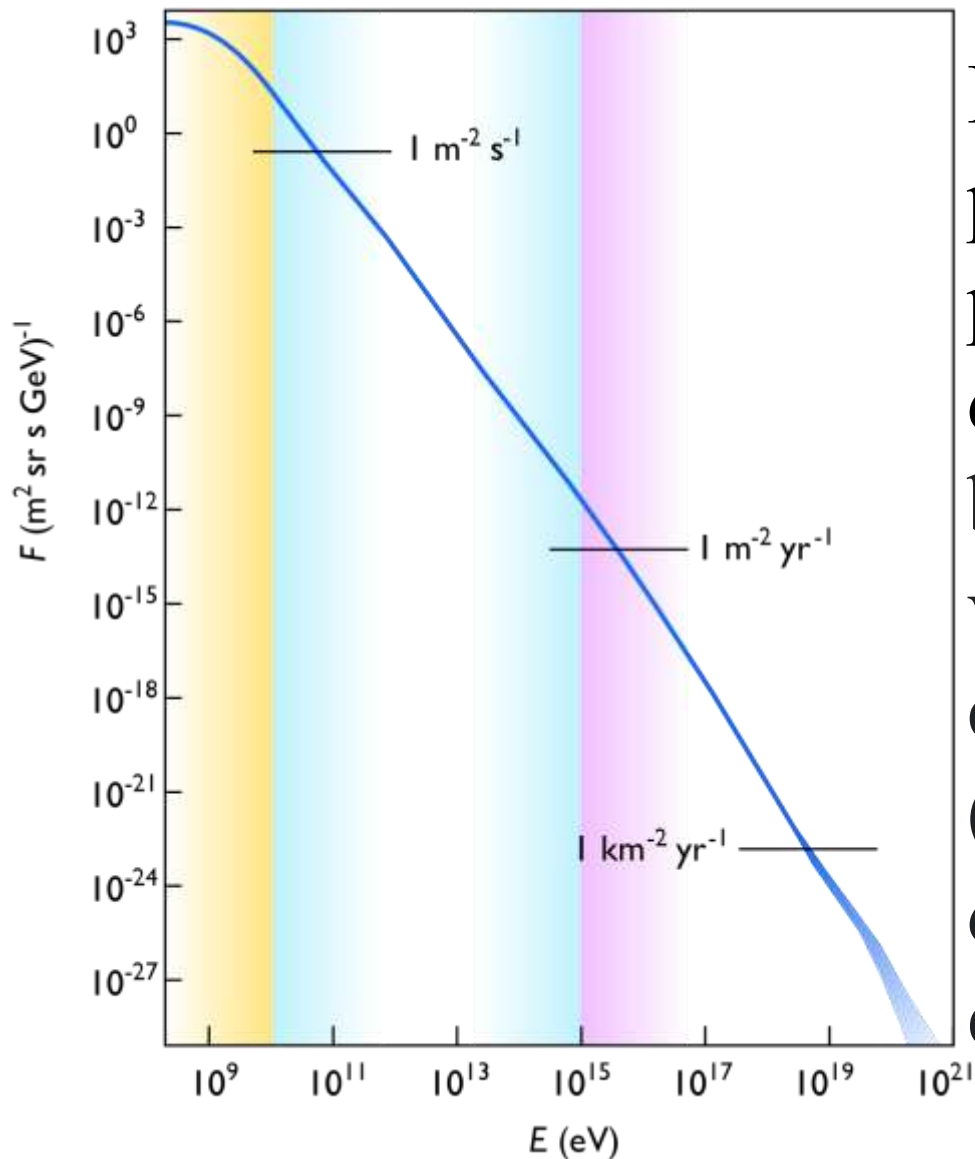
Les combustibles utilisés:-2 le Tritium

- Créé dans la haute atmosphère le tritium sera projeté, à grande vitesse vers la surface de la Terre et comme la surface des océans est majoritaire il se retrouve souvent dans l'eau.
- Etant de l'hydrogène, il se combine facilement avec l'oxygène et se retrouve surtout dans la molécule d'eau.



- Plus léger que l'air, il n'atteindrait jamais le sol s'il n'était pas projeté vers le sol. Ainsi dispersé et aussi rare, on conçoit qu'il soit inexploitable.

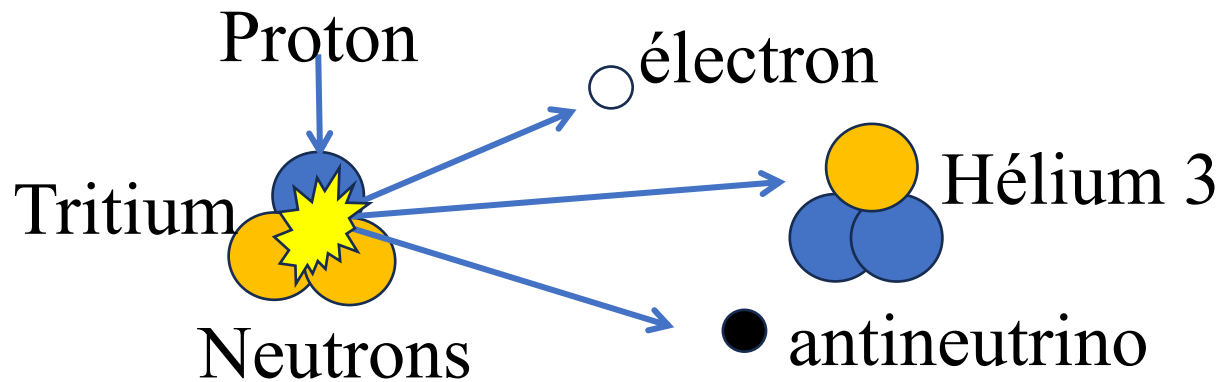
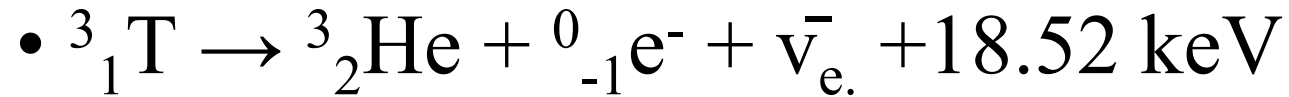
Energie et flux des rayons cosmiques



Les rayons cosmiques sont principalement constitués de protons, de neutrons, de noyaux d'hélium. Les particules de basse énergie (zone jaune) viennent surtout du Soleil, celles d'énergie intermédiaire (bleu) de notre galaxie, et celles de haute énergie (violet) sont extragalactiques.

Désintégration du Tritium

Le tritium se désintègre, avec une période de 12 ans, par la réaction suivante (neutron $\rightarrow$ proton):



- Cette réaction a produit l'essentiel de ^3_2He (stable), cumul estimé exploitable à 15T dans la croûte et le gaz sur Terre, (13T dans les océans) mais à l'instar du tritium il est saupoudré et étant inerte et plus léger et que l'air il est volatile (4000 T dans l'atmosphère).

Les combustibles utilisés:-2 le Tritium

- Ce tritium naturel étant inexploitable, on en produit dans les centrales nucléaires, en **irradiant par des neutrons, du lithium**, relativement abondant dans l'écorce terrestre.
- **Propriétés chimiques du tritium**
- En s'oxydant en présence même en milieu sec, il produit de l'eau tritiée (HTO ou T_2O).
- Les quantités totales de tritium produites, disponibles sur Terre, sont estimées **à 30Kg**, surtout au Canada où :

Le tritium est extrait de l'eau lourde au Tritium Removal Facility (TRF) de l'Ontario Power Generation, en 2 étapes : extraction catalytique en phase vapeur, puis distillation cryogénique. Le TRF produit **2,5 kg de tritium par an**.

Les combustibles utilisés:-2 le Tritium

- La teneur moyenne de lithium, carburant primaire, dans l'écorce terrestre est d'environ 20 parties par million (ppm).
- Le lithium peut aussi être tiré de l'eau de mer ($0,18\text{g/m}^3$) ce qui représente une réserve potentielle de 230 milliards de tonnes supplémentaires.

Ci-contre, la première source civile de tritium dans le monde a été les réacteurs CANDU modérés à l'eau lourde



- Le Tritium est très rare. Même s'il en faut peu, il faudra en produire plusieurs Kilos par an dans chaque réacteur à fusion nucléaire pour que la filière soit viable. (ITER)

Des machines pour la fusion nucléaire

Historique de la recherche

- Des efforts de **recherche** sont menés depuis plus de 50 ans pour recréer les conditions de la fusion nucléaire stable au sein d'un réacteur.
- Toutefois, la maîtrise d'un processus contrôlé de fusion n'est **pas encore démontrée** et les technologies et matériaux adaptés à ces températures et pressions extrêmes ne sont pas encore disponibles pour une utilisation industrielle.
- Recréer un processus de fusion nucléaire stable s'avère beaucoup plus complexe que d'exploiter la réaction de fission en chaîne.

La fusion deutérium-tritium

- Comme indiqué, depuis une trentaine d'années, la quasi-totalité des recherches porte sur la fusion de deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium et de tritium.
- La température nécessaire à la fusion de ces deux isotopes est, au minimum de 100 millions de degrés et idéalement, de l'ordre de **150 millions de degrés**, soit **dix fois** la température du cœur du Soleil.
- Il se forme alors un plasma, quatrième état de la matière dans lequel les atomes sont totalement ionisés, c'est-à-dire que leurs noyaux et électrons ne sont plus liés

La fusion deutérium-tritium

- C'est dans ce plasma que la fusion des noyaux atomiques légers, pour former un noyau unique plus lourd et plus stable, va avoir lieu.
- Les neutrons dégagés lors de cette réaction irradiant l'enceinte du réacteur qui emmagasine de l'énergie thermique qui va être exploitée pour générer l'électricité.

La fusion deutérium-tritium

- Il existe deux voies de développement de réacteurs à fusion nucléaire.
- Ces deux méthodes ont déjà permis d'obtenir de brèves réactions de fusion. Cependant, elles nécessitent pour le moment plus d'énergie qu'elles n'en créent.
- C'est pourquoi les axes principaux de la recherche dans les décennies à venir porteront sur l'allongement et l'optimisation du processus de fusion.

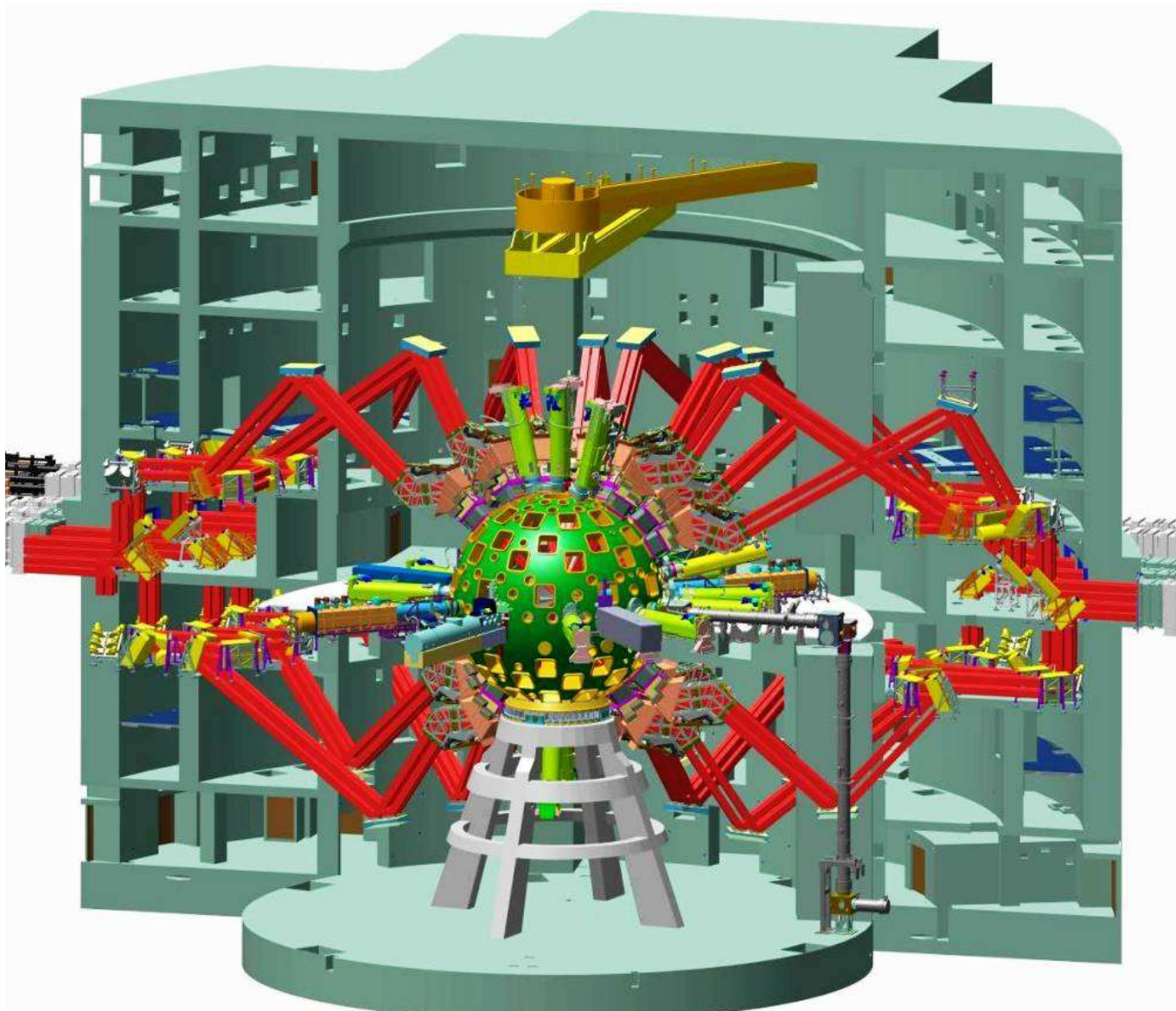
A-Le réacteur à confinement inertiel

- Le mélange deutérium-tritium est enfermé dans des microbilles.
- Elles sont portées à très haute pression et température pendant un temps extrêmement court par des impulsions de lasers très puissants.
- La micro-explosion thermonucléaire obtenue produit une impulsion hyperpuissante de l'ordre du térawatt sur un laps de temps très court, environ 10 picosecondes (10^{-12} s).
- Des résultats générant une énergie presque égale (60%) à celle injectée ont été obtenus.
- La mise en œuvre d'une machine industrielle fonctionnant sur ce procédé n'est pas évidente, son intérêt est plutôt théorique, du moins pour l'instant.

Le réacteur à confinement inertiel

- **Le laser mégajoule**, installé au centre CEA/CESTA⁽⁸⁾, près de Bordeaux, en est un exemple.
- Il a pour objectif de reproduire en laboratoire des conditions physiques analogues à celles créées lors du fonctionnement des armes nucléaires.
- Ce laser est essentiellement destiné à un usage scientifique et à la simulation d'explosions d'armes atomiques, tout comme son semblable américain, le NIF (National Ignition Facility) situé en Californie.
- L'énergie cinétique des impulsions laser est transformée en énergie thermique.

Le réacteur à confinement inertiel : laser mégajoule



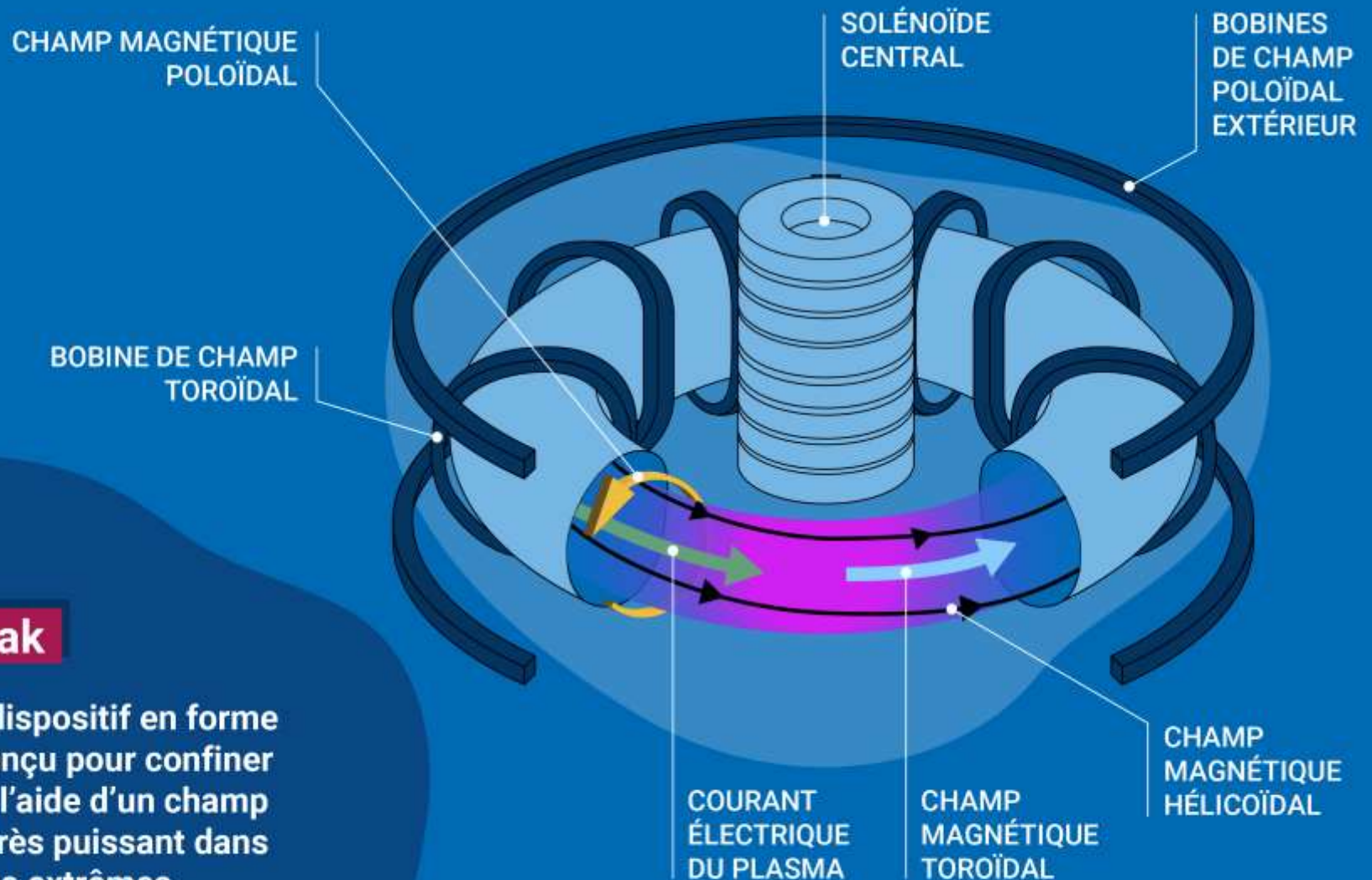
B-Le réacteur à confinement magnétique

- Les noyaux sont portés à **plus de 100 millions de degrés Celsius** dans des machines d'un volume important appelées tokamaks.
- **Aucun matériau ne peut résister à de telles températures**, (les plus résistants fondent vers 3000°C).
- Le plasma de deutérium et de tritium, parcouru par un fort courant généré par un transformateur, est **confiné par un champ magnétique intense ($\approx 12\text{T}$)**, généré par des aimants situés autour de la chambre, **qui agit sur le courant électrique gigantesque ($15 \cdot 10^6 \text{ A}$)**, celui du plasma en mouvement.

Brève histoire de la fusion nucléaire

- Les premières réactions de fusion en laboratoire ont été obtenues en 1934.
- C'était une avancée majeure à l'époque. Aujourd'hui, il n'est plus si difficile de provoquer cette réaction : en 2018, un enfant de 12 ans est entré au Livre Guinness des records en devenant la personne la plus jeune à réaliser une expérience de fusion à la maison.
- Malheureusement, ces réactions ne durent que quelques fractions de secondes et il reste très difficile de les maintenir et de les prolonger.
- Pour que l'énergie de fusion devienne une source d'énergie commercialement viable, il faut trouver un moyen stable et fiable de la produire.

Le Tokomak

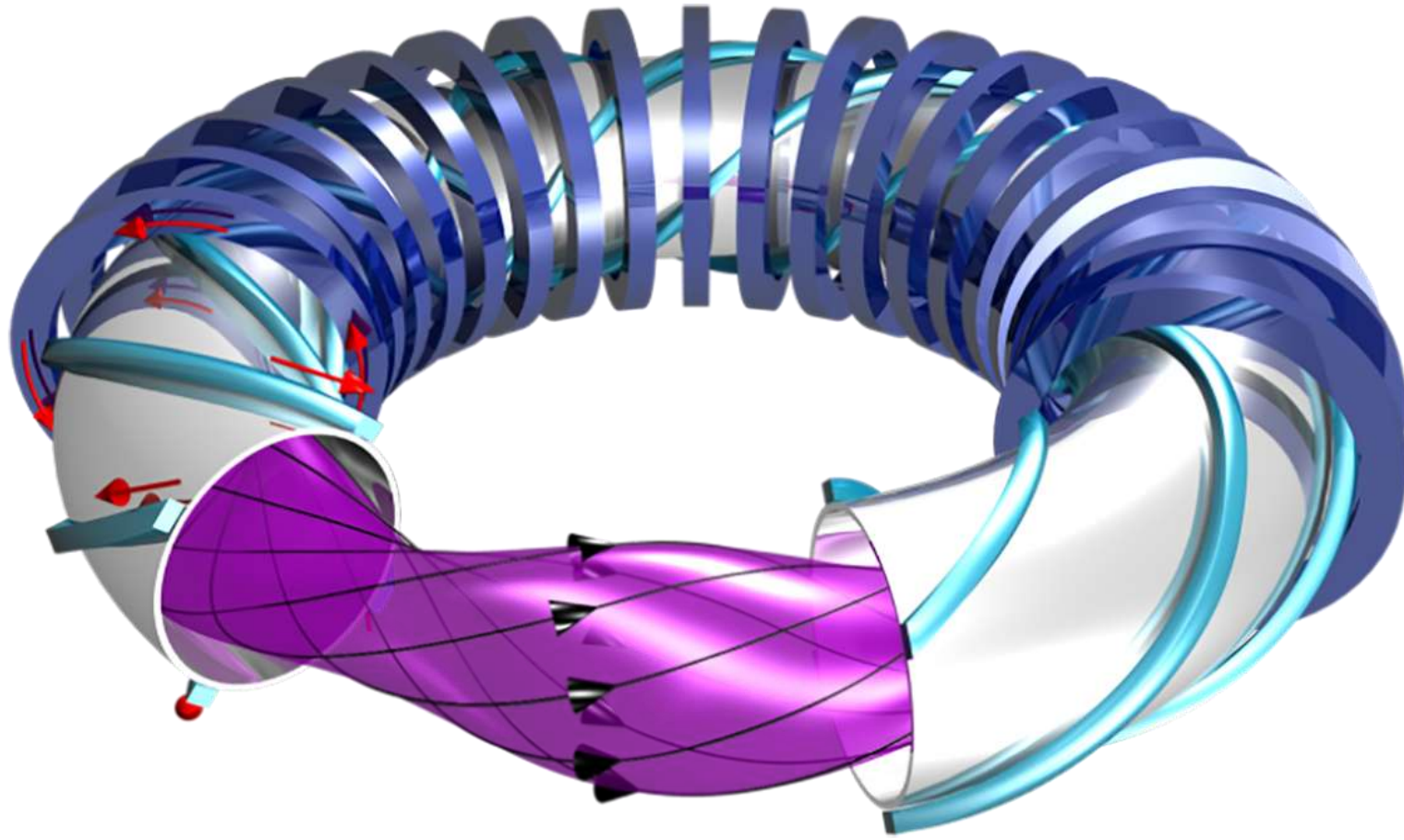


Le tokamak

Il s'agit d'un dispositif en forme de beignet conçu pour confiner les réactifs à l'aide d'un champ magnétique très puissant dans des conditions extrêmes.

Le tokamak a été inventé dans les années 1950-1960 par les physiciens Igor Tamm et Andreï Sakharov.

Variante du Tokomak: Le Stellarator



En tordant les aimants, on peut aussi obtenir une forme hélicoïdale sans recourir à un transformateur. Ce type de configuration est appelé stellarator.

Images : Institut Max Planck de physique des plasmas.

Des solutions différentes au problème

- Les configurations de stellarators étant difficiles à construire, la plupart des expériences actuelles sur la fusion se font avec des tokamaks (abréviation d'une expression russe signifiant « chambre toroïdale à bobines magnétiques »). Une soixantaine de tokamaks et une dizaine de stellarators sont actuellement en exploitation.
- Les deux types de réacteurs ont leurs avantages : les tokamaks sont meilleurs pour ce qui est de porter les plasmas à température élevée et les stellarators pour ce qui est de les maintenir stables. Les tokamaks sont plus répandus aujourd'hui mais il n'est pas exclu que les stellarators deviennent la solution privilégiée pour les futures centrales à fusion.

Le réacteur à confinement magnétique

- La fusion s'amorce dès que la température, la densité et le temps confinement thermique du mélange atteignent les seuils critiques d'allumage (100 millions de degrés).
- Rappelons que pour une fusion plus efficace une température de 150 millions de degrés est souhaitable (voir courbe de section efficace).
- Depuis les années cinquante, des centaines de machines de fusion ont été proposées, construites et exploitées. La solution la plus avancée aujourd'hui se base sur l'utilisation de champs magnétiques intenses.

Le réacteur à confinement magnétique

Le tokamak européen JET, situé à Culham en Grande Bretagne, a déjà réalisé l'exploit de produire 16 MW de puissance par la fusion à la fin des années 90 et a permis le lancement du projet ITER en 2007 à Cadarache.

ITER, lui, est le projet le plus ambitieux au monde dans le domaine de l'énergie, avec pour objectif de démontrer la faisabilité de la fusion comme source d'énergie.

ITER a pour objectif, entre autres, de produire 500 MW de puissance de fusion utilisable (un excédent dans la réaction) pendant environ 400 secondes !

Un cycle à reproduire à une fréquence aussi haute que possible...

Densité du plasma de ITER

La densité moyenne escomptée du plasma d'ITER, exprimée en nombre d'électrons par m^3 , est de $10^{20}/\text{m}^3$. C'est un million de fois moins dense que l'air, donc 150 milliards de fois moins dense que le plasma au cœur du Soleil.

Comme la probabilité de fusion dépend linéairement de la densité du plasma, ces conditions, très différentes, explicitent pourquoi des réactions qui peuvent être efficaces dans le Soleil, ne le seront pas dans des machines terrestres

- Cette faible densité fait que, même à 150 millions de degré K, l'énergie totale contenue dans le plasma d'ITER (moins de 1 g dans 840 m^3), est comparable à celle d'un TGV lancé à pleine vitesse et pas du tout à celle d'une bombe atomique.

Estimation de la puissance utile d'ITER

- Nombre d'ions par m^3 : 10^{20} .
- Masse moyenne d'un ion = $2.5 \times \text{proton} = 2.5 \times 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- Volume du plasma $840 m^3$ contenu dans $1400 m^3$.
- Masse plasma = $840 \times 10^{20} \times 2.5 \times 1.67 \times 10^{-27} = 3.5 \times 10^{-4} \text{ kg}$
- Energie plasma : $3.5 \times 10^{-4} \times 9 \times 10^{16} \times 3.52 \times 10^{-3} \times 2.5^* = 2.8 \times 10^{11} \text{ J}$
- Puissance cycle de 400s = $2.8 \times 10^{11} / 400 = 0.7 \times 10^9 \text{ W}$ dont 100 Mw pour le chauffage du plasma par les particules alpha et il faut soustraire 50 Mw de chauffage externe, l'énergie pour la cryogénie, les pertes par rayonnement (électrons) etc...
- Puissance nette utile : inférieure à 550 Mw
- Moyenne 2.5 nucléons/ion, énergie relative 3.52 MeV/1GeV

Cycle escompté

- L'idéal serait d'avoir un fonctionnement continu. ITER se fixe un objectif de travailler par cycle de 40 mn environ:
- Démarrage, (2 à 3 mn)-injection du plasma et chauffage du plasma, (différentes méthodes).
- Fusion (7 à 10 mn). La température du plasma est maintenue par l'énergie des noyaux d'hélium synthétisés, complété par un chauffage extérieur.
- Pendant cette phase, 500MW d'énergie utile produite.
- Mise à l'arrêt (1 à 2 mn).
- Extinction Repos 25 mn: Réinitialisation magnétique, refroidissement, pompage et nettoyage, avec évacuation hélium et cendres (1 à 2 mn). Ces déchets font l'objet d'un retraitement pour extraire le tritium résiduel pour le réutiliser. L'extraction du tritium du lithium de couverture se fait selon un autre cycle. Le stockage du tritium est très contrôlé, car il est stratégique pour les armes nucléaires.

Le plasma: quid des électrons?

- Un plasma est un mélange de noyaux d'atomes et d'électrons non liés à ce noyau.
- Dans les tokamaks on parle de la fusion des noyaux des atomes, mais pas des électrons: Où sont-ils, que font – ils?
- Ils sont bien là et en résumé si les ions sont le « combustible » les électrons sont le fluide de travail, par leur **grande mobilité car ils sont 2000 fois plus légers que les nucléons**, ils permettent de chauffer (par collisions) le plasma (transfèrent l'énergie), de transporter le courant électrique et de répondre aux champs magnétiques.
- Par contre ils sont responsables des principales pertes thermiques par rayonnement.

Charge et courant électrique

- Dans le plasma, les charges négatives des électrons sont égales aux charges positives des ions de deutérium et de tritium. La charge de l'électron est de 1.6×10^{-19} Coulomb.
- Avec une densité de 10^{20} ions par m^3 , dans les 840 m^3 du plasma la charge globale est de $16 \times 840 = 13340$ Coulombs.
- La même chose pour les ions, mais en positif.
- Notons que cette charge est inférieure à celle d'une modeste pile 1.5 V de type D!
- Le courant électrique est porté par les électrons (6000 fois moins lourds qu'un ion de tritium) bien plus mobiles que les ions. Le diamètre du centre du plasma est de 6.2m.
- Le courant maximum de 15 millions d'ampères correspond à 1124 tours des électrons par seconde.
- Distance parcourue 21.882 km, vitesse 21.882km/s.
- A noter que leur vitesse d'agitation thermique liée à la température de 10KeV est très supérieure.

Critère de Lawson

Pour la fusion D+T, le critère de Lawson, qui mesure la performance de la fusion; indique que pour qu'elle soit efficace il faut qu'il soit supérieur à $5 \cdot 10^{21} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{KeV} \cdot \text{s}$.

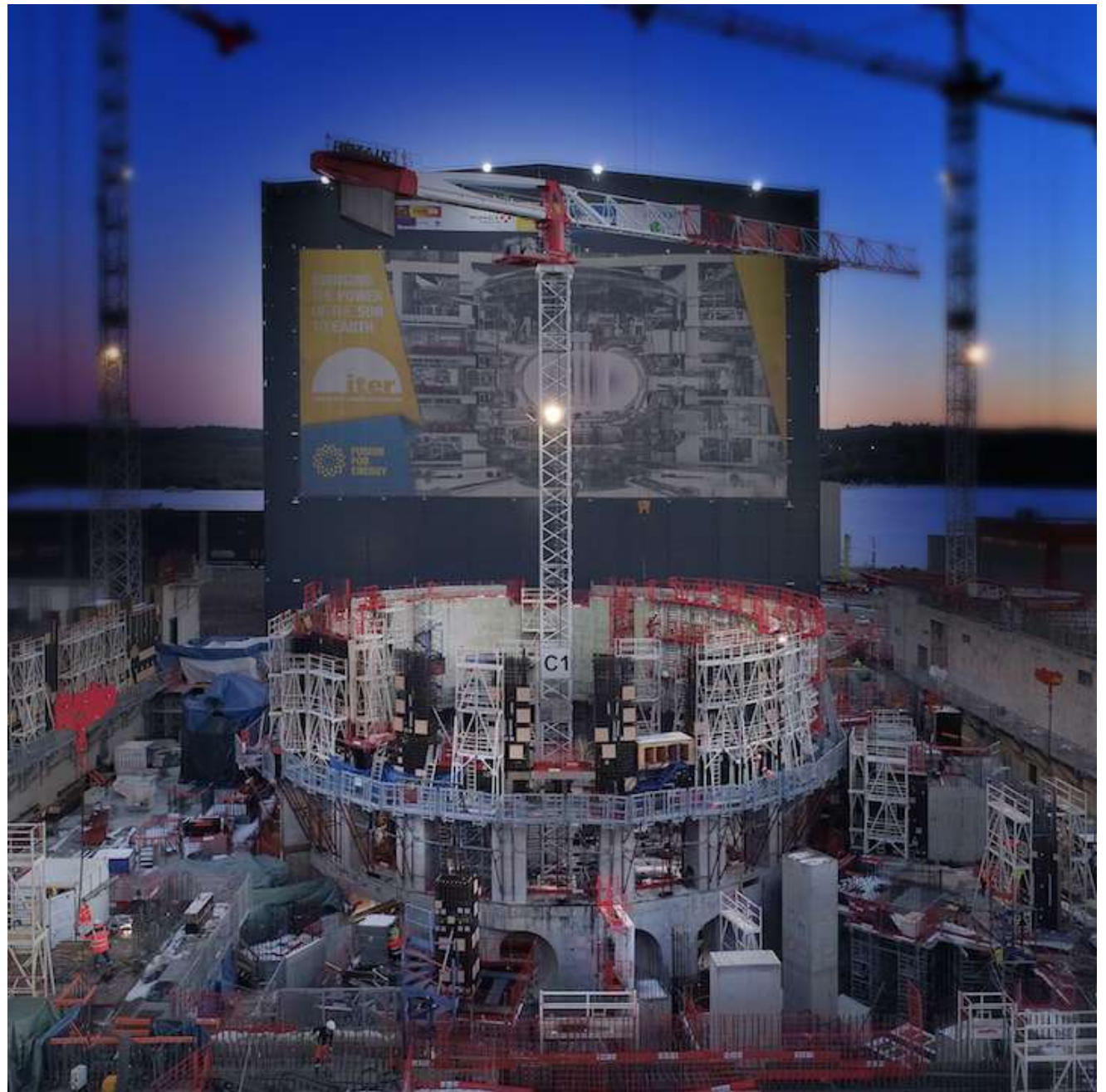
Pour ITER; si les objectifs sont tenus on obtient:

$$15 \text{KeV} \cdot 10^{20} \cdot 400 \text{s} = 6 \cdot 10^{23} > 5 \times 10^{21} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{KeV} \cdot \text{s}.$$

On voit que ce critère est très largement satisfait pour ITER et qu'il le resterait même pour des temps de confinement beaucoup plus court.

Le réacteur à confinement magnétique

- Il existe plusieurs prototypes de tokamak dans le monde, dont l'installation Tore Supra à Cadarache.
- Le réacteur ITER, en construction sur ce site, appartient à la même famille.



Tokomak ITER

ITER, situé en France



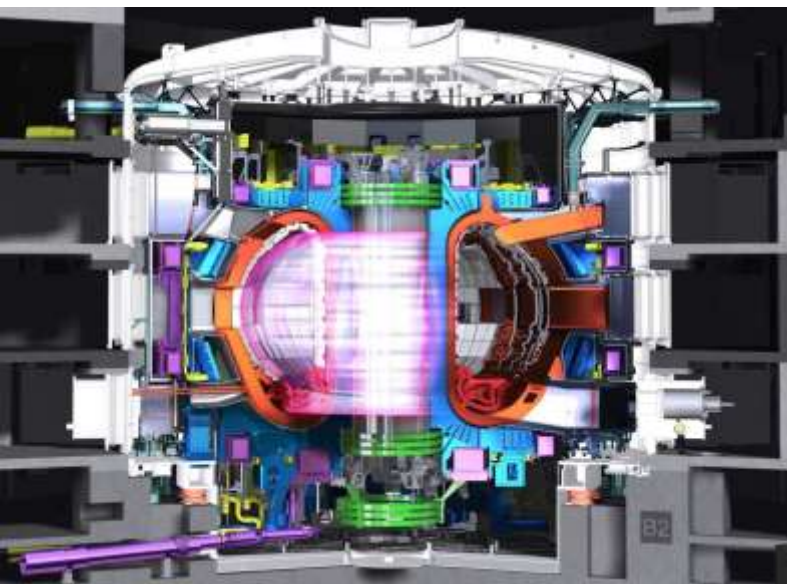
Credits: ITER.org

Les membres d'ITER*

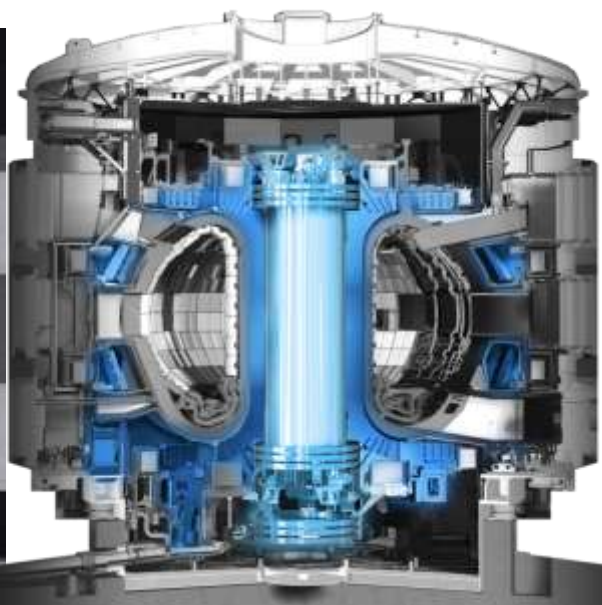


*Les pays qui participent au programme ITER sont : les 27 membres de l'Union européenne, la Chine, l'Inde, le Japon, la République de Corée, la Fédération de Russie, et les États-Unis d'Amérique (+ la Suisse et le Royaume-Uni par le biais d'autres partenariats).

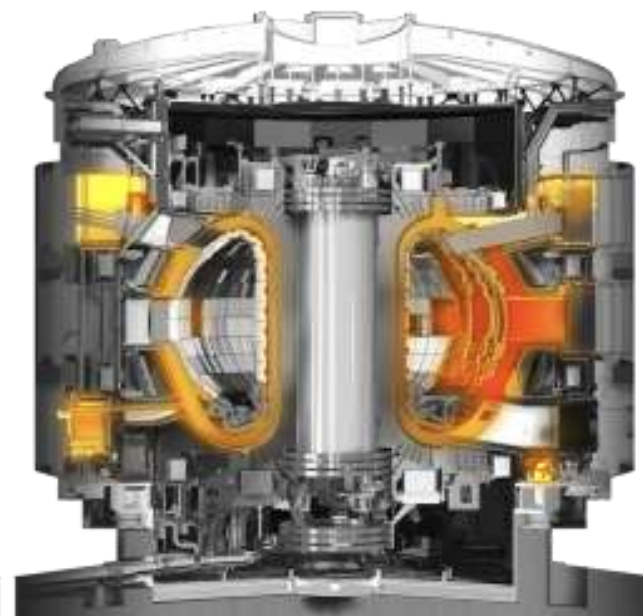
Tokamak en action



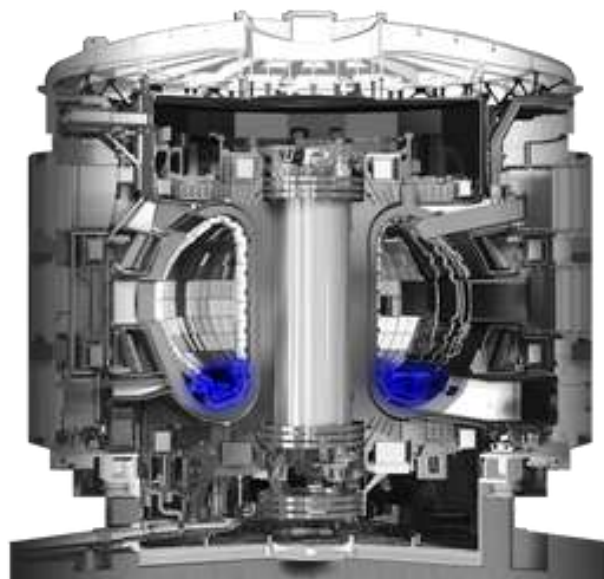
Les aimants



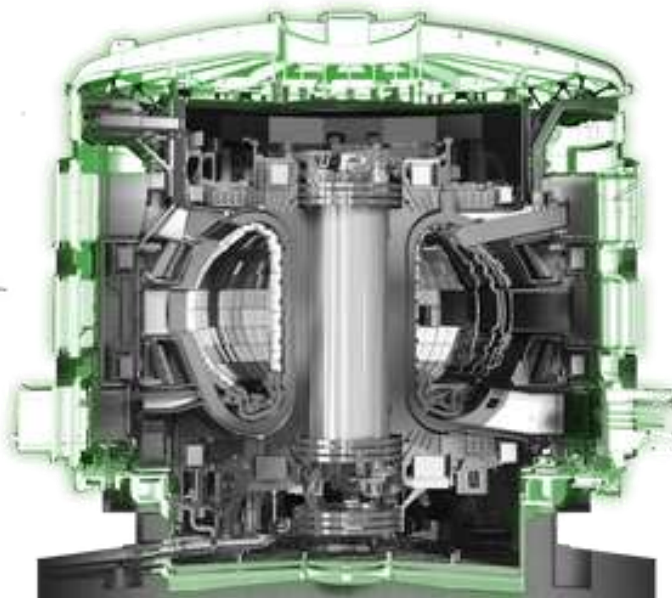
Chambre à vide



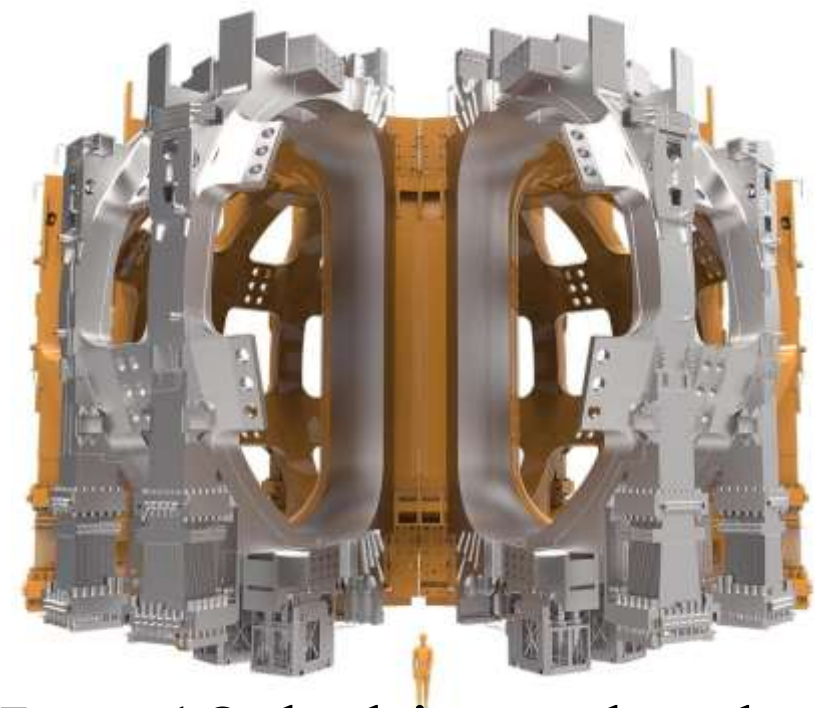
Divertor



Cryostat



Les aimants



L'énergie magnétique stockée en fonctionnement est de 51 Gigajoules: de quoi soulever le porte- avion Charles de Gaulle à plusieurs mètres de hauteur

Les 18 bobines de champ toroïdal, verticales autour de la chambre à vide, génèrent un champ magnétique pour confiner le plasma. Les bobines de champ toroïdal sont conçues pour générer un champ magnétique maximum de **11,8 teslas**, le courant dans les bobines atteint **60 000A**. Hautes de 17 mètres et larges de 7, pesant chacune **330 tonnes**, les bobines de champ toroïdal sont les plus gros éléments de la machine après la chambre à vide.

La Chambre à vide



C'est l'enceinte en acier inoxydable, parfaitement hermétique, dans laquelle se produisent les réactions de fusion. Elle agit également comme première barrière de confinement. Dans ce volume de forme toroïdale, les particules de plasma se déplacent selon un mouvement de spirale continu sans entrer en contact avec les parois. La chambre à vide constitue un environnement sous vide poussé. Elle assure une première protection contre le rayonnement neutronique, participe à la stabilité du plasma et est une première barrière de confinement des radiations.

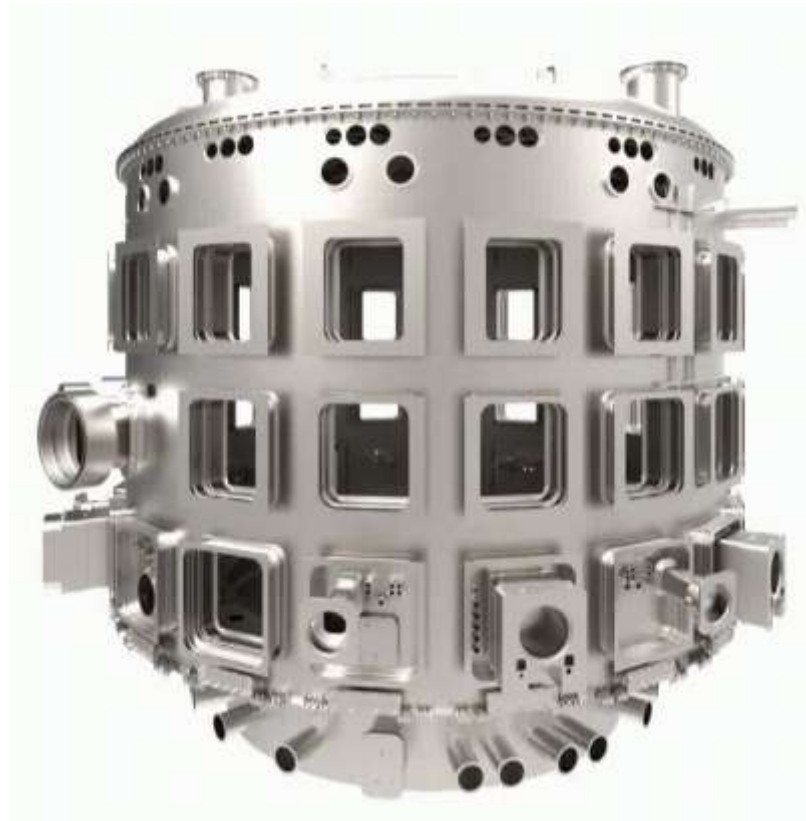
Le Divertor : ”Pot d’échappement!”



Diamètre de 14 à 16m. Surface 142m²

Le divertor d'ITER subit des contraintes extrêmes. Situé sur le « plancher » de la chambre à vide, il assure l'extraction des effluents gazeux produits (hélium par exemple, qui étoufferait la réaction) et les impuretés ainsi qu'une partie de la chaleur gigantesque générée par les réactions de fusion. **La charge thermique qu'il endure est comparable à celle d'un vaisseau spatial qui se poserait sur la surface du Soleil!** Il est refroidi par de l'eau circulant à haute pression.

Le cryostat



Le cryostat ITER—la plus grande enceinte à vide en acier inoxydable jamais construite (16,000 m³)—enveloppe la chambre à vide et les aimants supraconducteurs, délimitant un environnement sous vide extrêmement froid.

Le projet ITER

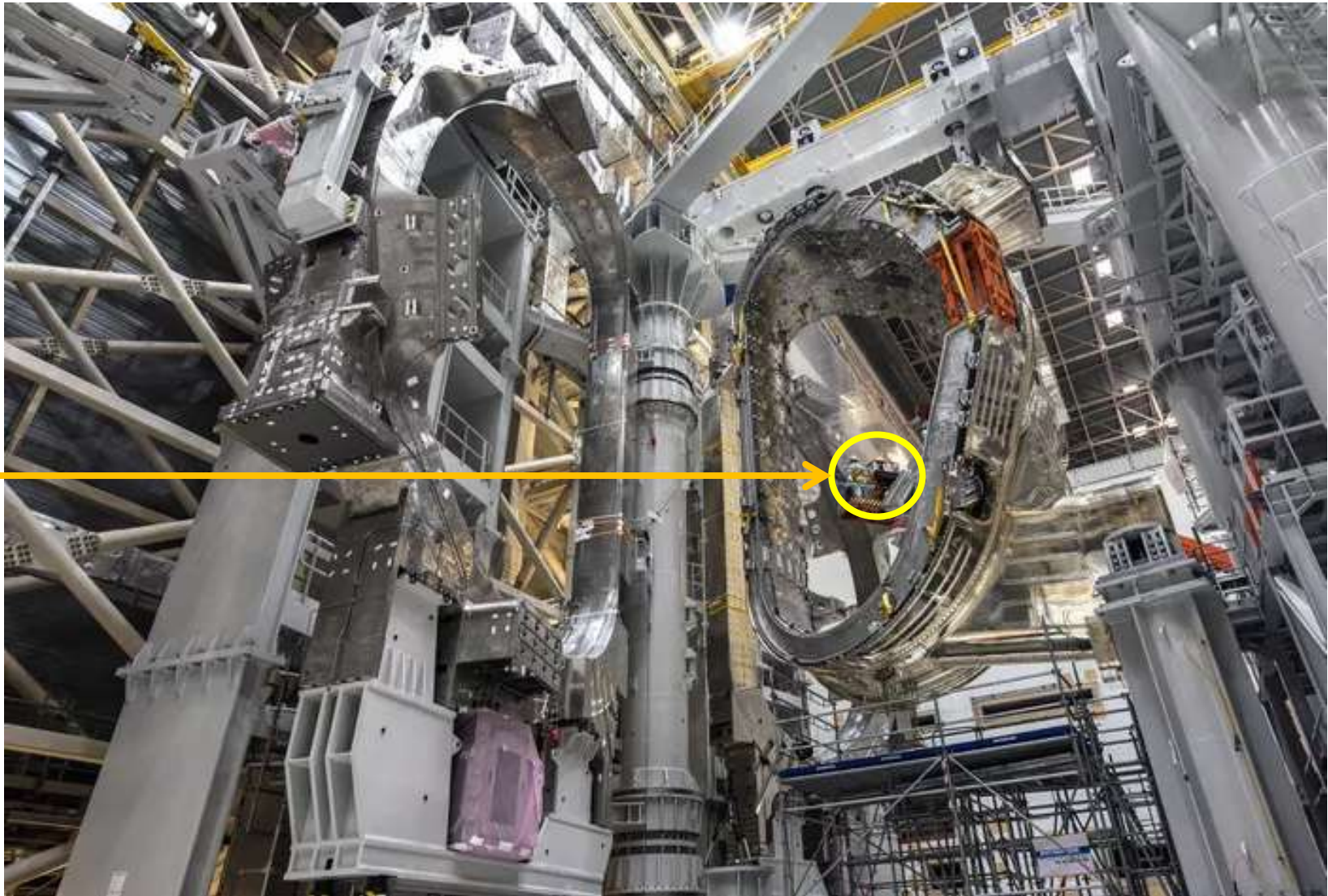
- À une quarantaine de kilomètres au nord d'Aix-en-Provence, l'installation ITER occupe 180 hectares, concédée par la France à l'organisation internationale ITER Organization.
- La plateforme centrale (42 hectares) compte une quarantaine de bâtiments, dont celui qui abrite le tokamak en cours d'assemblage.



Quels pays contribuent à ITER ?

- Membres du projet ITER
- En tant que signataires de l'accord ITER, les membres de la collaboration ITER, la Chine, les 27 membres de l'Union européenne, l'Inde, le Japon, la Corée, la Russie et les États-Unis, partageront les coûts de construction, d'exploitation et de démantèlement du projet, ainsi que les résultats expérimentaux et toute propriété intellectuelle générée par le projet.
- On voit que, comme le CERN à Genève, compte-tenu de l'intérêt de l'enjeu pour l'humanité, il s'agit d'un programme mondial.

Le réacteur à confinement magnétique



Personnel
au travail
Donne
l'échelle

Une des 18 bobines magnétiques verticales, de 17 mètres de hauteur et 7 mètres de largeur, qui fera partie du réacteur à fusion géant Iter.

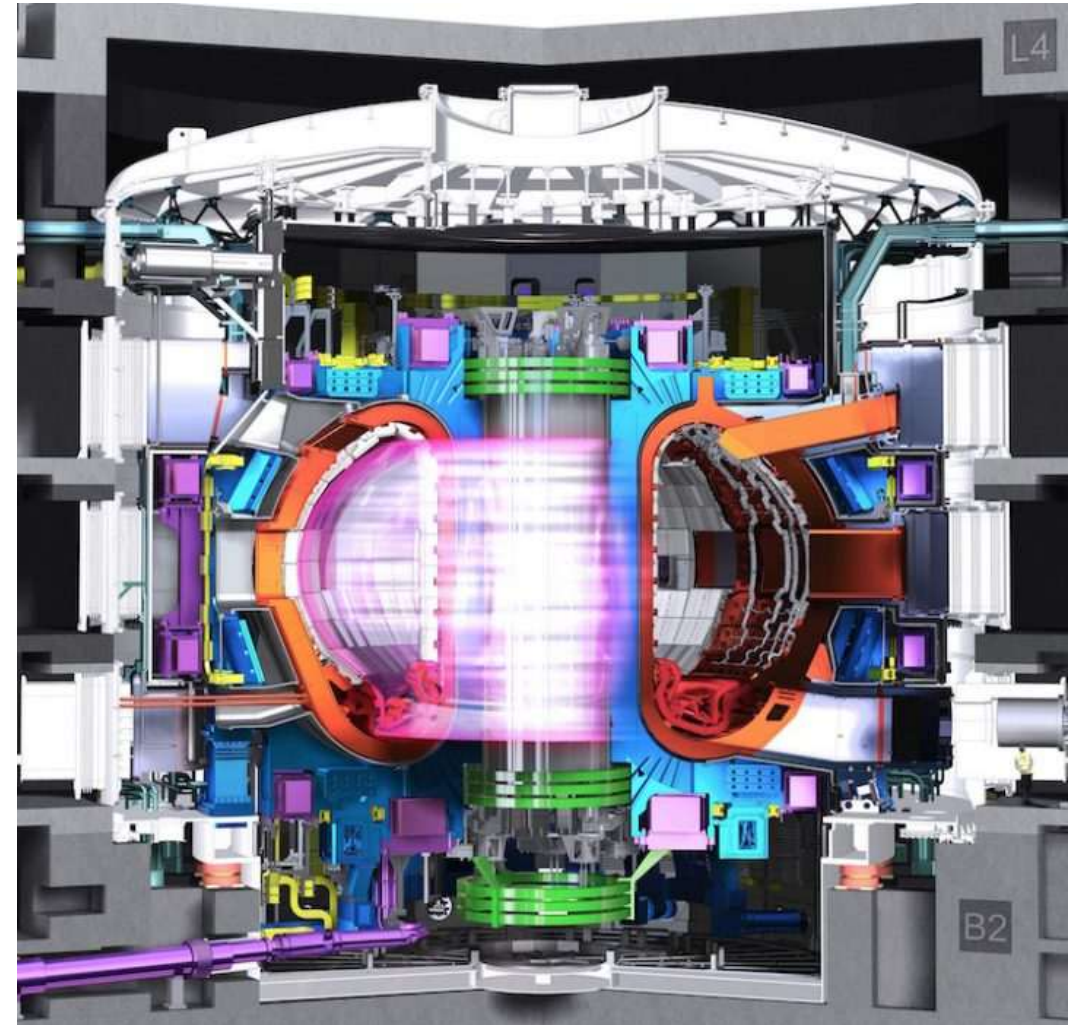
Le réacteur à confinement magnétique



Une partie de chambre à vide d'Iter, à l'intérieur de laquelle le plasma sera confiné.

Le réacteur à confinement magnétique

- Le Futur tokamak d'ITER mesurera 29m de haut pour 28m mètres de diamètre et pèsera approximativement 23 000 tonnes.
- Volume chambre à vide 1400m^3 .
- Puissance escomptée: 500Mw par impulsions de 5 à 10mn
- Puissance du Soleil au même volume: 1.4Kw, c'est la puissance d'un petit radiateur électrique permettant de chauffer une petite chambre!



ITER doit être 400 000 fois plus efficace que le Soleil!

Fusion par confinement magnétique

- Il s'agit d'abord de maîtriser le plasma « en combustion ».
- Dans les expériences en deutérium-tritium de JET, la puissance dégagée par les réactions de fusion participent de façon modeste au maintien du plasma dans les conditions de fusion : 20 % de l'énergie de fusion étant portée par les particules alpha émises à 3.5 MeV, la thermalisation de ces particules chargées dans le plasma fournit 3 mégawatts (MW).
- Comme il faut 24 MW, fournis par les systèmes de chauffage externe par injection d'ondes radio et de faisceaux d'atomes énergétiques de deutérium ou de tritium, on voit qu'il y a déficit en énergie!

Fusion par confinement magnétique

- Dans ITER, le chauffage du plasma par les réactions de fusion sera, pour la première fois, dominant : 100 MW de chauffage par les particules alpha pour 50 MW de chauffage par les systèmes externes.
- Le courant électrique correspondant au plasma en mouvement atteint **15 millions d'ampères**: 500 fois celui de la foudre. Cela souligne la démesure de la puissance à maîtriser dans ITER.
- ITER ouvrira l'ère de l'expérimentation des plasmas en combustion (« burning plasmas »), produisant plus d'énergie qu'ils n'en consomment.
- C'est évidemment le but recherché!

Fusion par confinement magnétique

- Les effets des particules alpha sur la turbulence, la stabilité magnétohydrodynamique du plasma ainsi que le transport de ces particules du cœur du plasma jusqu'à leur évacuation sous forme d'hélium neutre dans le divertor, situé dans la partie basse de l'enceinte à vide du tokamak, seront confrontés aux nombreuses simulations en cours de développement et des surprises ne sont pas à exclure.
- C'est tout l'enjeu d'ITER de montrer que l'on peut contrôler de tels plasmas sur de longues durées.

Fusion par confinement magnétique

- L'expérience acquise avec les démonstrateurs actuels a précisé les obstacles majeurs à surmonter.
- Ceci a entraîné le lancement d'un programme de recherche au niveau européen dans lequel le CEA, avec son tokamak WEST, est un des acteurs majeurs au côté de 5 autres instituts européens.
- L'objectif est de mieux comprendre les mécanismes qui régissent les dépôts de flux de particules et de chaleur, de trouver des régimes plasma et des géométries permettant d'étaler ces flux de chaleur et enfin de développer des composants face au plasma innovants capables de supporter des flux intenses de particules et de chaleur supérieur à 10 MW/m^2

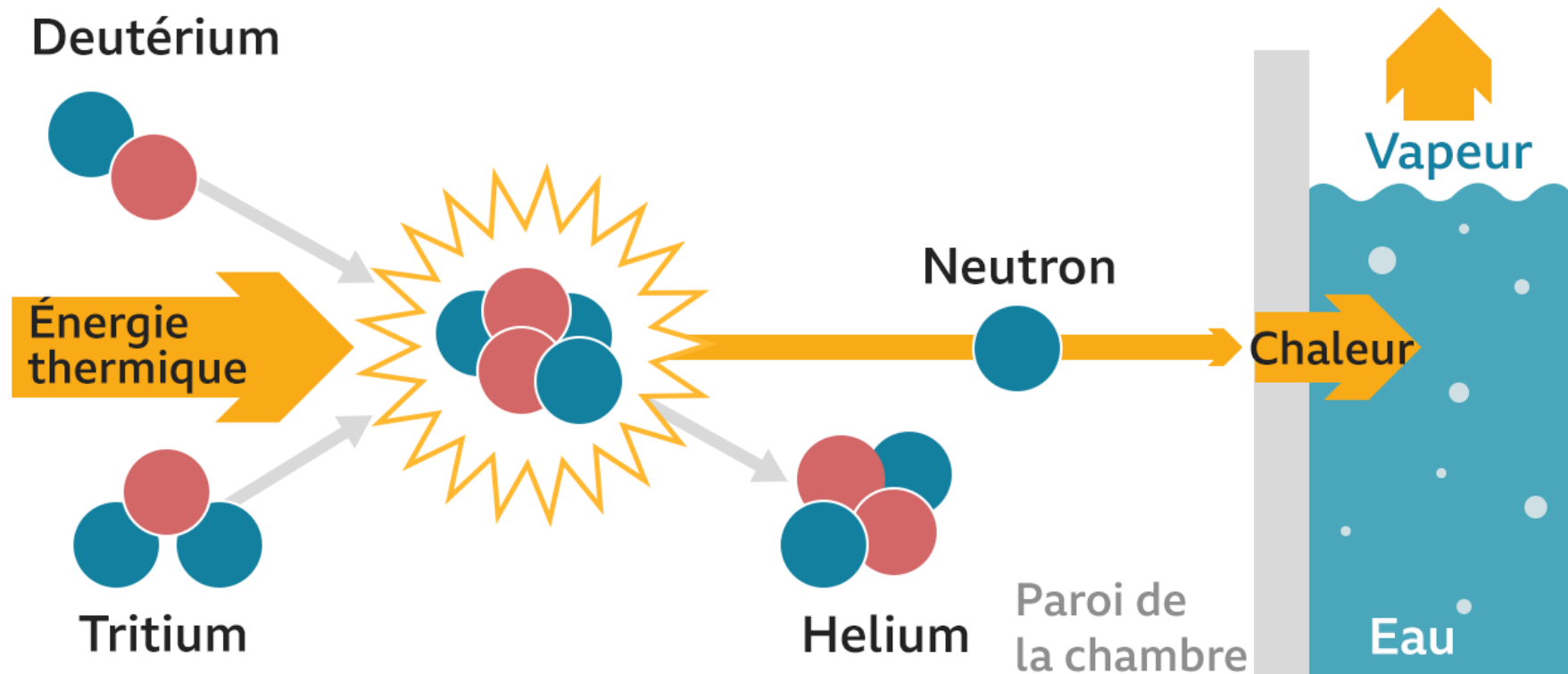
Le rôle des neutrons énergétiques

- Si l'énergie des particules alpha produites par les réactions de fusion est confinée dans le plasma de cœur par le champ magnétique et permet de maintenir le plasma en combustion, **celle portée par les neutrons doit être récupérée dans les parois, non seulement pour chauffer l'eau qui fera tourner les turbines électrogènes, mais aussi pour produire le tritium, l'un des deux combustibles de la fusion, non disponible à l'état naturel.**
- La **difficulté** réside dans l'énergie cinétique très élevée de ces neutrons : 14,1 MeV soit environ 7 fois plus que celle des neutrons « rapides » produits par les réactions de fission.

La récupération de l'énergie

Comment fonctionne la fusion nucléaire

1	2	3	4
Les atomes d'hydrogène sont chauffés	Réaction de fusion	Hélium, neutron et énergie libérée	L'énergie des neutrons chauffe l'eau



Production du tritium

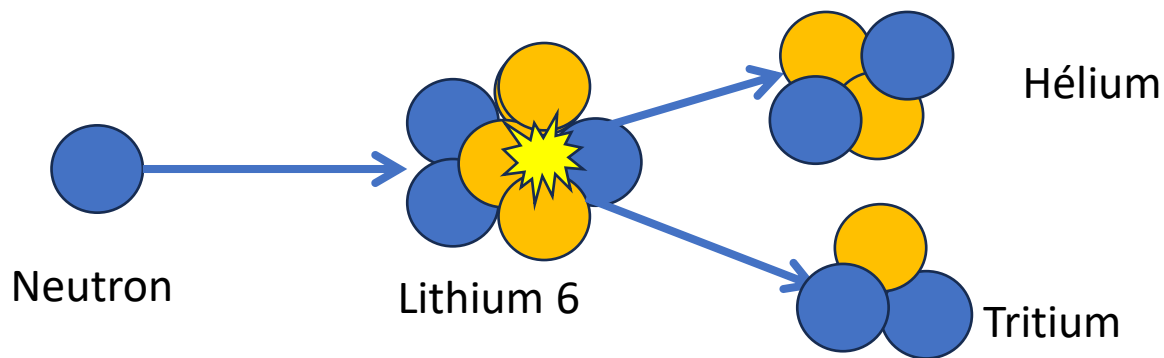
Cet élément essentiel n'étant pas disponible à l'état naturel, les tokomaks devront le produire, en quantité suffisante, (plusieurs kilogrammes par machine, par an), pour les alimenter.

La production nécessaire du tritium

- La réaction de fusion deutérium-tritium (D-T) génère un flux de neutrons de haute énergie ainsi que des noyaux d'hélium.
- Tandis que le plasma demeure confiné par les champs magnétiques du tokamak, les neutrons, qui sont électriquement neutres, s'échappent et sont absorbés par les modules de couverture qui tapissent la paroi.
- La présence de lithium dans ces modules de couverture déclenche la réaction suivante : le neutron incident est absorbé par l'atome de lithium, lequel se recombine alors en un atome de tritium et un atome d'hélium. On peut ensuite extraire le tritium de la couverture, le recycler dans le plasma et le rendre à sa fonction de combustible.

Production du tritium avec lithium 6

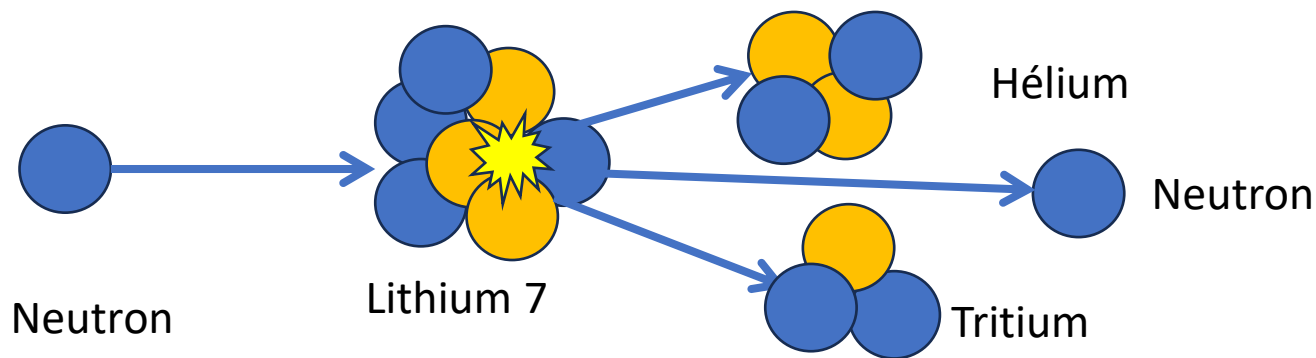
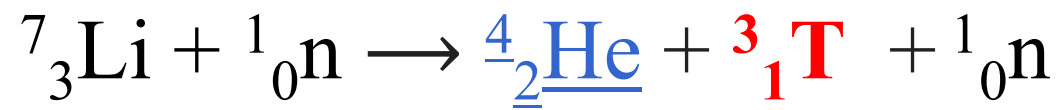
La capture d'un neutron par le lithium 6 qui, en se désintégrant, produit 1 atome d'hélium et 1 de tritium est :



En bleu les neutrons, en orange les protons. Section efficace : $\sigma = 940$ barns, pour des neutrons très lents (0,025 eV)
La probabilité de réaction exothermique est élevée.

Production du tritium avec lithium 7

La réaction (endothermique) d'un neutron par le lithium 7 qui produit 1 atome d'hélium, 1 de tritium et un neutron est :

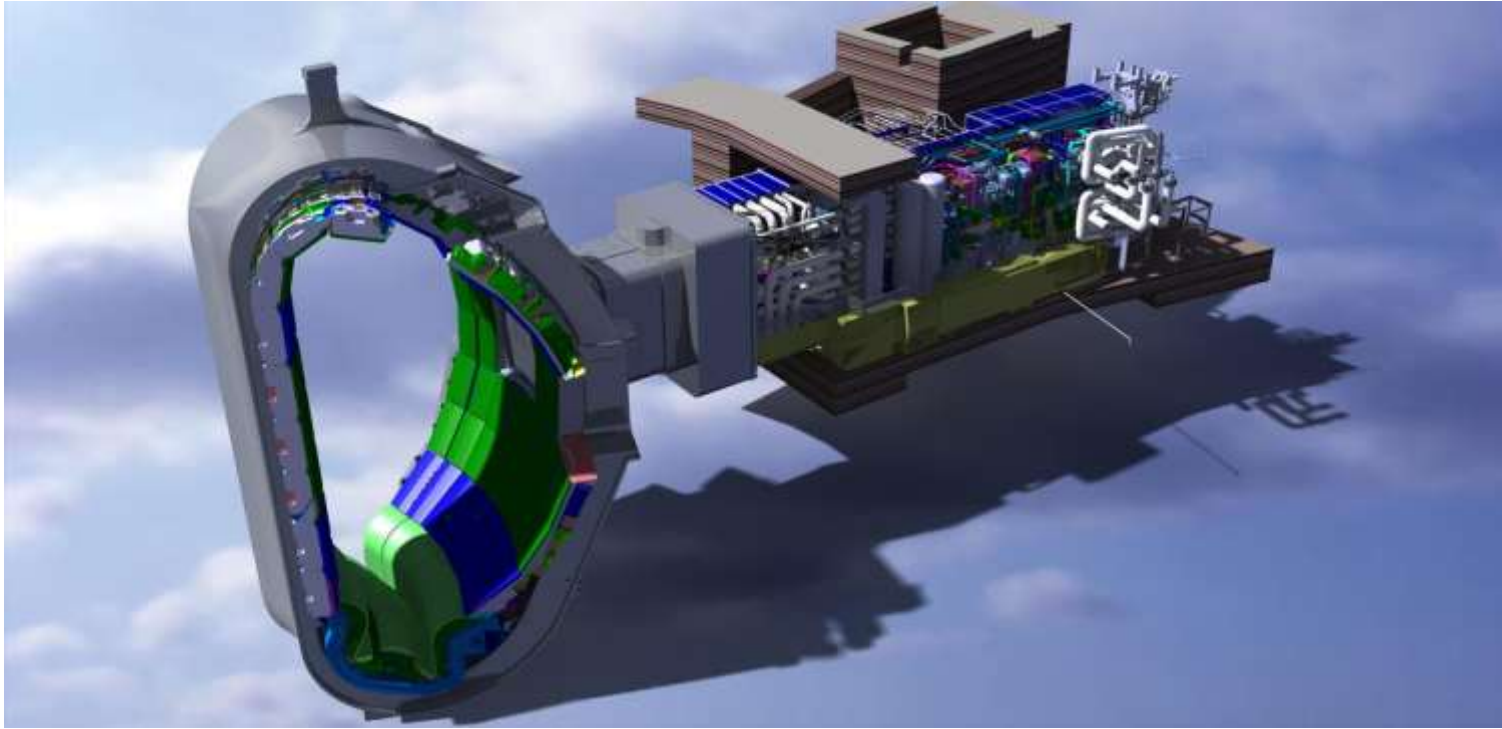


Section efficace : $\sigma = 0.4\text{barn}$, pour des neutrons rapides: $E > 2.5 \text{ MeV}$. Probabilité de réaction faible, mais ne consomme pas de neutron.

Production du tritium

- On appelle « couvertures tritigènes » les couvertures qui contiennent du lithium (92.5% de ^7Li et 7.5% de ^6Li , ce qui correspond aux abondances relatives de ces isotopes).
- Les centrales de fusion de demain devront produire, dans leur enceinte même, le tritium qu'elles consommeront.
- **ITER sera le premier tokamak à tester l'autosuffisance en tritium dans les conditions réelles d'un environnement de fusion.**
- **Il faudra produire au moins 1 atome de tritium pour chaque atome de tritium fusionné!**
- **Des recherches supplémentaires seront nécessaires pour démontrer la production et le recyclage de tritium à l'échelle industrielle.**

Production du tritium



ITER offrira une opportunité unique de tester des prototypes de modules de couverture tritigène — c'est-à-dire capables de générer du tritium — dans les conditions réelles d'un environnement de fusion. La photo montre un module tritigène expérimental et ses systèmes auxiliaires dans l'une des deux espaces autour de la chambre à vide prévu pour accueillir les essais de production du tritium.

Production du tritium en France

- Le tritium à usage militaire a pour l'essentiel été produit en France dans l'usine du CEA de Marcoule au sein des réacteurs Celestin 1 et 2, avant leur arrêt en 2009.
- La production va être relancée en collaboration avec EDF, ce qui nécessite une légère modification des centrales et ne peut être fait qu'après arrêt.
- Elle suivra les recommandations du rapport IRSN (Institut de radioprotection et de Sûreté Nucléaire) intitulé : « Actualisation des connaissances sur les effets biologiques du tritium » : la synthèse de 10 années de recherche en radiotoxicologie humaine et environnementale » .
- Télécharger le rapport IRSN 2021-00206 Actualisation des connaissances sur les effets biologiques du tritium (PDF)

Production du tritium en France

- Le tritium est un gaz très rare, pour l'heure, la France ne dispose pas de moyen de production de ce gaz.
- Mais d'ici quelques années, pour en fabriquer, elle pourra non seulement s'appuyer sur la centrale d'EDF de Civaux, mais aussi sur le très discret réacteur militaire RES.
- C'est un réacteur nucléaire dont très peu de personnes connaissent l'existence. Le RES, pour réacteur d'essai au sol, est installé sur le site du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), à Cadarache (Bouches-du-Rhône) au sein de l'Installation nucléaire de base secrète de la propulsion nucléaire.
- Depuis un peu plus de six ans, il est exploité par TechnicAtome, le fabricant des « moteurs » des bâtiments de la marine à propulsion atomique, pour le compte de la direction des applications militaires (DAM) du CEA.

Production du tritium en France



L'entrée du site de Cadarache du CEA dans la Bouches-du-Rhône où a été construit le Réacteur d'essai au sol (RES).

Les neutrons produits par la fusion
qui servent à transférer l'énergie utile
sont dévastateurs!

Les dégâts des neutrons énergétiques

- Ces neutrons énergétiques vont **endommager** en profondeur les matériaux de première paroi en provoquant des déplacements d'atomes dans le réseau cristallin et en produisant du gaz en leur sein par transmutation nucléaire (hydrogène ou hélium).
- Par ailleurs ces réactions de transmutation ont pour conséquence une activation nucléaire des matériaux (des isotopes radioactifs peuvent être créés).
- On estime qu'un réacteur de fusion pourrait produire plus de 30 dpa/an (à comparer aux 80 dpa d'une centrale à fission sur toute sa vie).

Dégâts neutrons très énergétiques

- DPA: déplacement par atome, mesure la détérioration des matériaux par les neutrons rapides.
- Le matériau privilégié aujourd'hui pour ces composants à très haut flux est le tungstène qui a pour caractéristiques, au-delà de sa température de fusion la plus élevée des éléments, des taux d'érosion et des taux de rétention du tritium très faibles.
- L'épaisseur totale de la chambre à vide est comprise entre 0,45 et 0,83 m, pour se protéger des neutrons.
- Les coques intérieures et extérieures sont constituées de plaques soudées de 40 mm d'épaisseur.

Résister aux neutrons très énergétiques

- Seuls des matériaux avec une composition chimique et structurelle conçue à dessein pourront résister. La validation et la qualification de tels matériaux doivent se faire dans une installation d'irradiation dédiée capable de générer un flux intense de neutrons de 14 MeV.
- C'est à cette fin que l'Europe et le Japon mènent depuis 2007, dans le cadre de l'« approche élargie », les études d'ingénierie du projet IFMIF. Le CEA est impliqué dans le volet accélérateur.
- Le rapport final est attendu très prochainement ainsi que le choix d'un site et la décision de construction

Les avantages de la fusion

Les avantages écologiques

- La fusion génère peu de déchets radioactifs, en particulier à longue période qui nécessitent un enfouissement, au grand dam des riverains.
- Pas de gaz à effet de serre.
- Les produits de fusion (hélium) ne sont pas radioactifs mais les neutrons rapides peuvent créer des isotopes radioactifs, heureusement de courte période.
- Au niveau santé, quelle que serait la forme de l'apport en tritium dans l'organisme, la plus grande partie du tritium est réputée éliminée en 1 mois et la presque-totalité est éliminée en moins de 1 an. Sa période biologique est donc très inférieure à sa période radioactive.
- Le deutérium, qui est également de l'hydrogène n'est ni chimiquement ni radioactivement nocif (stable).

Les avantages sécuritaires

- **Tout risque d'emballement** de la réaction nucléaire et donc toute menace d'explosion est écartée.
- Contrairement au procédé de fission nucléaire, la moindre perturbation (une fuite par exemple) au sein d'un tokamak entraînerait un refroidissement suivi d'un arrêt spontané des réactions de fusion.
- En cas de destruction violente du tokamak, les risques générés pour l'environnement sont limités, l'énergie interne au tokamak étant celle d'un TGV en marche.
- Le deutérium qui s'échapperait est inoffensif quant au tritium à courte période, il y en a très peu (moins de 1g dans le tokamak ITER) et étant un gaz léger (hydrogène) il peut s'échapper dans l'atmosphère.
- Alternativement, ces gaz, étant de l'hydrogène, peuvent brûler, mais vu la faible quantité ce sera limité.

Les avantages économiques

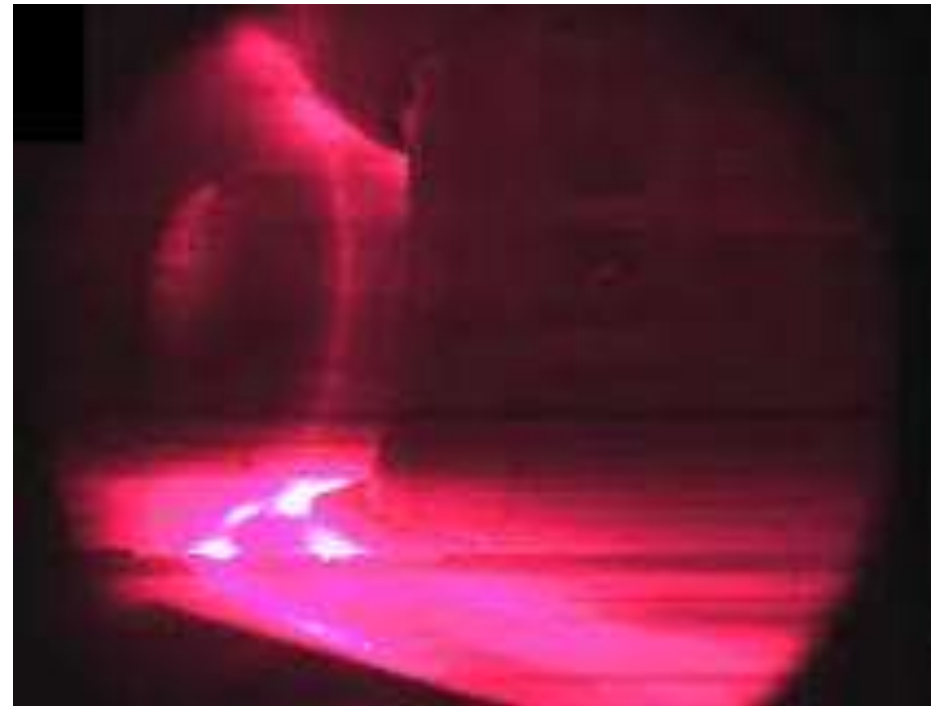
- La fusion nucléaire fait appel à des combustibles (deutérium, lithium) présents en grande quantité sur notre planète, de quoi alimenter les éventuels réacteurs à fusion pour de nombreux millénaires. Les risques de pénurie énergétique seraient donc écartés.
- Quelques grammes de combustible suffiraient pour déclencher et entretenir les réactions de fusion.
- Une centrale à fusion de 1 000 MW aurait ainsi besoin de 125 kg de deutérium et de 3 tonnes de lithium pour fonctionner toute une année.
- Concernant l'abondance du lithium, une batterie de voiture électrique moyenne contient environ 10kgs de lithium pur.

Dernières nouvelles

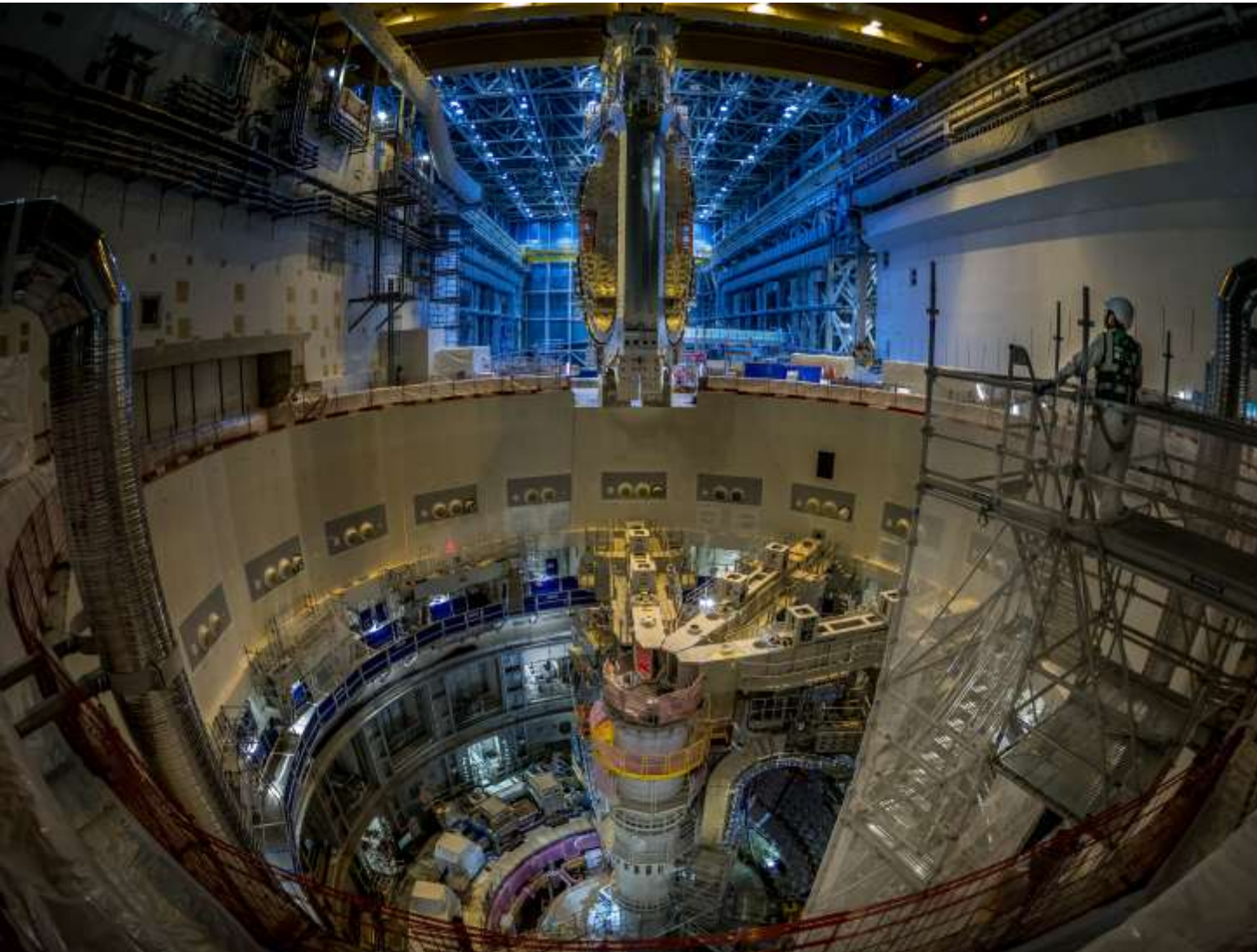
Dernières nouvelles de la fusion contrôlée

- 18 févr. 2025

- 1 337 secondes (+ de 22mn) : c'est le temps durant lequel le tokamak West, opéré sur le centre CEA de Cadarache, a maintenu un plasma le 12 février.
- Un résultat qui améliore de 25 % le précédent record de durée, obtenu par le tokamak chinois East, quelques semaines avant.



Dernières nouvelles de la fusion contrôlée



Les équipes
d'assemblage ont
installé avec
succès un
quatrième module
de secteur dans le
puits du tokamak
les 28 et 29
janvier 2026

Calendrier de mise en service (revu 2024)

- Initialement prévue en 2025, le premier plasma est repoussé en 2034.
- 2034-2039: phase de montée en puissance.
- 2039 Opération Deutérium-Tritium pour montrer que le Tokamak produit plus d'énergie qu'il en consomme: les phases critiques sont:
- Créer un vide quasi-parfait pour éviter une contamination du plasma
- Refroidissement cryogénique des bobines des aimants géants à -269°C pour la supraconductivité.
- Injection d'une quantité infime de gaz des isotopes d'hydrogène.
- Le chauffage par micro-ondes pour atteindre 150 millions de degrés

Vers la voie royale de la fusion?

- L'hélium 3 est un isotope stable, rare sur Terre. Sur la Lune, déposé par le vent solaire depuis des milliards d'années en l'absence d'atmosphère il s'y accumule.
- Si la quantité est très supérieure à celle sur Terre, (100 000 tonnes selon une sonde chinoise orbitale), comme il est saupoudré sur la surface, sa concentration en surface y est faible (entre 10^{-9} et 10^{-8}), rendant son exploitation ardue.
- La découverte, en janvier 2026, d'un gisement prometteur au Minnesota, (projet Topaz, société Pulsar Helium), d'hélium 3, rebat les cartes.
- Les laboratoires fédéraux ont validé les mesures en 2026, confirmant que le gisement est homogène et exploitable. Les prélèvements indiquent des teneurs en hélium 3 similaires à celles maximales escomptées sur la Lune.

De la rareté de l'hélium 3

- Les analyses montrent qu'il s'agit d'Hélium 3 qui a été incorporé au moment de la formation de la Terre et qui migre vers la surface.
- L'hélium 3, est incorporé à de l'Hélium 4 qui lui-même, représente 8% du total du gaz extrait.
- Les quantités escomptées du gisement (évaluées par sa pression par exemple) permettent d'escompter plusieurs kilos d'Hélium 3 par an, ce qui est significatif, car la consommation annuelle actuelle d'Hélium 3 n'est que de quelques dizaines de kilos par an (fourni principalement par l'Hélium 3 généré par la désintégration du Tritium lors de la maintenance des armes nucléaires mondiales).

Le Graal des réactions de fusion

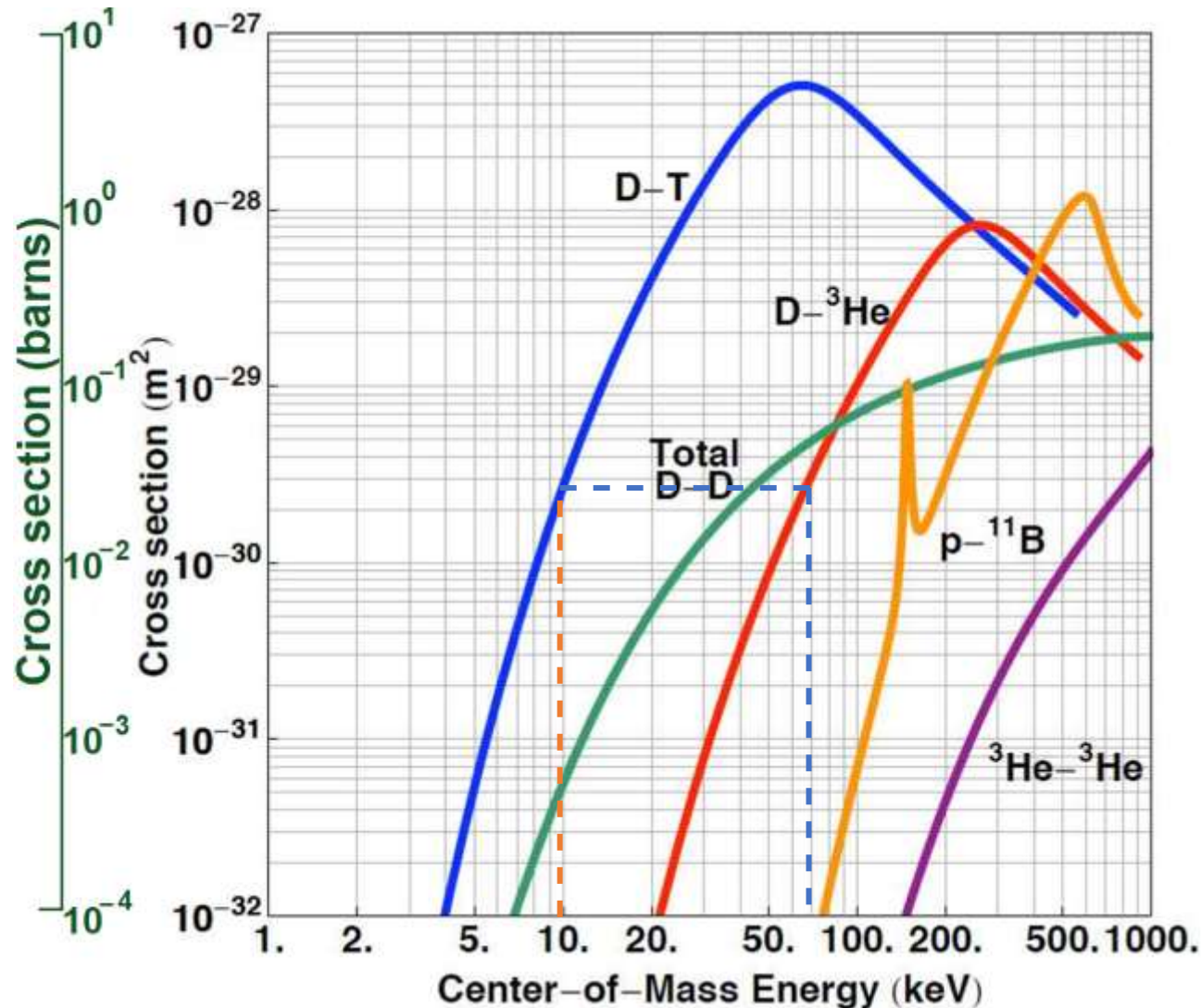
- Les géologues étudient comment cet Hélium 3 originel (piégé au moment de la formation de la Terre estimé à 1 milliard de tonnes) remonte à la surface via des points chauds, par exemple, pour déterminer les sites de forage privilégiés.
- Nota: Dans le site du Minnesota, rien que l'exploitation de l'hélium 4 rend l'opération rentable, l'Hélium 3 est le bonus (18,5 millions de \$ le kilo).
- L'intérêt de la fusion
 - $^3\text{He} + ^2\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + \text{p} + 18.3 \text{ MeV}$,
- qualifiée d'a-neutronique (ne génère pas de neutrons), est que l'énergie cinétique est portée par des protons.
- Malgré cela, des réactions secondaires pourraient produire jusqu'à 5% de neutrons rapides (voire plus selon les avis).

Pourquoi c'est la voie royale

- Tous les éléments en jeu ne sont pas radioactifs.
- Peu de neutrons (dévastateur et générateur d'éléments radioactifs par irradiation) sont émis.
- Ici, comme c'est le proton chargé qui possède une énergie cinétique élevée, il est confiné par le champ magnétique, ce qui évite les blindages lourds des tokomaks destinés à arrêter les neutrons.
- Le transfert de l'énergie utile se ferait, non pas par l'énergie thermique des neutrons (thermique $\rightarrow$ vapeur alimentant une turbine) mais directement par voie électromagnétique (électrique $\rightarrow$ électrique, MHD par exemple) où on peut espérer un rendement plus élevé.

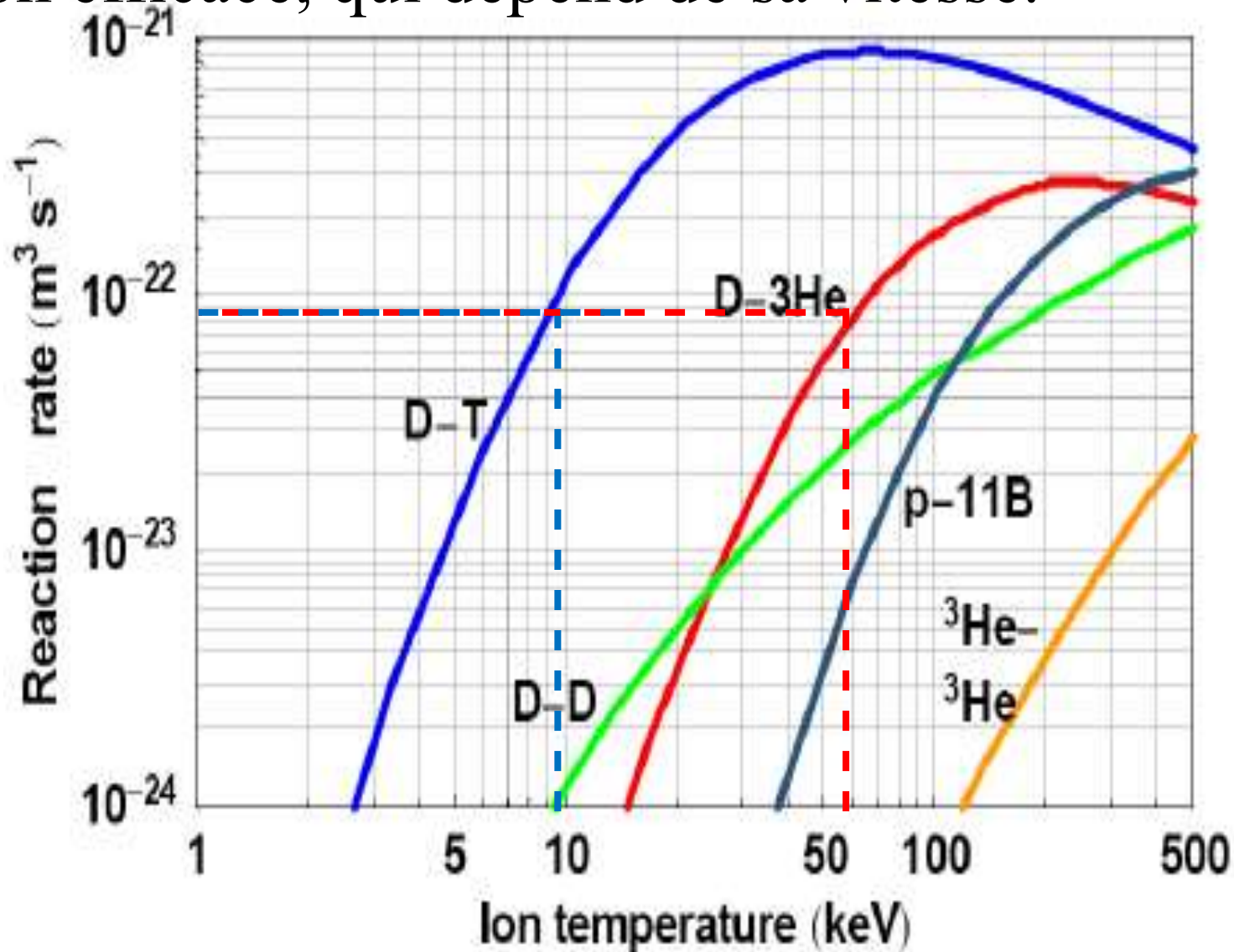
Une réaction plus difficile à établir

- Diagramme donnant la section efficace des différentes réactions.



Une réaction plus difficile à établir

Diagramme du taux de réaction, le flux de plasma traversant la section efficace, qui dépend de sa vitesse.



Des projets en cours

- **Helion Energy, Inc.** est une société américaine dédiée à la fusion nucléaire, située à Everett, dans l'État de Washington.
- Elle n'utilise pas un tokamak ou stellarator mais développe une technologie de fusion magnéto-inertielle cyclique.
- Dans un cycle, on provoque la collision à 300km/s de 2 plasmoides (Un **plasmoïde** est une structure autoconfinée constituée d'un plasma et d'un champ magnétique qui en assure la cohésion.). L'onde de choc élève sa température pour amorcer une fusion fugace.
- La fusion est pulsée. La performance énergétique dépend du nombre de cycles par seconde et de sa durée de fusion.
- La société annonce un prototype délivrant 50MW en 2028.
- Certains scientifiques ont tempéré cet enthousiasme en émettant un certain nombre de réserves sur leur capacité à industrialiser dans avenir proche une telle machine.

Plasmoïde

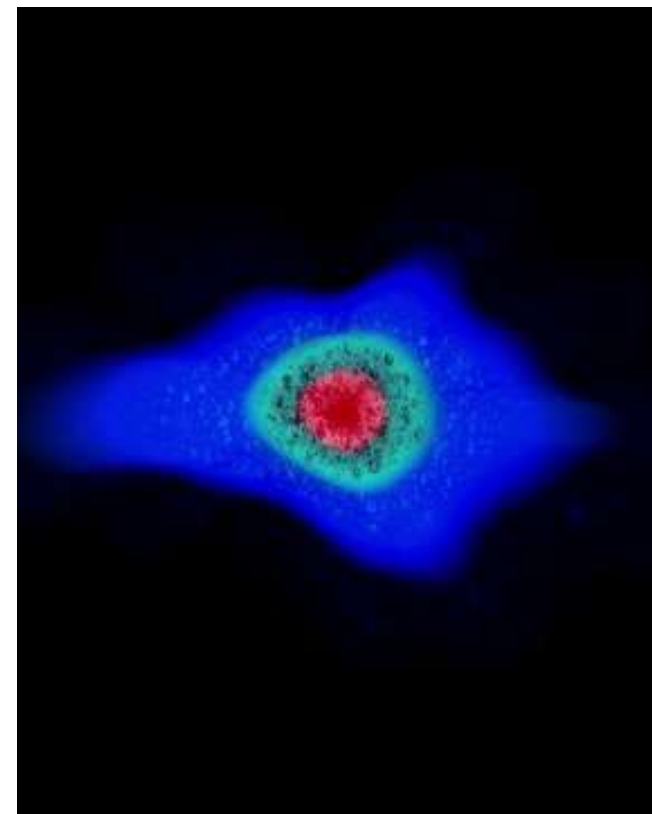
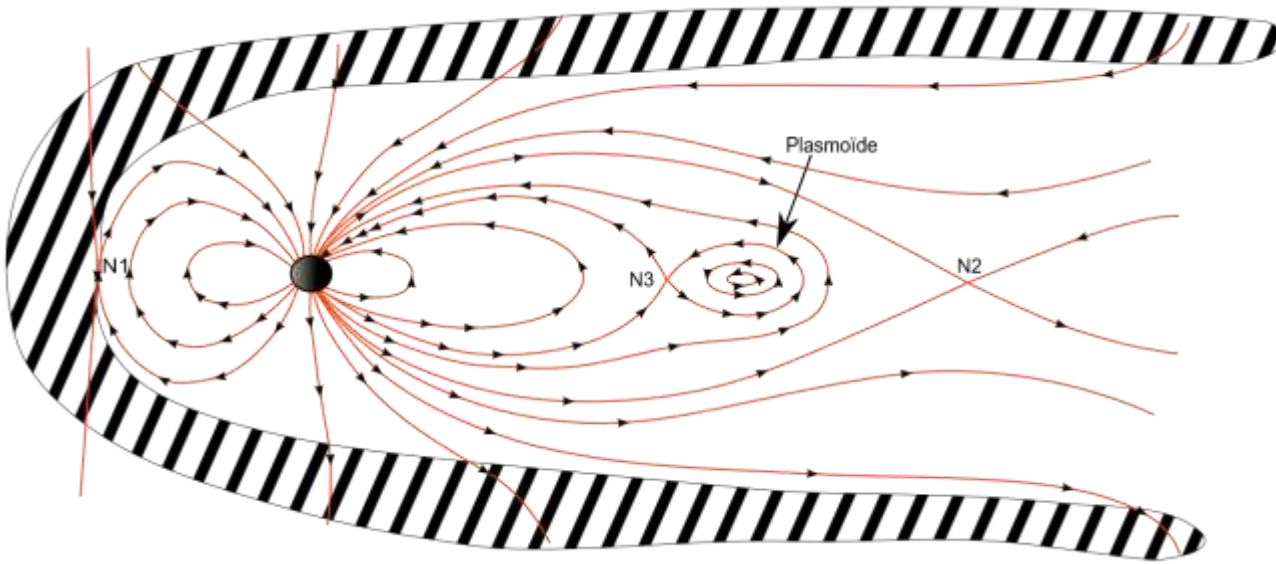
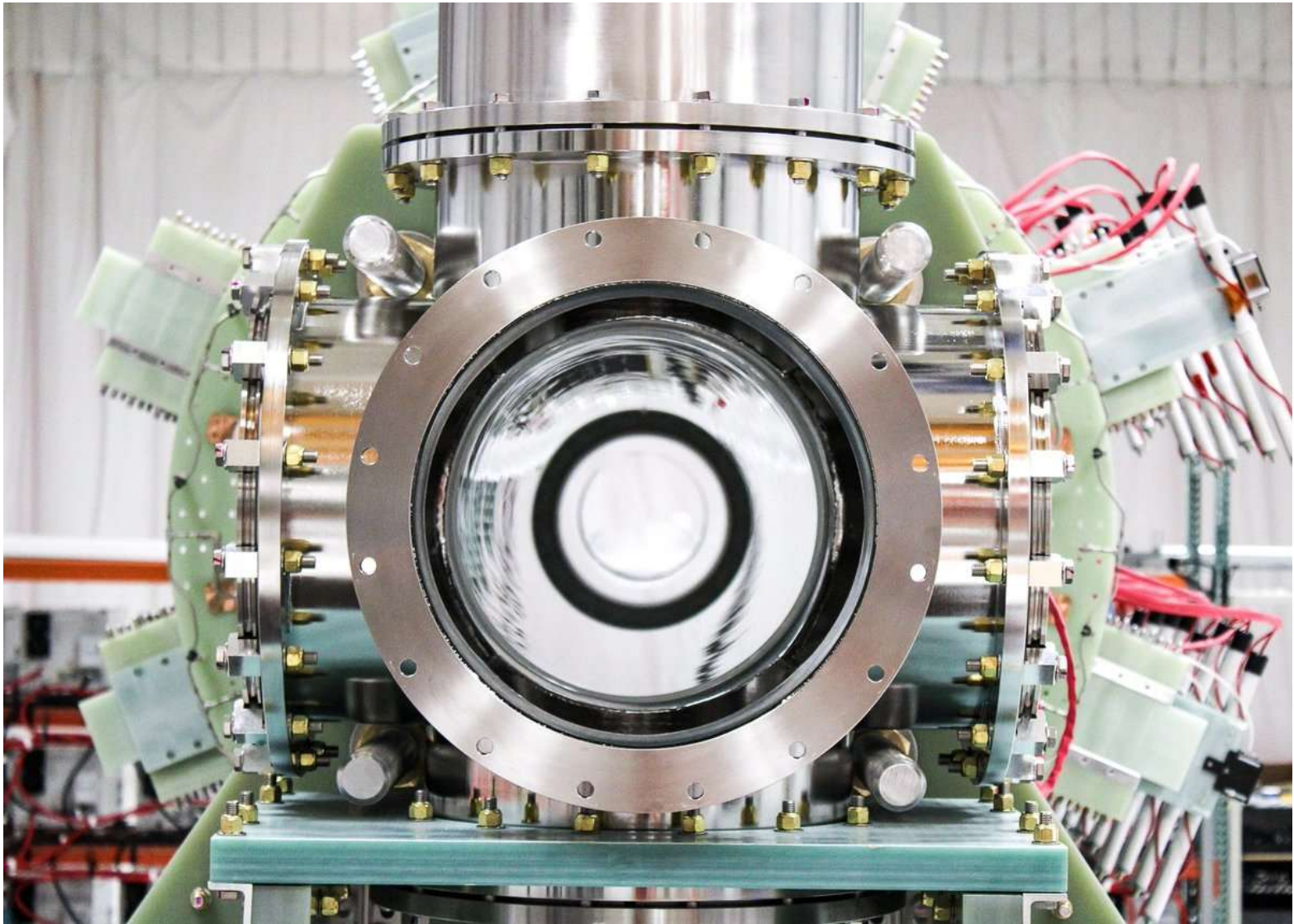


Schéma de plasmoïde naturel produit dans la magnétosphère terrestre

Plasmoïde en laboratoire

Des plasmoïdes sont produits en laboratoire par divers dispositifs, comme les configurations à champ inverse (*Field-Reversed Configurations*), les sphéromaks et les focalisateurs de plasma dense.

Hélium, prototype du futur réacteur



Echelle ?

Trop beau pour être vrai ?:

- Proto Tenta d'Helion Energy (6^{ième} génération, en 2021).
- Densité ionique 3×10^{22} ions/m³, Temps de confinement 0,5 ms, température ionique dépassant 8 keV,
Le critère de Lawson, exprimé par le produit triple $n \cdot \tau \cdot T$, où; n est la densité, τ le temps de confinement et T la température en keV, avec les données ci dessus donne:
$$n \tau T \approx 1,2 \times 10^{20} \text{ keV} \cdot \text{s/m}^3 < 5 \cdot 10^{21} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{KeV} \cdot \text{s}.$$
Ces paramètres sont des valeurs "jusqu'à" (maximales) qui pourraient ne pas être atteintes simultanément.
- Pour Polaris, prototype actuel, depuis 2025: Aucune valeur spécifique n'a été publiée à ce jour.
- Il manquerait un facteur d'environ 40 pour brûler $D + {}^3\text{He}$, car cette fusion est estimée entre 10 à 30 fois plus difficile que $D+T$ et la température est 4 fois trop basse.

Conclusion

- Entre le confinement inertiel, le tokamak, le Stellarator, le projet Helion, etc., différentes solutions sont, simultanément développées, le tokamak ITER étant le ambitieux : générer 500MW utile, mais au prix d'une machine de 23000T pour fusionner 1mg de mélange D-T par seconde.
- Les niveaux de difficulté sont également différents, pour mettre en œuvre la fusion nucléaire contrôlée.
- Pour cela des essais sur la stabilité des plasmas et autres paramètres sont réalisés sur des machines indépendantes dédiées à travers le monde.
- Lequel ou lesquels seront retenus. Ils représentent tous de défis technologiques considérables.

Conclusion

- La production à grande échelle du tritium avec ses contraintes devra être validée. Rappelons qu'aujourd'hui la production mondiale est d'environ 3kg/an.
- En supposant que ces défis soient relevés ce serait presque la solution miracle, pour satisfaire les besoins en énergie de l'humanité, mais sera-t-elle maîtrisée à temps, ce qui n'est pas évident, comme en témoigne la mise en service de ITER, prévue initialement en 2026, qui est actuellement reportée en 2034.
- De toute façon, cela ne dispensera pas l'humanité de maîtriser la consommation d'énergie, car même plus propre, et moins dévastatrice, (pas de gaz à effet de serre), sa production génère beaucoup de chaleur avec ses conséquences.