

# Dompter l'énergie du Soleil

$$E = mc^2$$



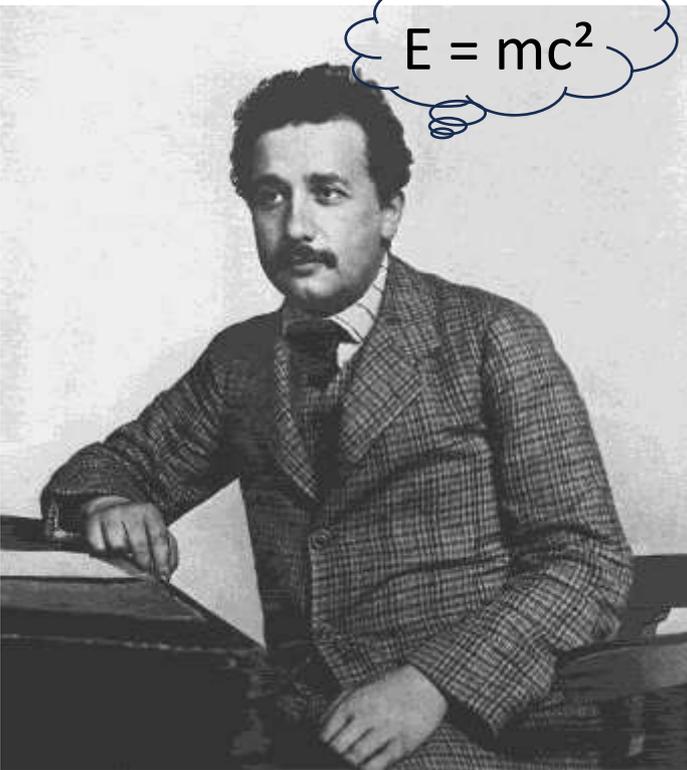
CONFÉRENCE À LA MAISON  
DE L'AMITIÉ, 119 TER  
AVENUE DE LA RÉPUBLIQUE,  
À 17H; LE 11/10/2025

PAR JACQUES FRIC  
DOCTEUR EN HISTOIRE ET  
PHILOSOPHIE DES SCIENCES  
PARIS-CITÉ

ENTRÉE (ET SORTIE) LIBRE

Jacques FRiC- Société Astronomique de Montgeron: le 11/10/2025

# $E = Mc^2$



Peu, après la publication de son article fondateur en 1905 sur la relativité restreinte que peu de personnes avaient compris, dans la même année,

Einstein publie un deuxième article où il présente cette équation, (valide dans le référentiel de la matière).

Cette équation révèle que la matière contient une énergie (potentielle) gigantesque qu'on n'avait jamais imaginé.

Reste à savoir comment l'exploiter.

# De la puissance des théories

Les théories physiques sont des modèles “mathématiques” pour décrire les lois de la “nature” qu’on observe.

Par exemple la mécanique céleste a fait l’objet de différentes théories. Du modèle géocentrique antique au modèle héliocentrique plus moderne.

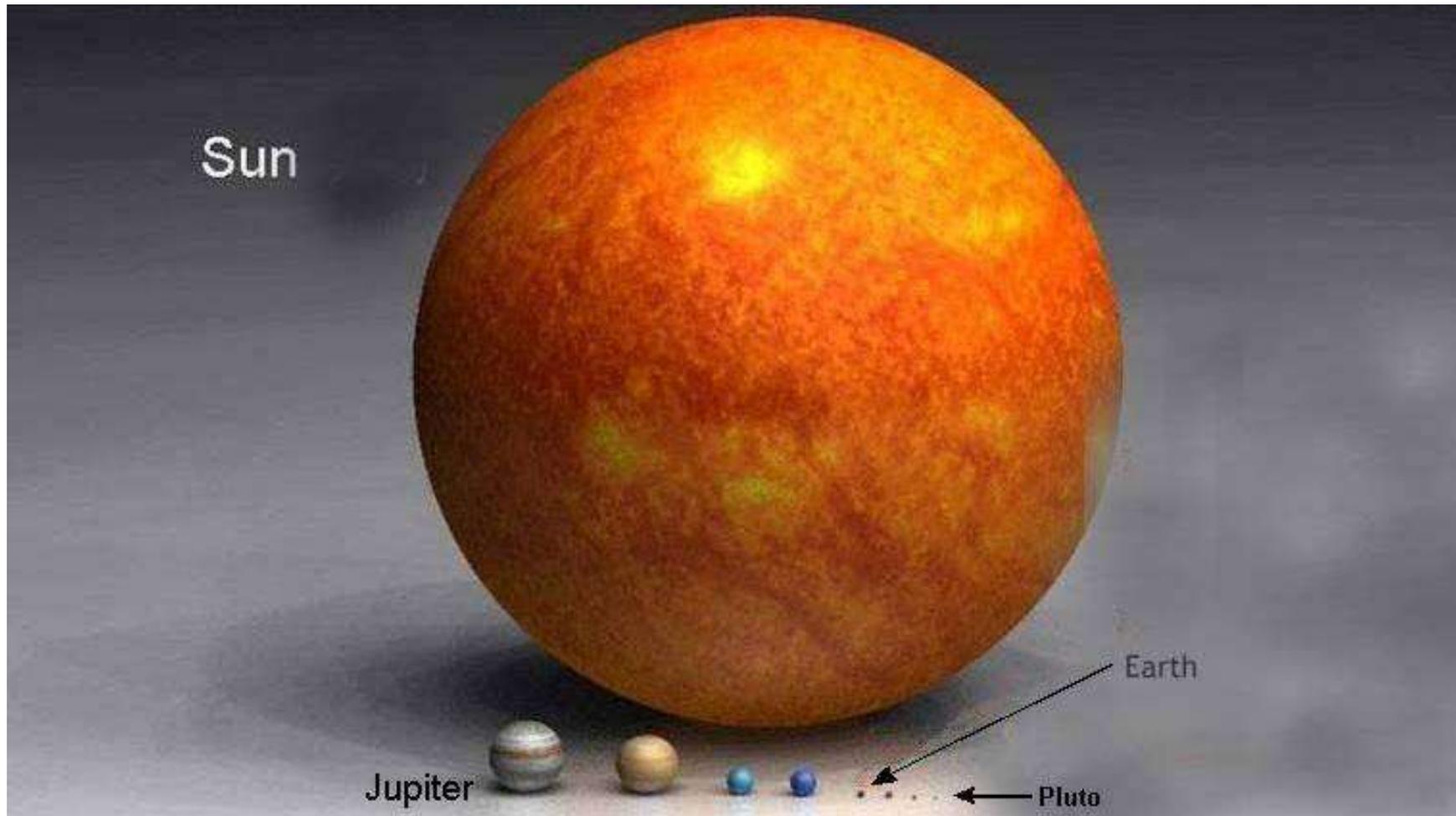
Mais certaines théories sont bien plus performantes: En plus d’expliquer ce qu’on observe, elles prédisent des phénomènes qu’on n’imaginait même pas!

$E = mc^2$  est une conséquence de la relativité restreinte et ce n’est pas la seule, puisque cette théorie prédit aussi l’antimatière et le spin de l’électron.

# 1<sup>ère</sup> Partie

## La fusion nucléaire à l'œuvre dans le Soleil

**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 (hydrogène) dont le cœur est en fusion. Sa taille est gigantesque, son rayon vaut 100 fois celui de la Terre.

# Mystère de l'énergie du Soleil

Quelle est la puissance du Soleil lui-même ?

Combien de temps brillera-t-il, avant d'épuiser son carburant?

Quel carburant utilise-t-il ?

Depuis quand transmet-il son énergie ?

Au début du 19<sup>ième</sup> siècle, on a naturellement envisagé le charbon, mais cela ne lui assurait que quelques milliers d'années.

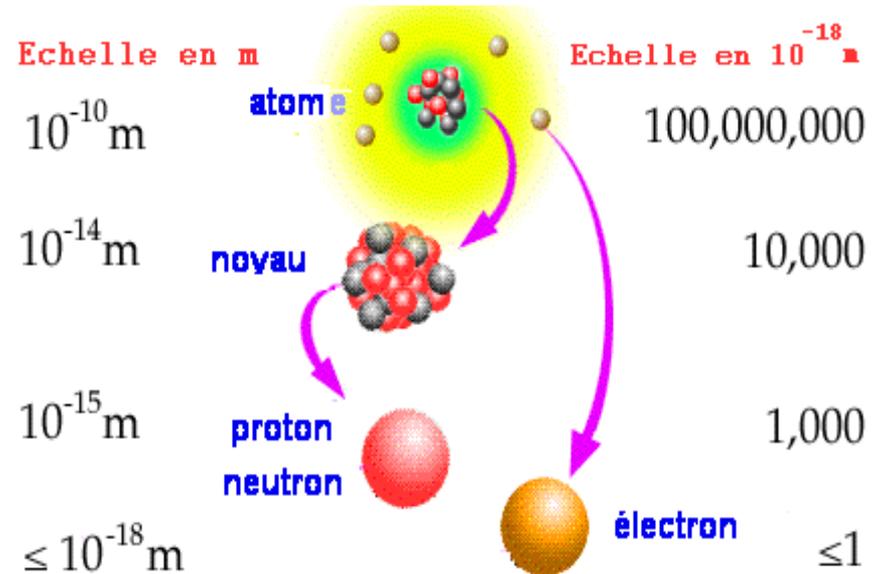
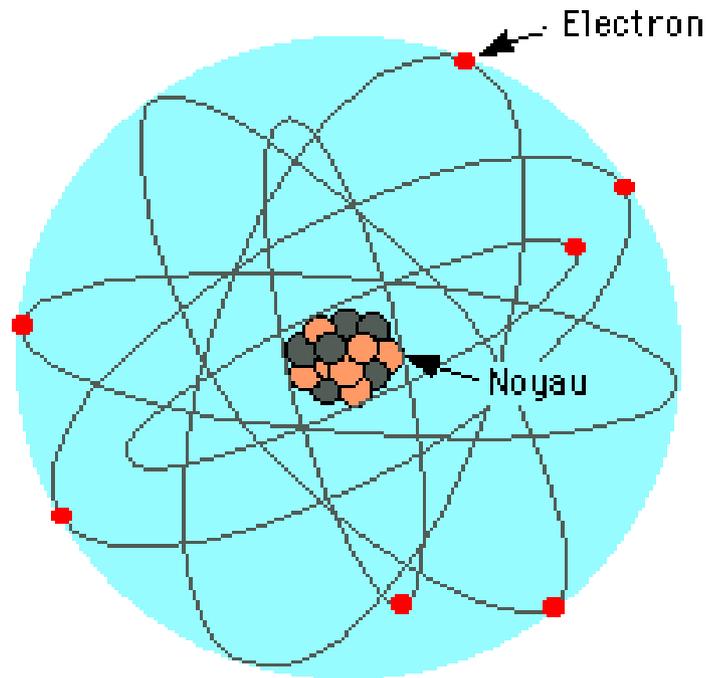
# Mystère de l'énergie du Soleil

**La radioactivité a ensuite été découverte :**

Elle a permis d'estimer, que la Terre a plusieurs milliards d'années, un âge beaucoup plus grand que celui donné par Helmholtz, et que cette source d'énergie interne au noyau de l'atome, nouvellement découverte, pourrait correspondre aux besoins du Soleil.

On a d'abord envisagé la fission, mais plus tard, la composition chimique du Soleil a conduit à retenir la fusion.

# Les atomes



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.

# Le noyau de l'atome

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

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.

# Cohésion du noyau de l'atome

La cohésion du noyau résulte donc 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.

**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.**

# 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.

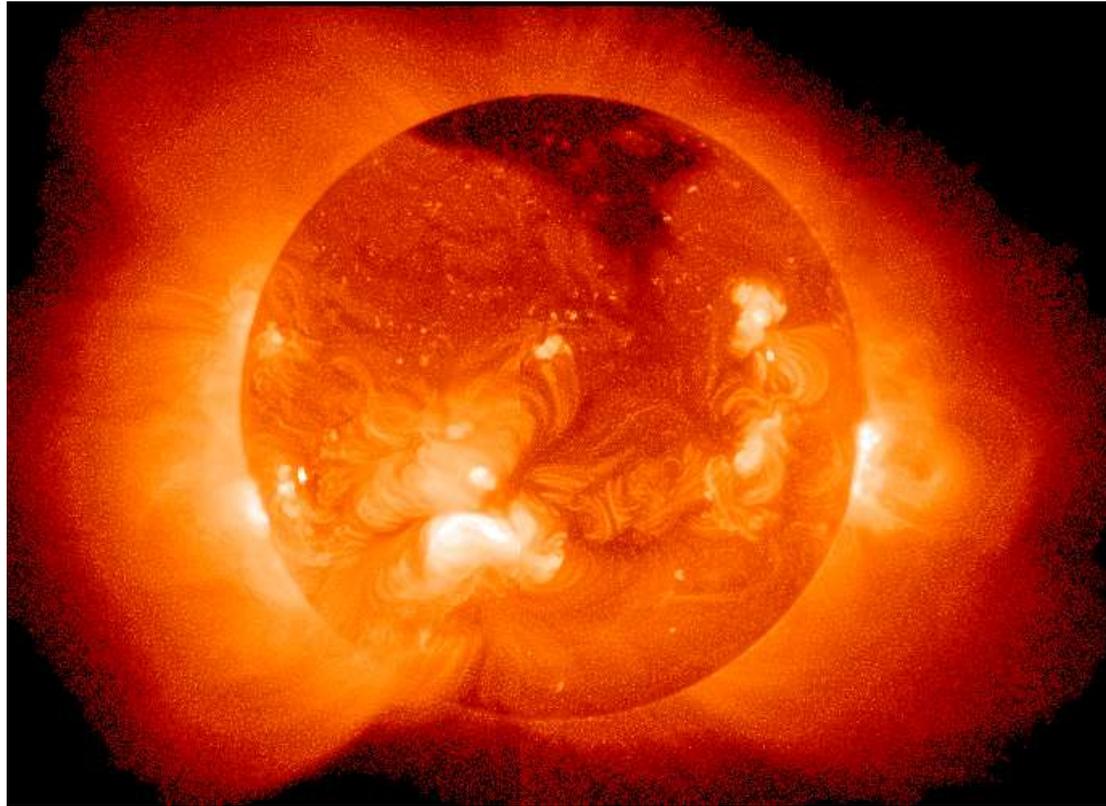
La fusion de noyaux légers dégage d'énormes quantités d'énergie provenant de la liaison des nucléons.

# La fusion (thermo)nucléaire

Elle est, avec la fission, l'un des deux principaux types de réactions nucléaires appliquées.

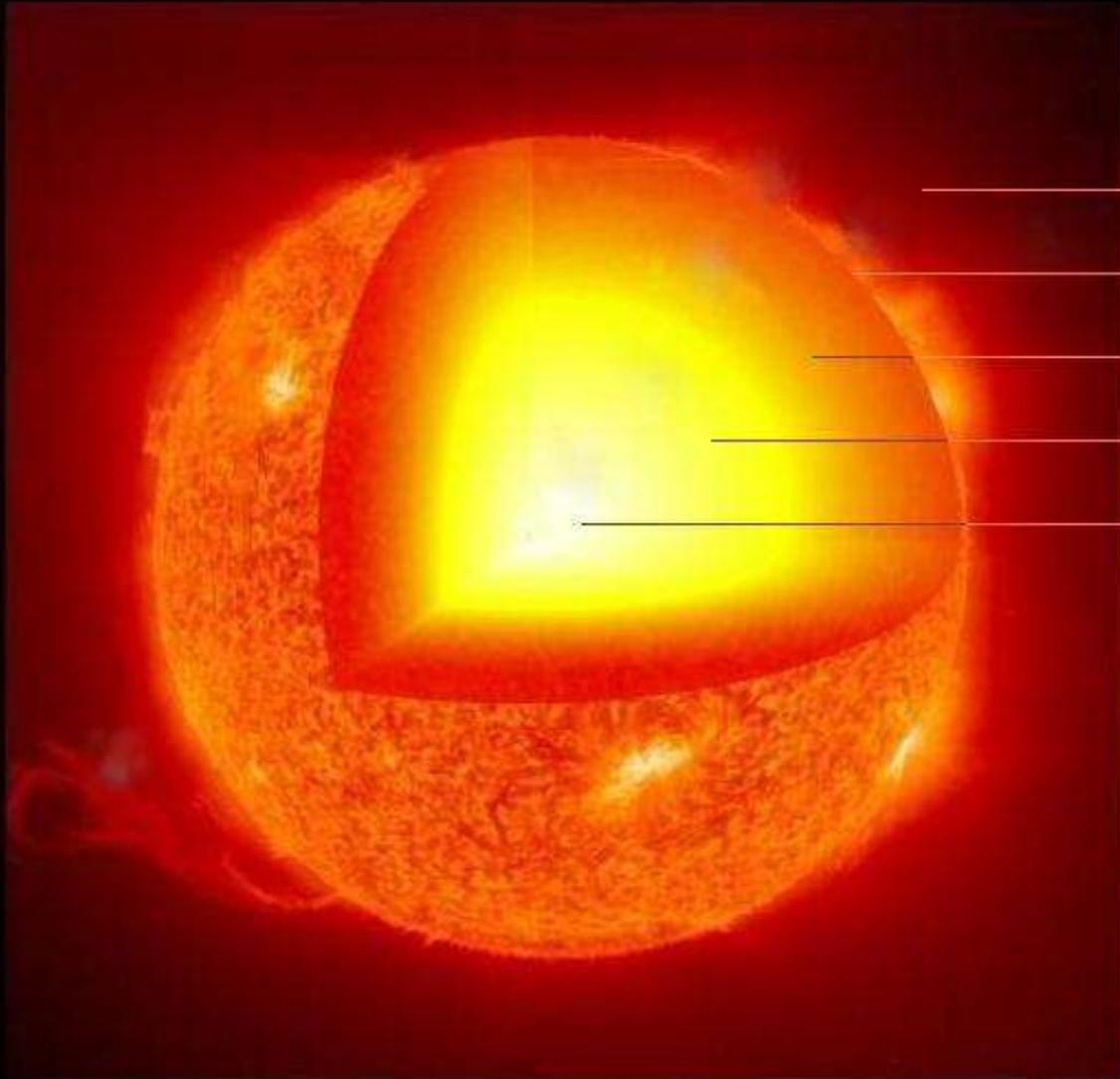
Un de ses intérêts est de pouvoir produire théoriquement beaucoup plus d'énergie (de 3 à 4 fois plus), à masse de « combustible » égale, que la fission et environ 1 million de fois plus que celle des réactions chimiques (faisant intervenir la couche des électrons) comme, par exemple, la combustion du charbon.

# La fusion nucléaire source d'énergie du Soleil



Le Soleil, siège de nombreuses réactions de fusion nucléaire.

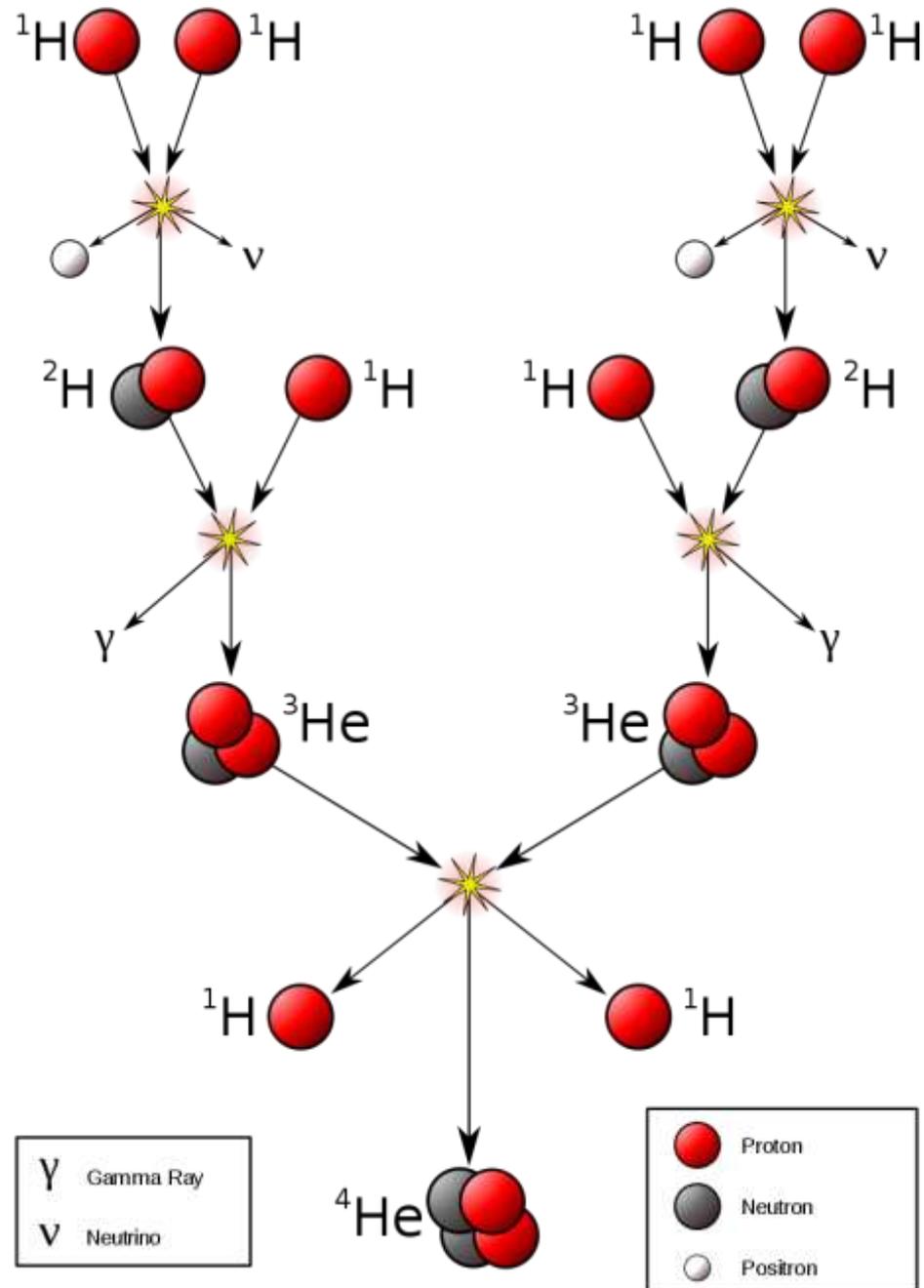
# La structure interne du Soleil



## Structure du Soleil en coupe

- Couronne solaire
- Photosphère
- Zone de convection
- Zone de radiation
- Cœur (ou noyau)

# Réactions nucléaires du Soleil



Réaction principale

# La diffusion des photons

- Les réactions nucléaires produisent (entre autres) des photons de très haute énergie (plusieurs MeV).
- La majorité des photons émis sont dans le visible: 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.
- On estime que le temps de transit de l'énergie d'un photon 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.

# 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 cet écart n'est pas très important, comme en témoigne le fait que l'Hélium 2 (2 protons seulement) n'est pas stable.

Heureusement il y a les neutrons.

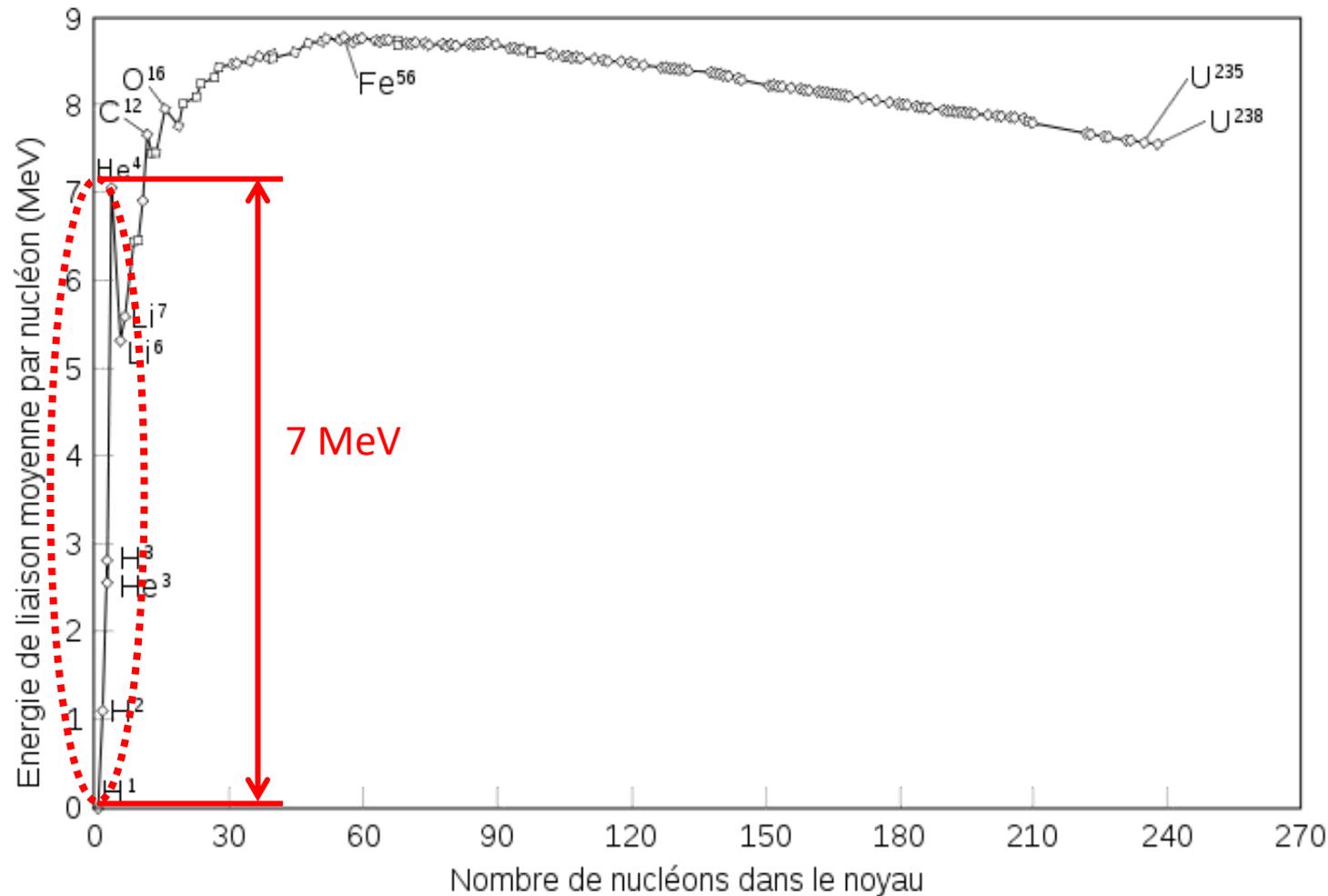
# Réactions nucléaires du Soleil

## 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. C'est cette énergie qui va être libérée lors de la fusion. C'est environ 10 millions de fois plus qu'une réaction chimique de combustion.

# 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 qui tend à le dilater 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 °C

# Une combustion poussive

Du fait de sa faible température ( $15 \cdot 10^6$  °K) au cœur, les réactions nucléaires ont du mal à se produire.

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 :

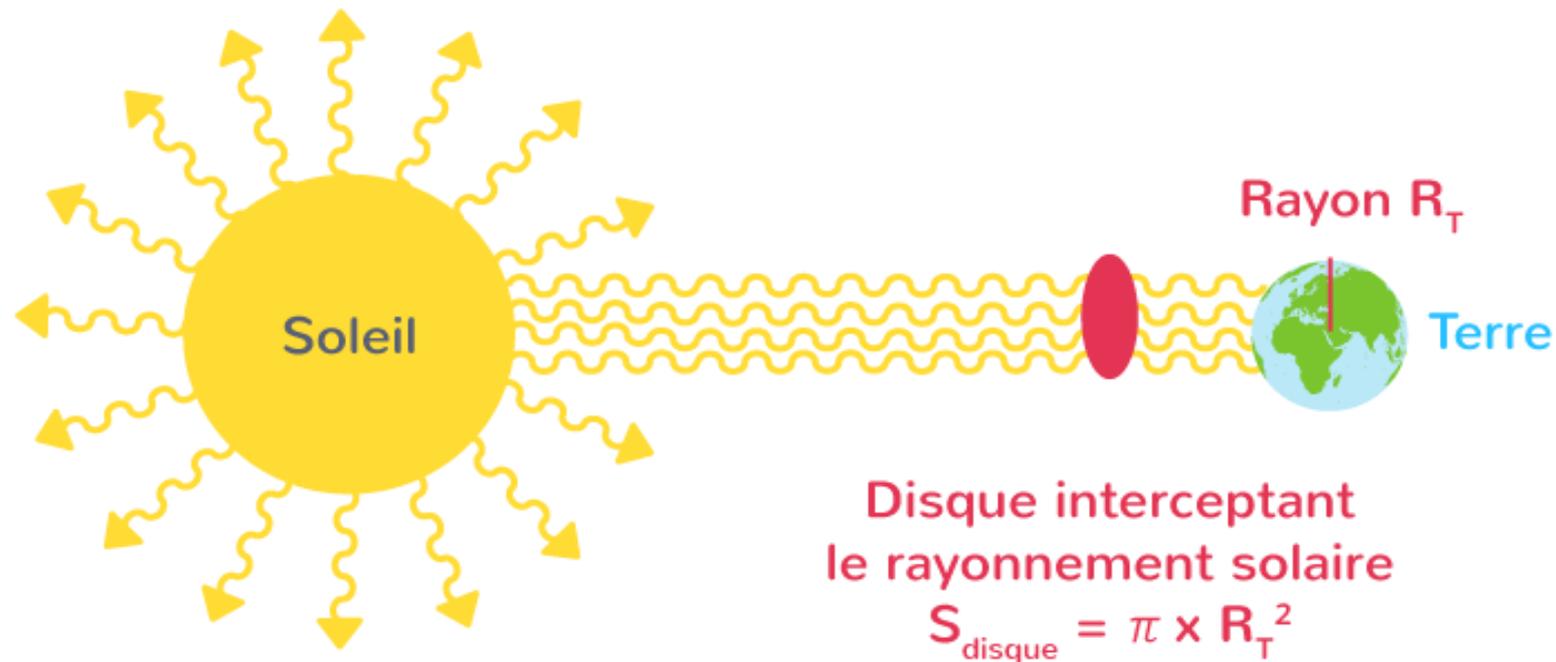
$3,85 \cdot 10^{26}$  watts,

385 000 000 000 000 000 000 000 000 000 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.



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<sup>er</sup> 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<sup>ième</sup> 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)



Ben Arthaud - Les Éditions Stratégiques

## Electricité solaire sur Terre: éoliennes



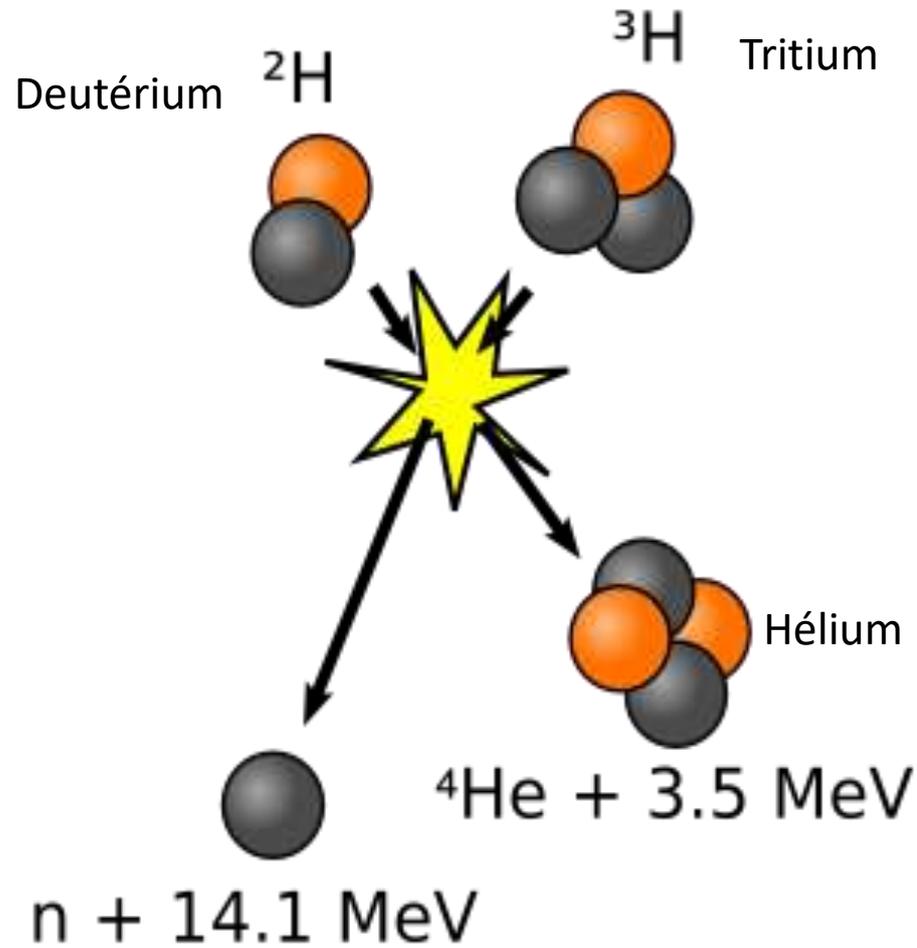
## 2<sup>ième</sup> Partie

Maitriser la fusion pour  
produire de l'électricité

# Réaliser la fusion nucléaire sur Terre

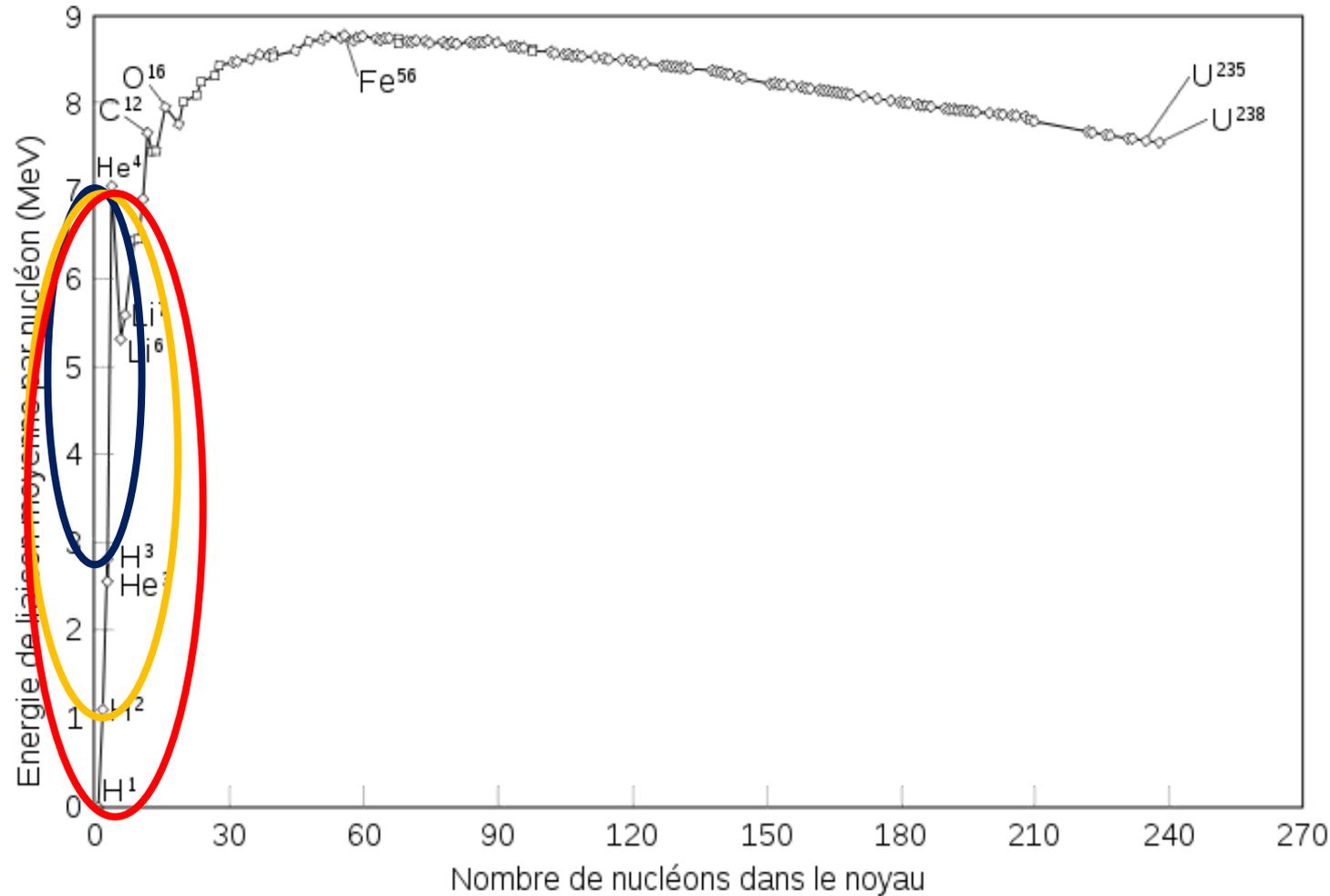
- La réaction  ${}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H}$  à l'œuvre dans le Soleil est très performante mais nécessite une masse gigantesque pour être entretenue à température de 15 millions de degrés Kelvin.
- Dans des machines terrestres la quantité de matière à fusionner est infinitésimale par rapport à celle du Soleil et pour être entretenue nécessiterait des températures de l'ordre de grandeur du milliard de degrés Kelvin.
- C'est pour cela qu'on s'oriente d'autres réactions, moins performantes mais moins exigeantes en 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.

# 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 150 millions de degrés environ, pour amorcer la fusion, et que le réacteur nucléaire puisse supporter cette température.
- 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

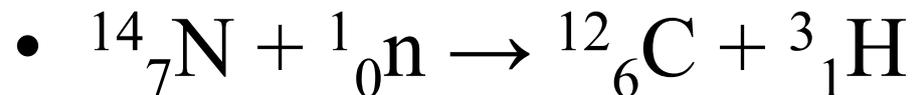
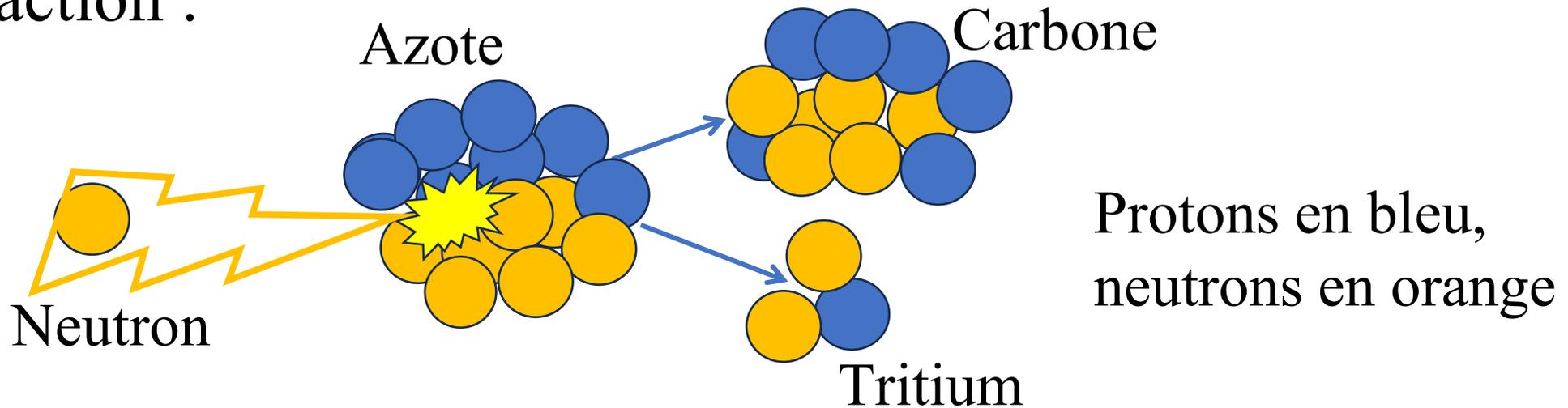
- De très grandes quantités d'énergie sont libérées par le processus de fusion nucléaire.
- **Pouvoir reproduire ce phénomène sur Terre permettrait en théorie de satisfaire pour longtemps les besoins énergétiques de l'humanité.**
- C'est précisément l'enjeu majeur de la recherche sur la fusion nucléaire « 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, 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.

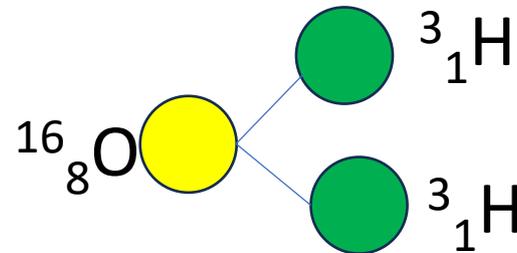
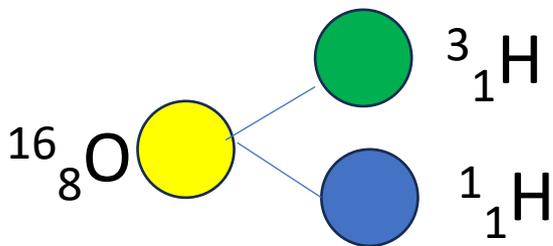
# Les combustibles utilisés:-2 le Tritium

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



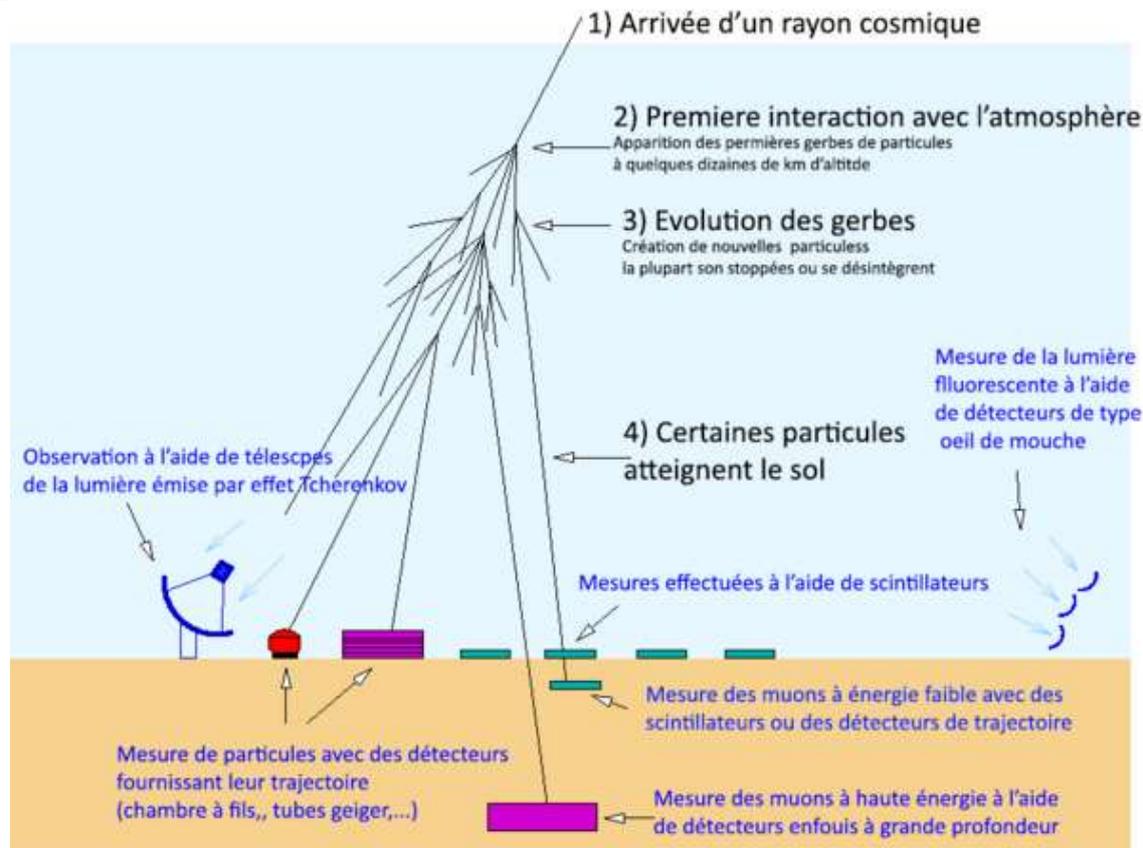
# Les combustibles utilisés:-2 le Tritium

- 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.



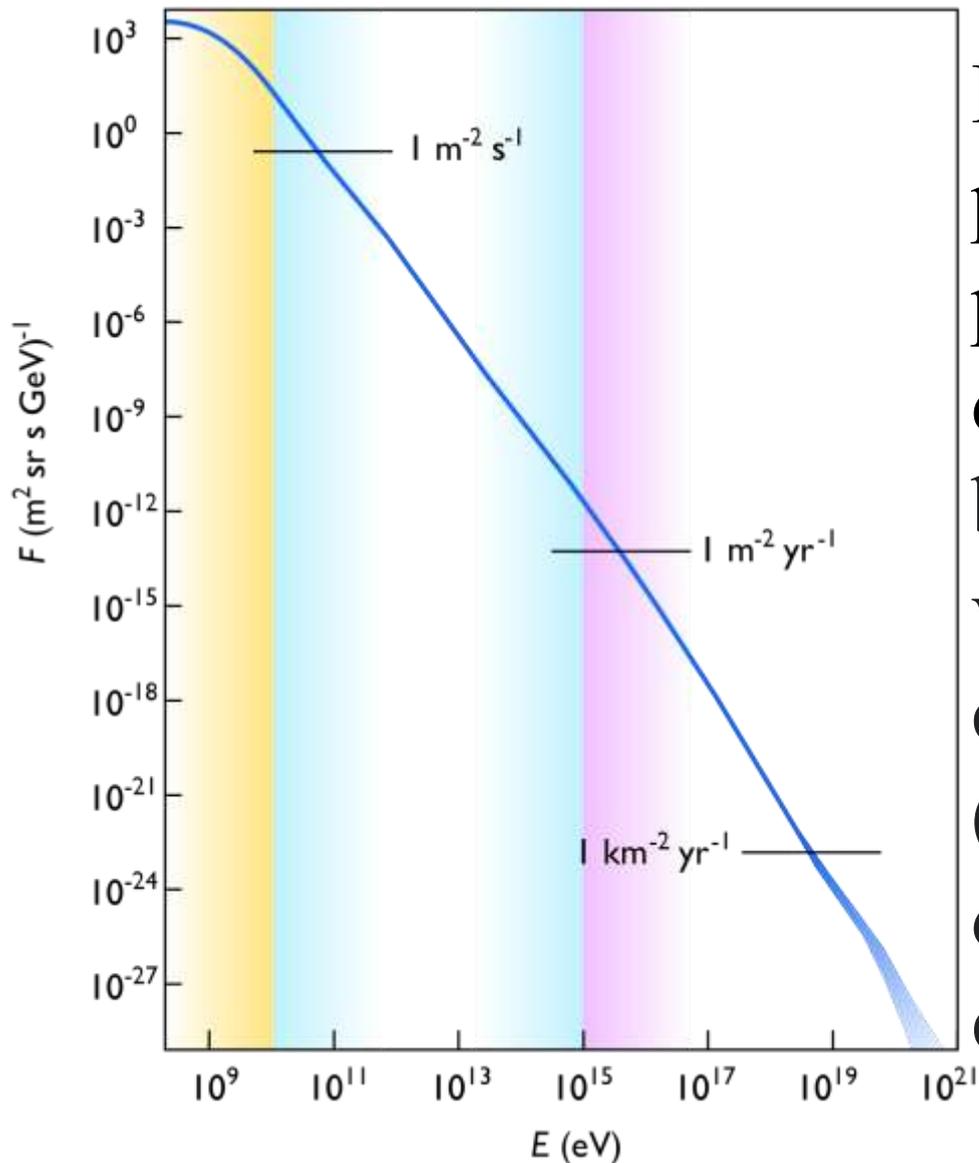
- Plus léger que l'air, il n'atteindrait jamais le sol autrement. Ainsi dispersé et aussi rare, on conçoit qu'il soit inexploitable.

# 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.

# Energie et flux des rayons cosmiques

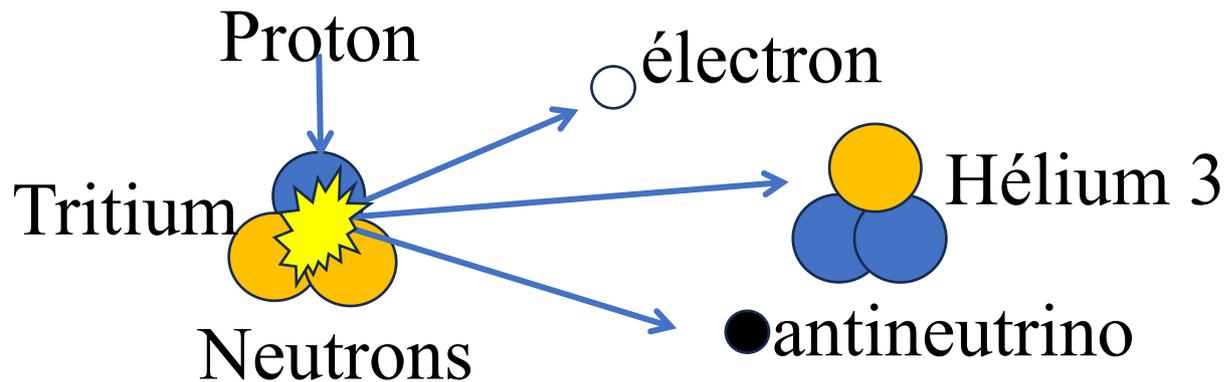


Les rayons cosmiques sont principalement constitués de protons, de neutrons, de noyaux d'hélium. Les particules de basse énergie (zone jaune) viennent surtout du Soleil, celles d'énergie intermédiaire (bleu) de notre galaxie, et celles de haute énergie (violet) sont extragalactiques.

# Les combustibles utilisés:-2 le Tritium

## Désintégration du tritium

- Le tritium se désintègre, avec une période de 12 ans, par la relation suivante :



- Radioactivité de type  $\beta$  (émission d'un électron).
- Radioactivité du tritium absorbé par un humain 0, 01  $\mu\text{Sv}$ , radioactivité naturelle 0,3 mSv (30 000 fois plus).
- Prix du Tritium 30 000 \$ le gramme (prix de l'or 130 \$/g) .

# Les combustibles utilisés:-2 le Tritium

- Le **tritium naturel étant inexploitable**, on le produit par les centrales nucléaires par **irradiation 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<sub>2</sub>O).
- 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, mais , il en faut très peu, et il sera autoproduit dans les réacteurs à fusion nucléaire (ITER)

# Historique de la recherche

- Des efforts de **recherche** sont menés depuis plus de 50 ans pour recréer les conditions de la fusion nucléaire 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 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, 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 irradient 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.

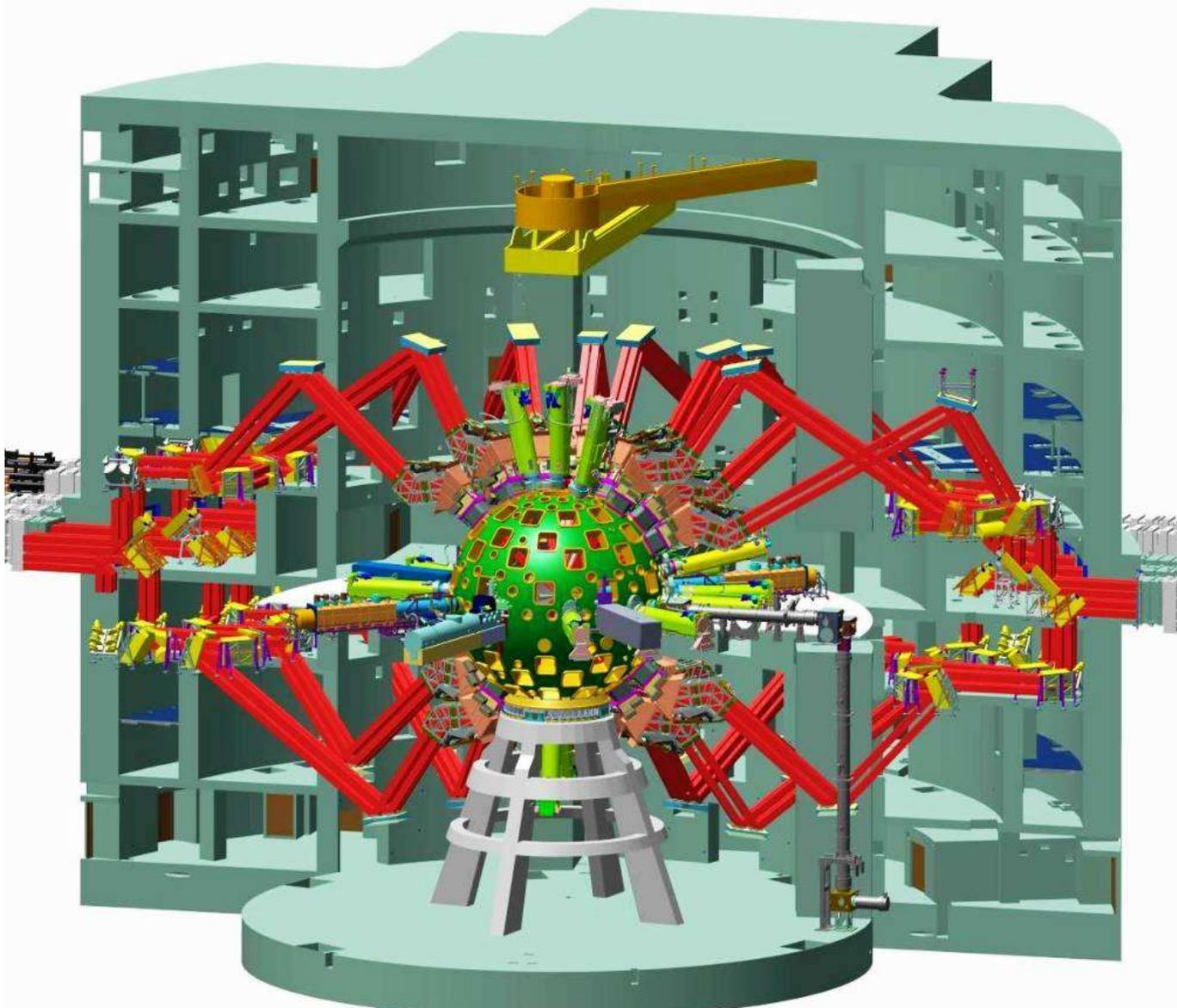
# 1-Le réacteur à confinement inertiel

- 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).

# Le réacteur à confinement inertiel

- **Le laser mégajoule**, installé au centre CEA/CESTA<sup>(8)</sup>, 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.

# 1-Le réacteur à confinement inertiel : laser mégajoule



## 2-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  $3000^{\circ}\text{C}$ ).
- Le plasma de deutérium et de tritium (électriquement chargé, sensible au champ magnétique) est **confiné** (ne touche pas les parois qu'il ferait fondre) **par un champ magnétique intense** généré par des aimants situés autour de la chambre et par un fort courant électrique circulant dans le plasma.

## 2-Le réacteur à confinement magnétique

- La fusion s'amorce dès que la température, la densité et le temps d'isolation thermique du mélange atteignent les seuils critiques d'allumage (100 millions de degrés).
- A noter que pour une fusion plus efficace une température de 150 millions de degrés est souhaitable.
- 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.

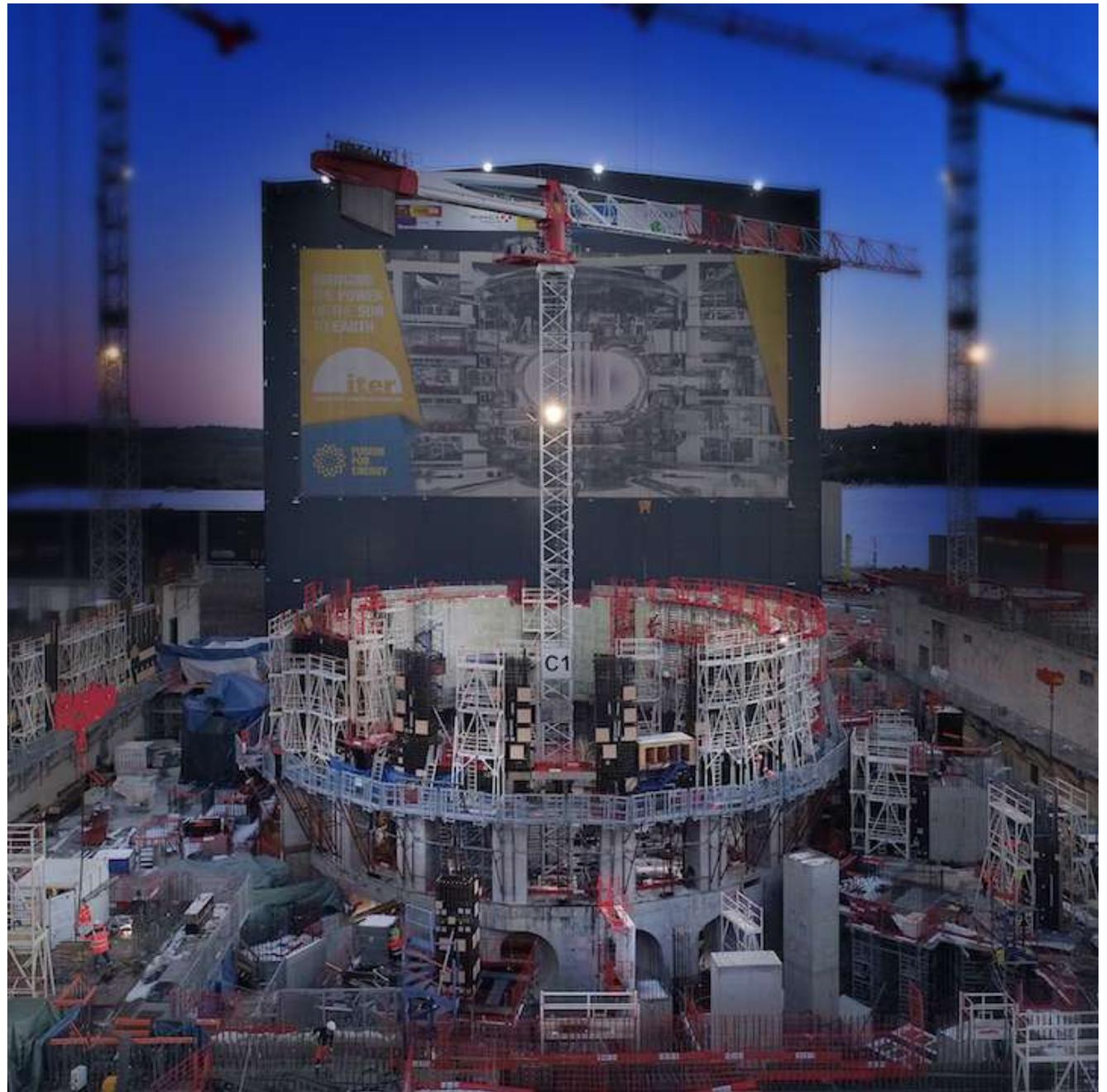
# Le réacteur à confinement magnétique

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 doit notamment produire 500 MW de puissance de fusion pendant 400 secondes !

# 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.



# Le projet ITER

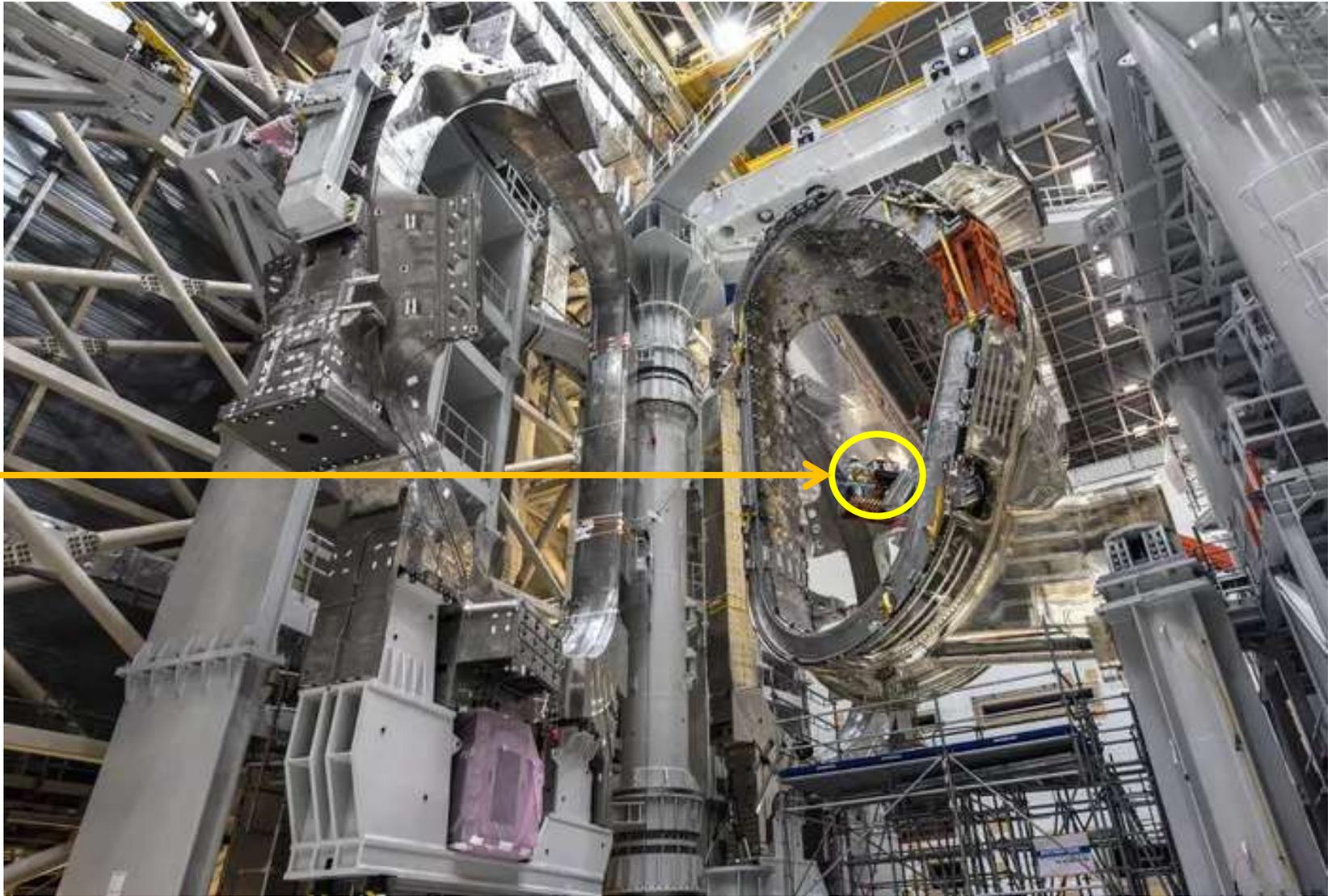
- À une quarantaine de kilomètres au nord d'Aix-en-Provence, l'installation ITER occupe 180 hectares, concédée par la France à l'organisation internationale ITER Organization.
- La plateforme centrale (42 hectares) compte une quarantaine de bâtiments, dont celui qui abrite le tokamak en cours d'assemblage.



# 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.

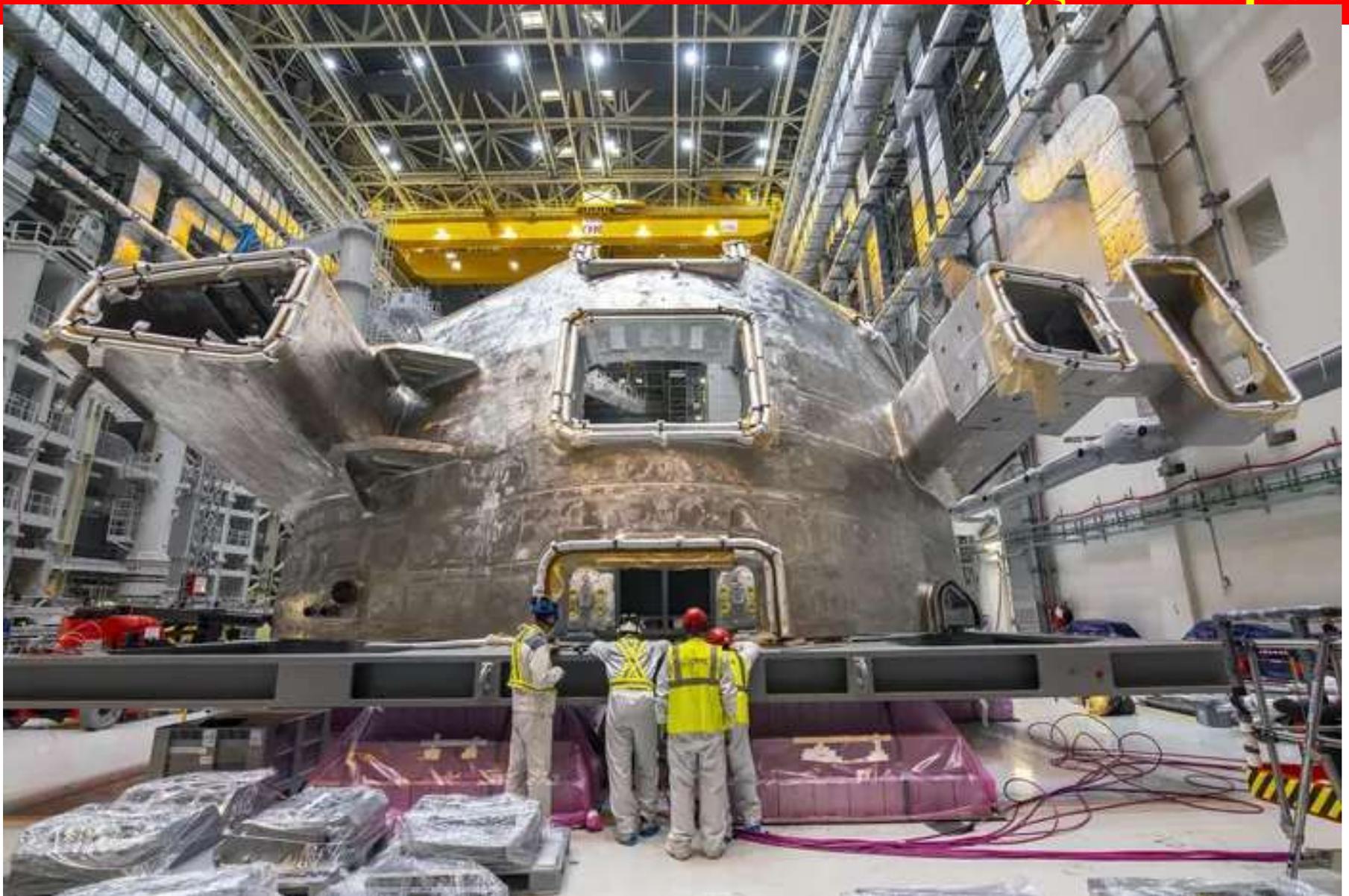
# Le réacteur à confinement magnétique



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.

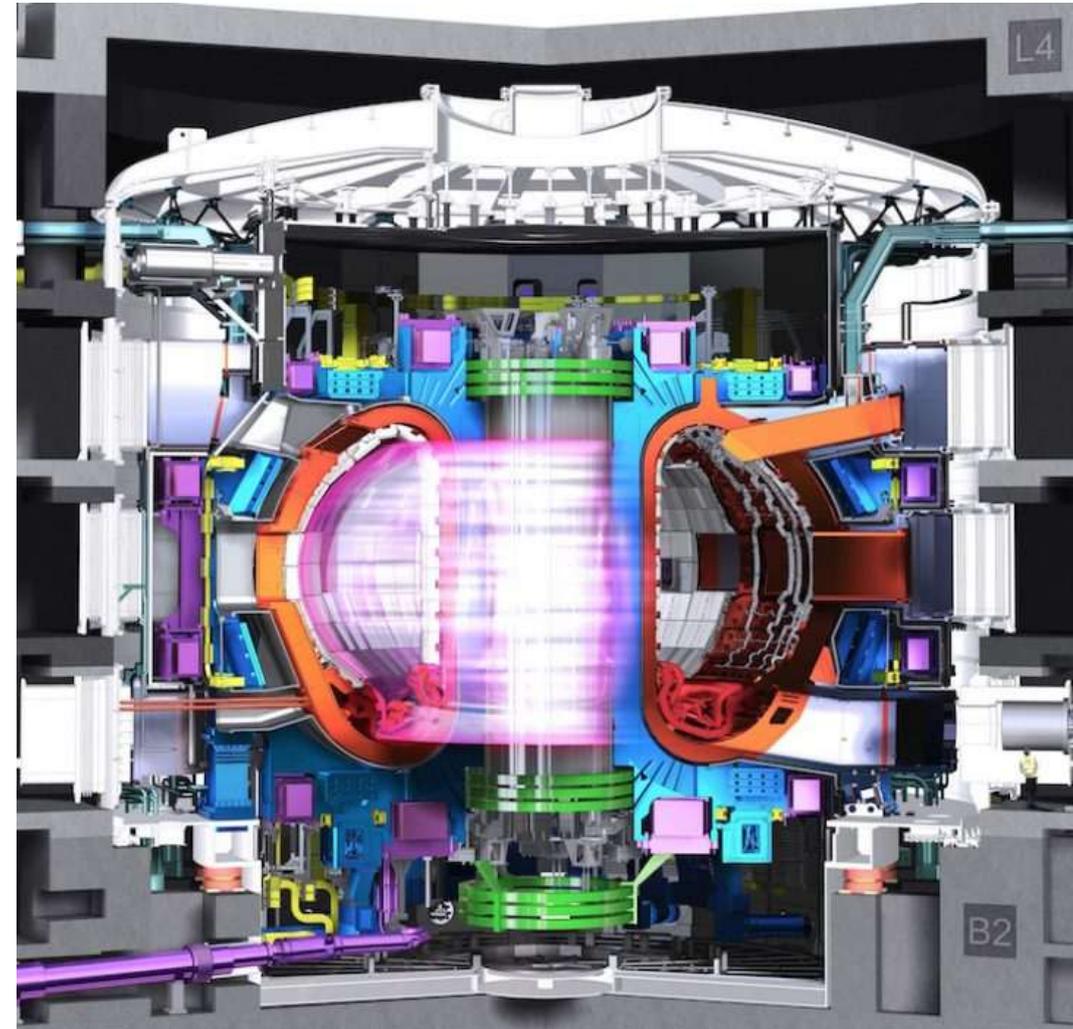
# Le réacteur à confinement magnétique



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  $1400\text{m}^3$ .
- 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 participe 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.
- 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  $10 \text{ MW/m}^2$

## Le rôle des neutrons énergétiques

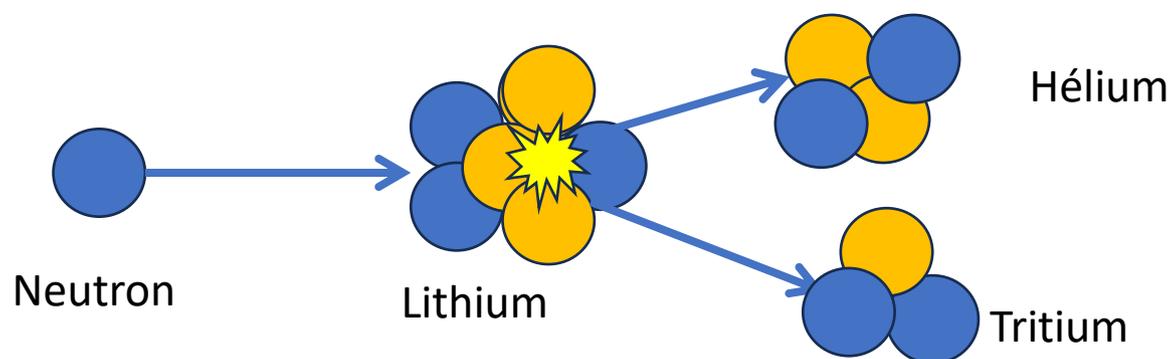
- Si l'énergie des particules alpha produites par les réactions de fusion est confinée dans le plasma de cœur par le champ magnétique et permet de maintenir le plasma en combustion, **celle portée par les neutrons doit être récupérée dans les parois, non seulement pour chauffer l'eau qui fera tourner 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.

# Production 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

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

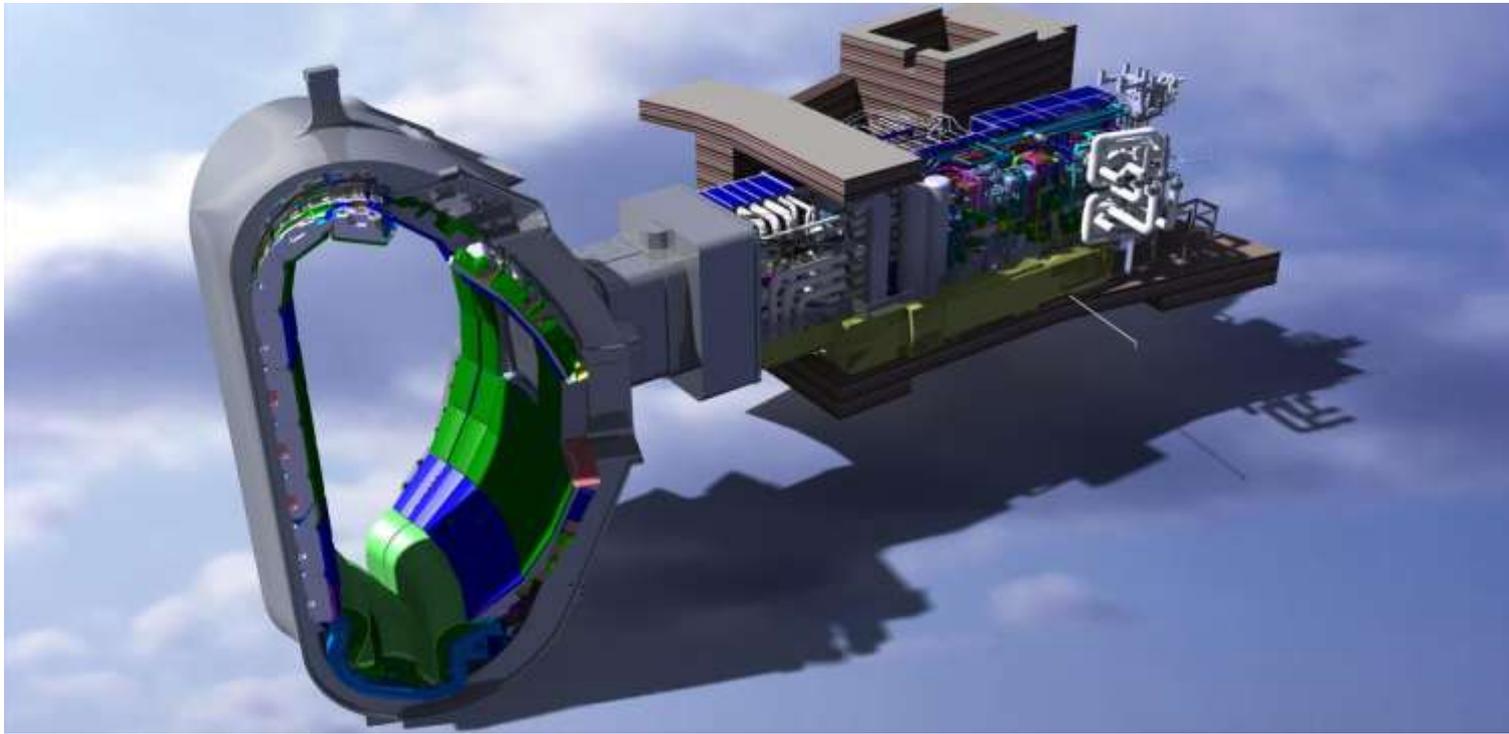


En bleu les neutrons, en orange les protons. La section efficace vaut :  $\sigma = 940$  barns. La probabilité de réaction est relativement élevée.

# Production du tritium

- On appelle « couvertures tritigènes » les couvertures qui contiennent du lithium.
- 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.
- Des recherches supplémentaires seront nécessaires pour démontrer la production et le recyclage de tritium à grande échelle.

# 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 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 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 généralement comprise entre 0,45 et 0,83 m, pour bloquer les 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 écologiques

- La fusion génère peu de déchets radioactifs, en plus de courte durée de vie, et 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 écologiques

- Un procédé plus sûr.
- Elle **écartere tout risque d'emballement** de la réaction nucléaire et donc toute menace d'explosion.
- Contrairement au procédé de fission nucléaire, la moindre perturbation au sein d'un réacteur à fusion par confinement magnétique entraînerait un refroidissement puis un arrêt spontané des réactions de fusion.

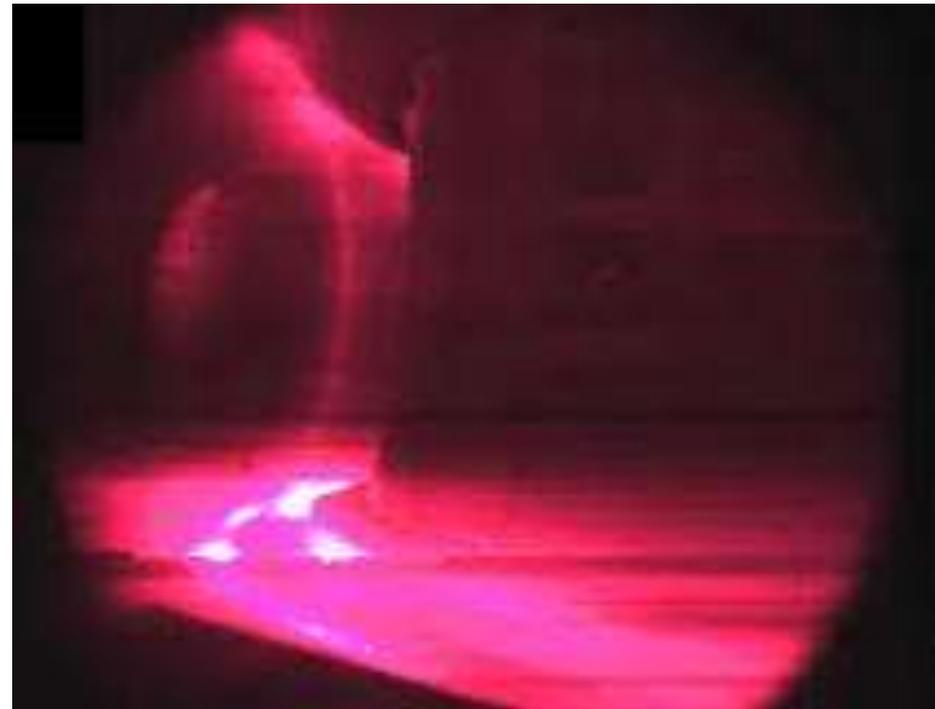
# Les avantages économiques

- 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 MWe aurait ainsi besoin de 125 kg de deutérium et de 3 tonnes de lithium (contre 2,7 millions de tonnes de charbon pour une centrale thermique de même puissance) pour fonctionner toute une année.

# 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, il y a quelques semaines.



# Conclusion

- Presque la solution miracle, pour satisfaire les besoins en énergie de l'humanité, mais sera -t-elle maîtrisée à temps?
- 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.

**A DEMAIN, ESPÈRONS LE ...**

