

Energie nucléaire

Quelques éléments de physique

Relation masse-énergie

Relativité restreinte (Einstein 1905):

Système de masse m possède au repos une énergie:

$$E=mc^2$$

S'il y a des échanges avec l'extérieur (au repos):

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

Si $\Delta m < 0$, le système fournit de l'énergie

Si $\Delta m > 0$, le système reçoit de l'énergie

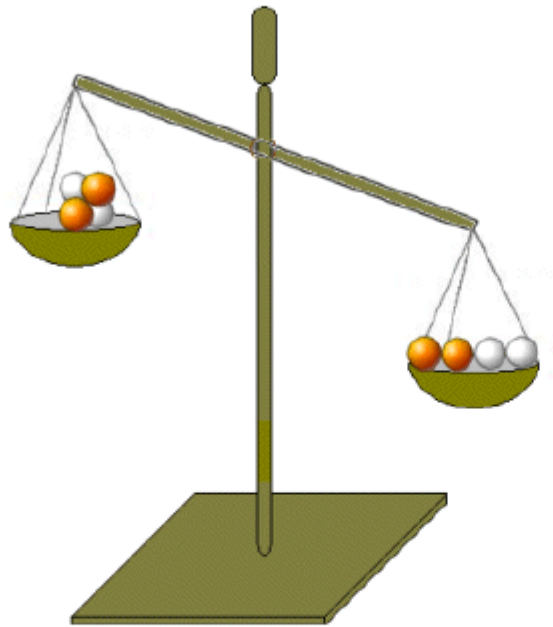
c gigantesque ($3 \cdot 10^5$ km/s) !!!

Défaut de masse

Pour le noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$:

Masse du noyau :

$$m_n = 6,6647 \times 10^{-27} \text{ kg}$$



Masse des constituants :

$$= 2 m_p + 2 m_n$$

$$= 2 \times 1,6726 \times 10^{-27} + 2 \times 1,6750 \times 10^{-27}$$

$$= 6,6952 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Le défaut de masse est égal à $\Delta m = 0,0305 \times 10^{-27} \text{ kg}$

$$\Delta m = m_{\text{constituants}} - m_{\text{noyau}} = Z.m_p + (A - Z).m_n - m_{\text{noyau}}$$

$$\Delta m > 0$$

Défaut de masse d'un noyau

Expérience: masse d'un noyau < somme des masses de ses constituants (neutrons et protons):

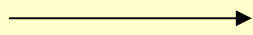
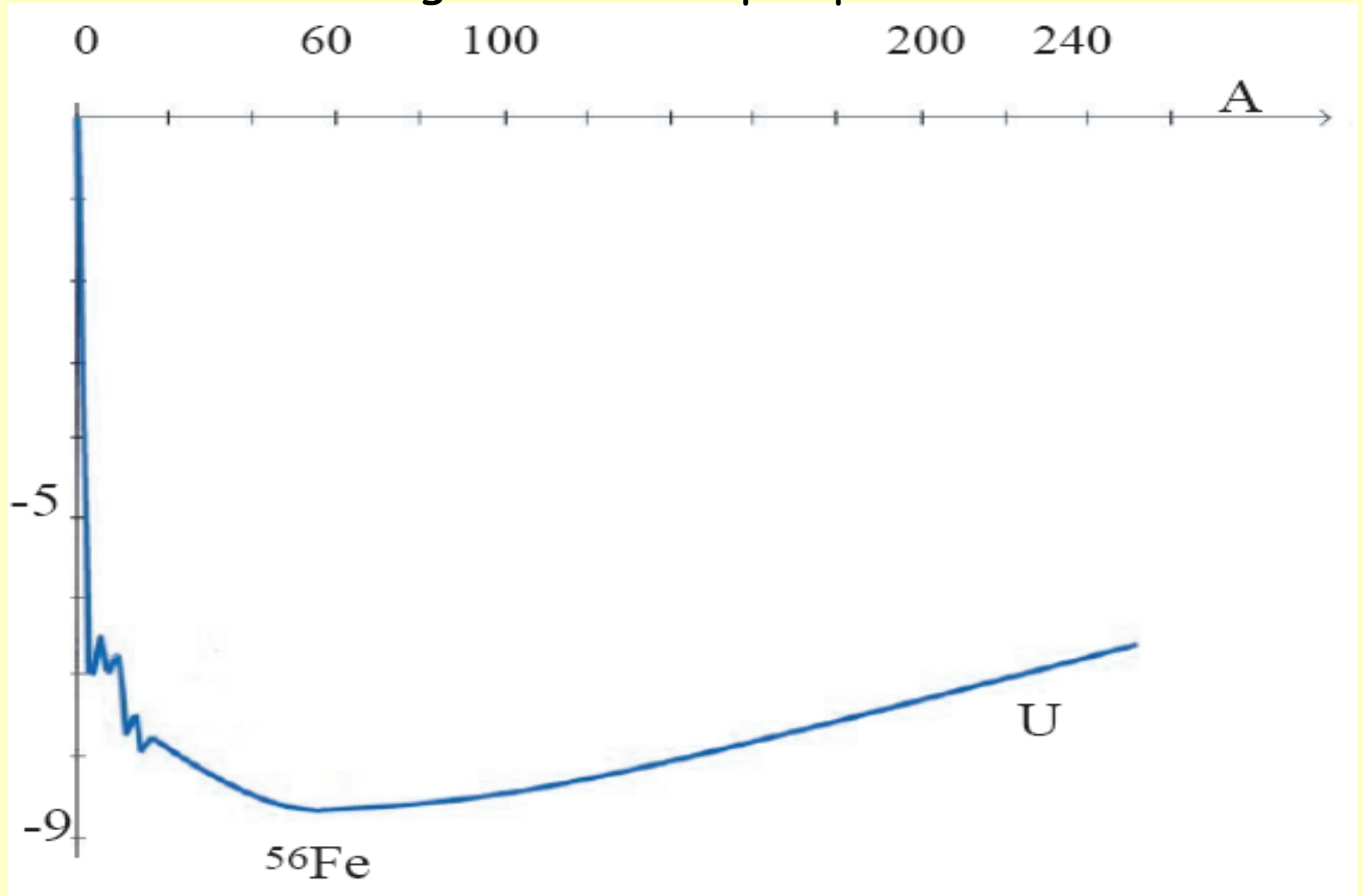
$$\Delta m = m_{\text{noyau}} - Z m_p - N m_n$$

Energie de liaison: énergie qu'il faut fournir pour séparer un noyau en ses constituants:

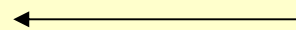
$$E_B = \Delta m c^2$$

Energie de liaison par constituant: E_B / A $A=N+Z$

Energie de liaison par particule



Fusion



Fission

Exemples

E/A

^2H (deuteron): 1.1 MeV

^3H (tritium): 2.8 MeV

^3He : 2.6 MeV

^4He : 7.07 MeV

^{58}Fe : 8.792 MeV

^{62}Ni : 8.794 MeV

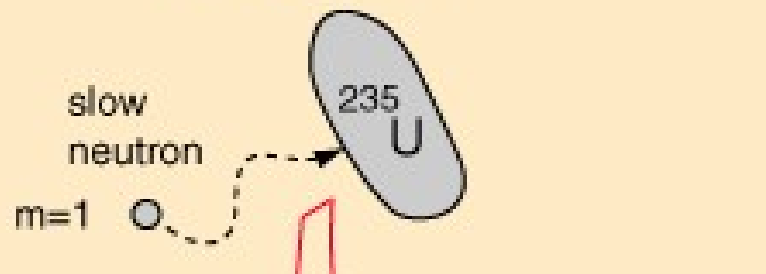
^{235}U : 7.590 MeV

Fusion

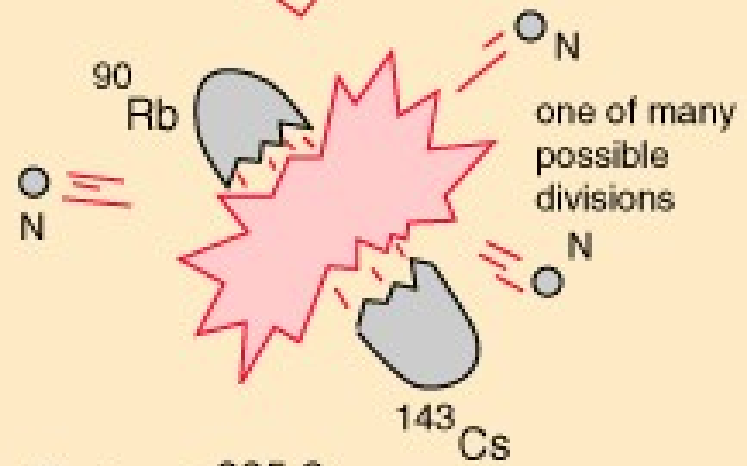
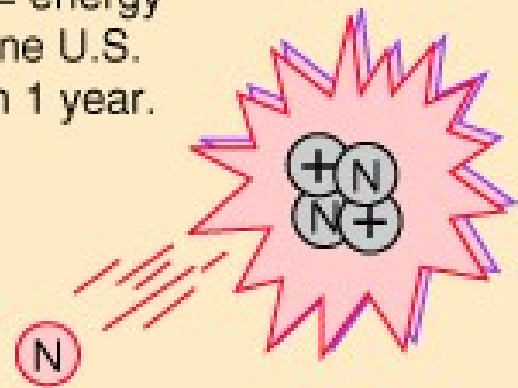
Fission

FUSION

FISSION



1 UNIT = energy use of one U.S. citizen in 1 year.



Conversion to energy per kg fuel

$$E = (.02)c^2$$

676 units

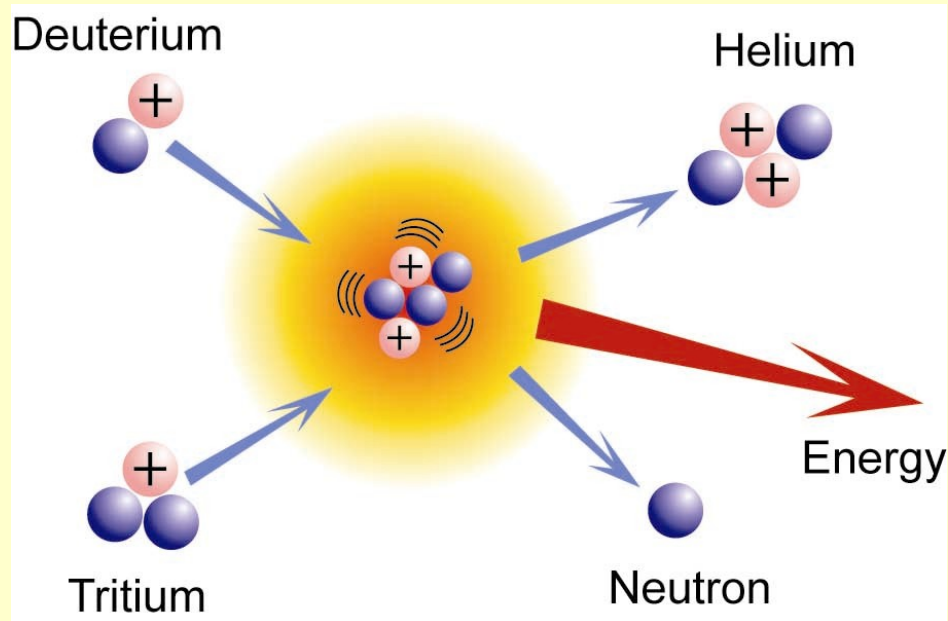
$$E = (.2)c^2$$

176 units

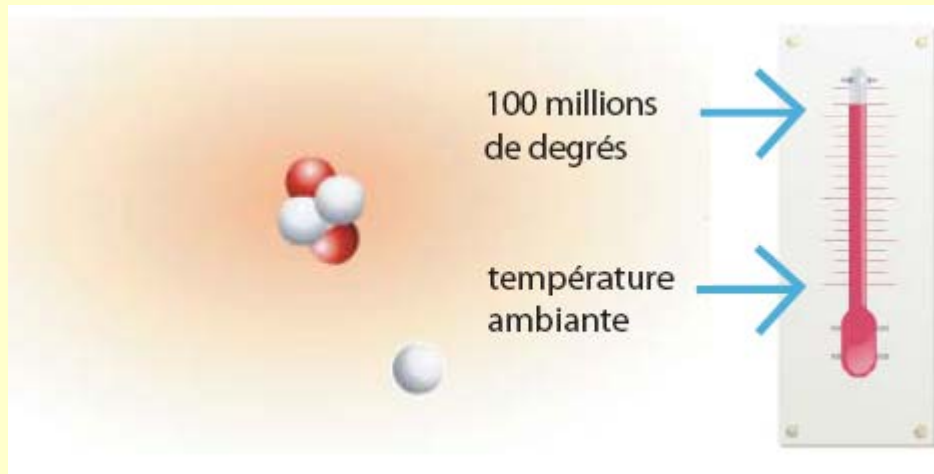
$$3,38 \cdot 10^{14} \text{ J/Kg}$$

$$8,8 \cdot 10^{13} \text{ J/Kg}$$

Fusion nucléaire



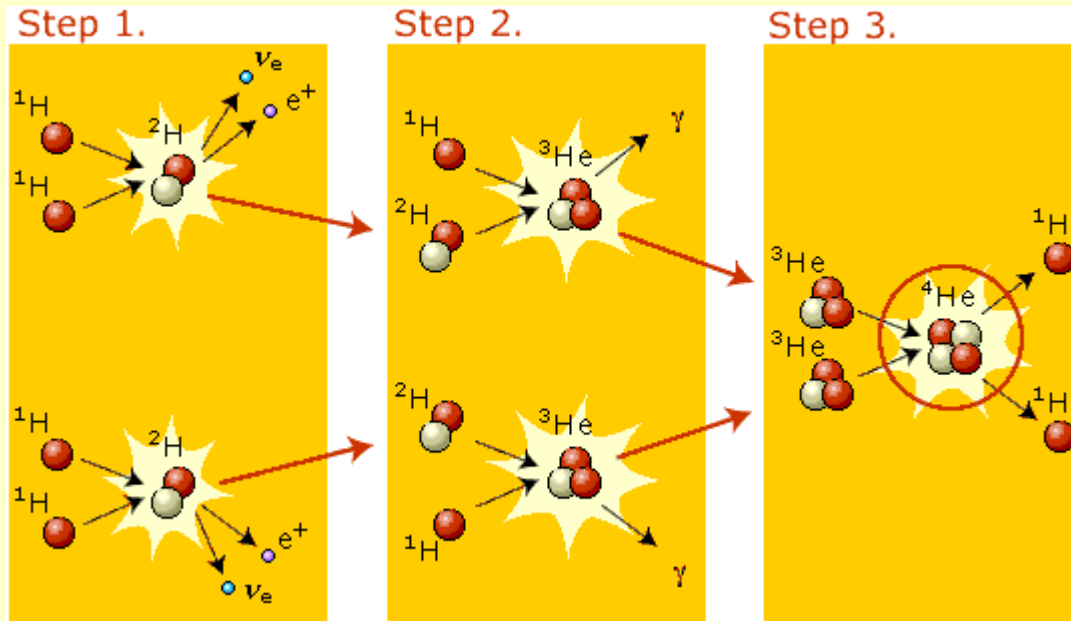
Réaction la plus favorable: fusion des deux isotopes lourds de l'hydrogène



Problème: il faut rapprocher deux noyaux chargés positivement

Il faut les porter à très haute température!

Dans le soleil



Réactions de fusion en 3 étapes:

centre du soleil ($0.2 R_S$)

énorme T° et pression (gravité et masse
du soleil)

Sur terre: ITER

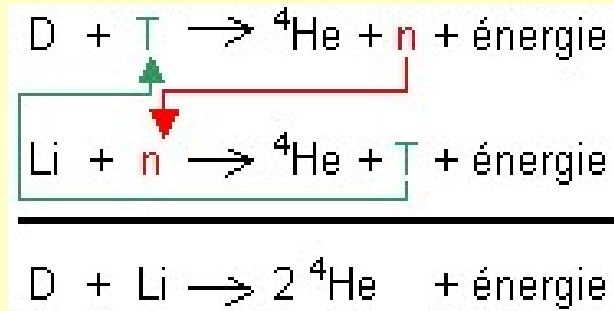
Autre réaction (d+t) plus favorable (fusion plus probable des deux noyau)

Il faut : - haute température (10^8 °K):

l'hydrogène forme un plasma (plus de nuage d'électrons)
température atteinte grâce à des lasers ou des champs magnétiques

- haute pression: distances entre les H $\sim 10^{-15}$ m
réalisé grâce à des champs magnétiques intenses

Réactions de fusion

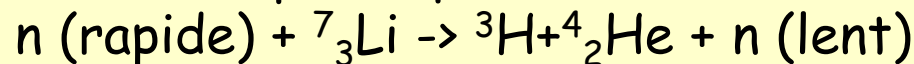


Deutérium très abondant (dans l'eau, 1 molécule /5000)

Durée de vie du tritium: 10 ans -> pas de t naturel sur terre

Peut être produit dans le réacteur grâce à une couverture de ${}^6\text{Li}$ qui entoure le plasma (7.4% du Li naturel, relativement abondant)

Autre possibilité: n rapides qui brisent le ${}^7\text{Li}$:



Conditions pour la fusion

Il faut produire plus d'énergie que celle nécessaire à l'ignition de la fusion (création d'un plasma)

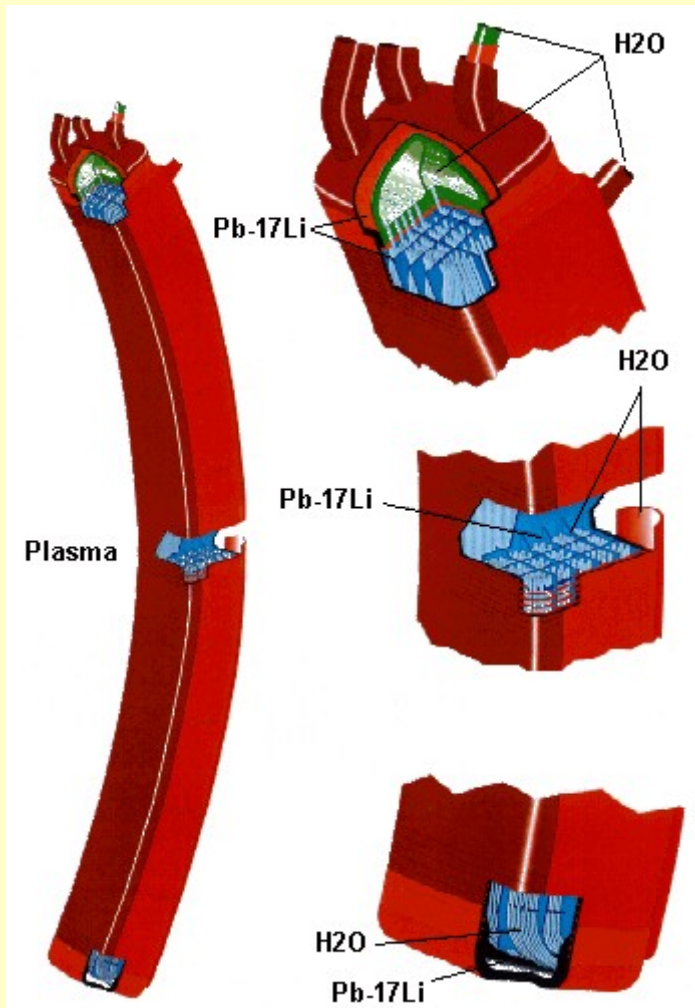
Critère de Lawson: valeur minimale pour le produit:
temps de confinement (τ) X densité du plasma (n)

$$d+t \quad n \tau > 10^{14} \text{ s/cm}^3$$

$$d+d \quad n \tau > 10^{16} \text{ s/cm}^3$$

Couverture Tritigène : un concept **Pb-⁷Li liquide (CEA-France)**

<http://www-fusion-magnetique.cea.fr/cea/next/couvertures/blk.htm>

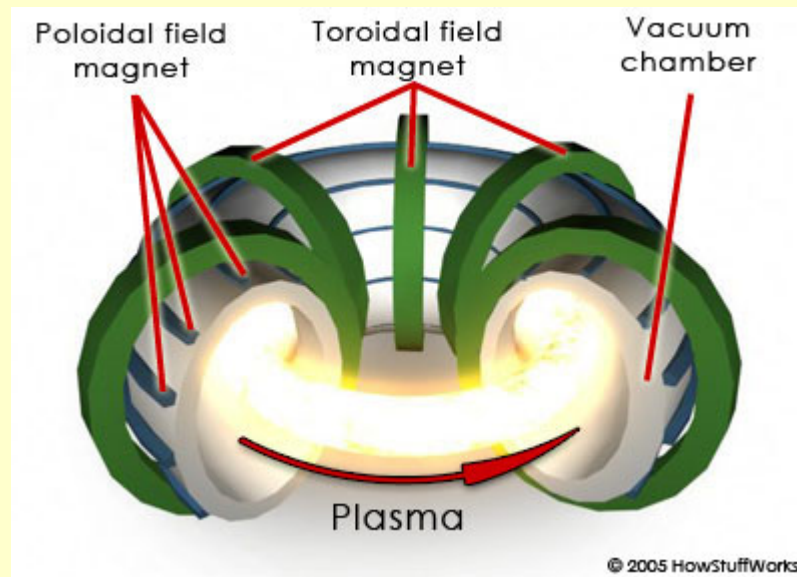


triple fonction:

- protéger les aimants et la chambre à vide contre n et γ
- produire le tritium (autosufficance)
- convertir l'énergie du n et l'évacuer

Tokamak

Un gaz d'hydrogène est chauffé (micro onde, faisceau de particules) pour former un plasma



Le plasma est confiné par un champ magnétique toroïdal (aimants supraconducteurs) rayon intérieur: 2m, extérieur: 6.2m pour ITER

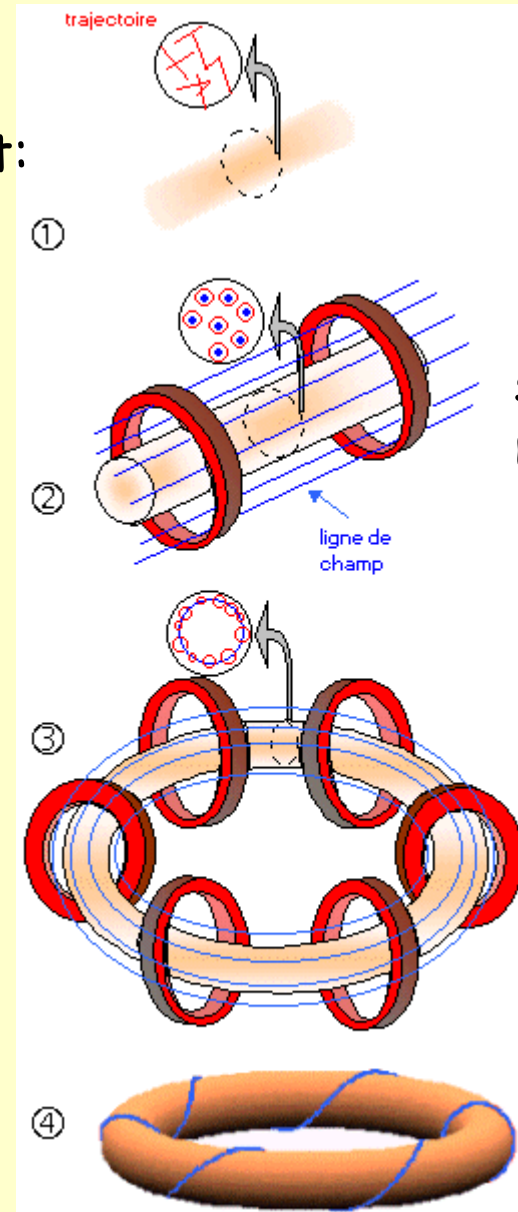
Le confinement

Pour produire des réactions, il faut:
un volume limité
plasma éloigné des parois

enroulement autour des lignes de champ

tore: pas de perte aux extrémités

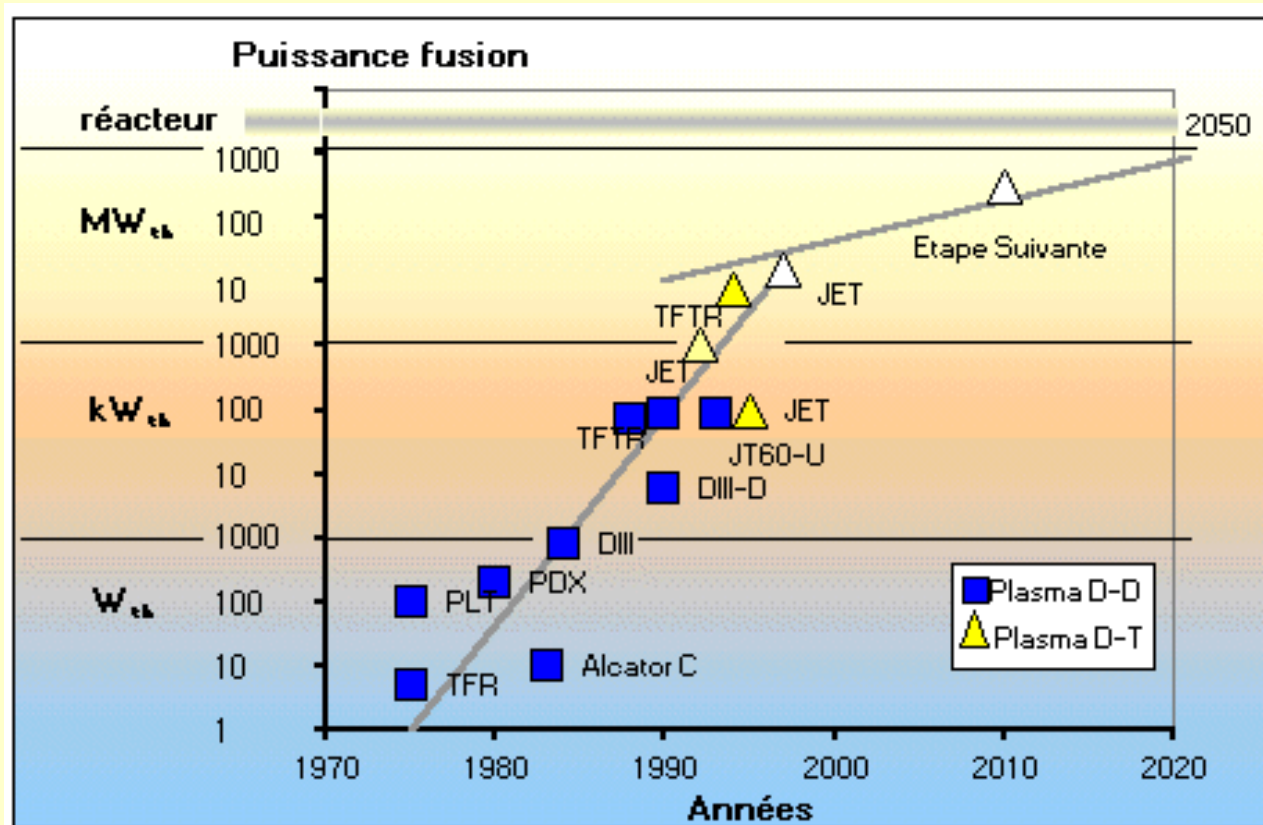
plus efficace (moins de fuites):
lignes de champ hélicoïdales



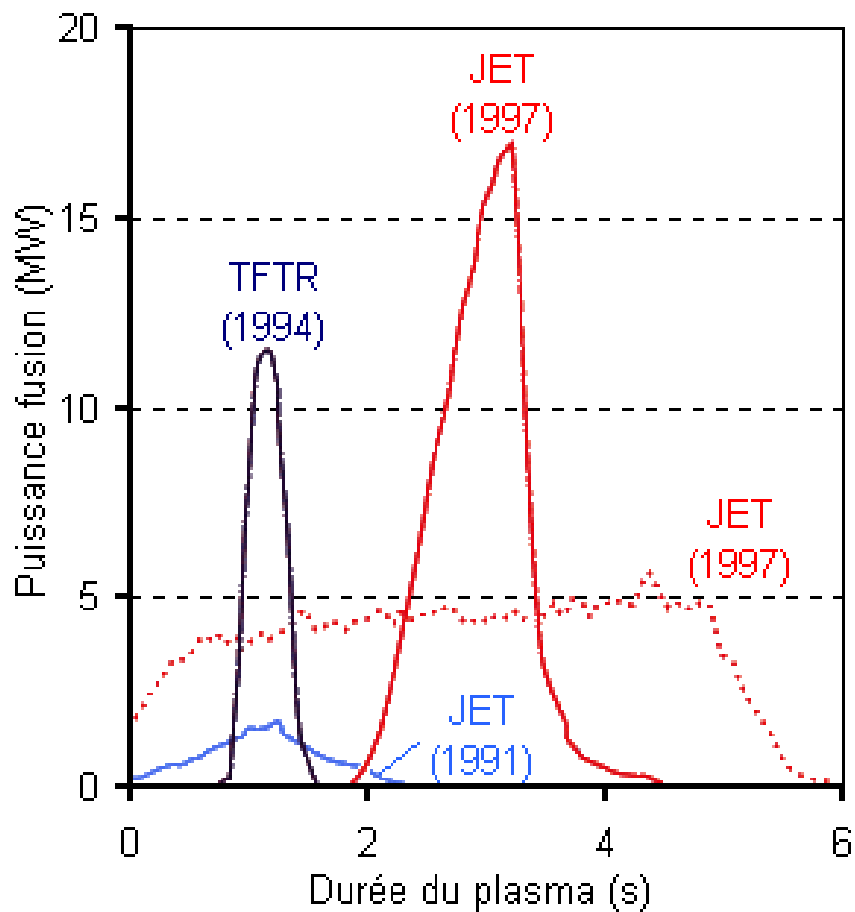
état libre:
mouvement
aléatoire

hydrogène chargé:
suit le champ
magnétique

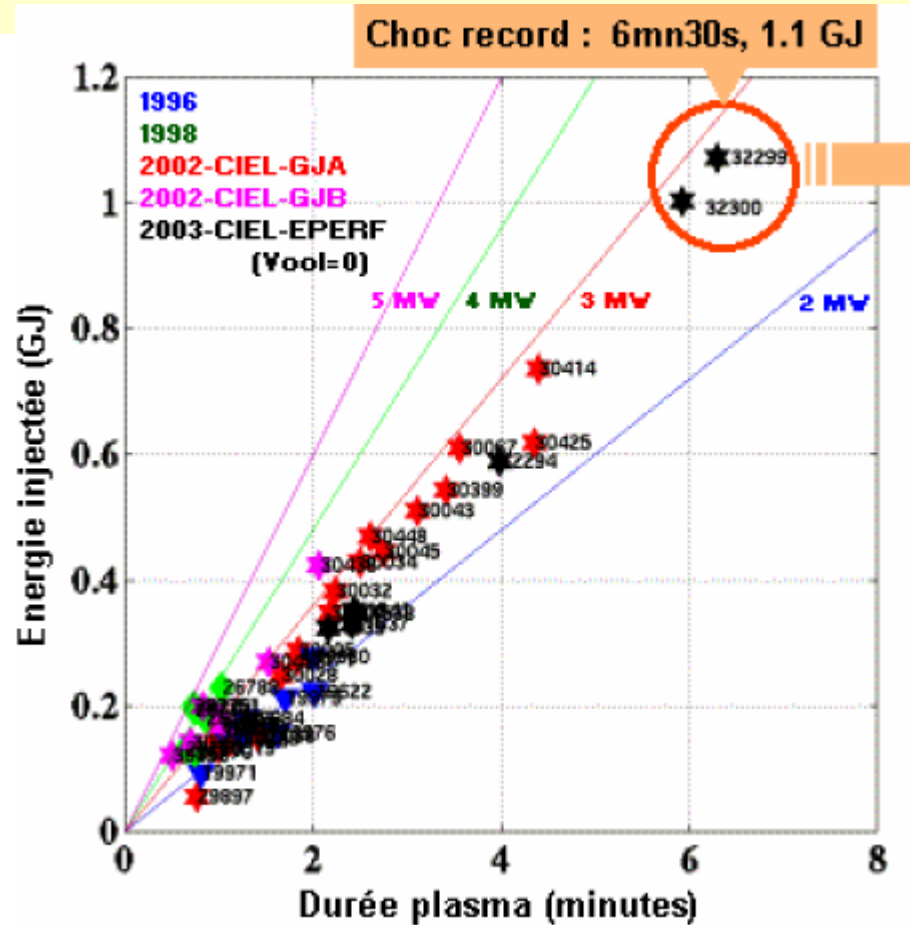
Evolution de la puissance



Les grands résultats actuels

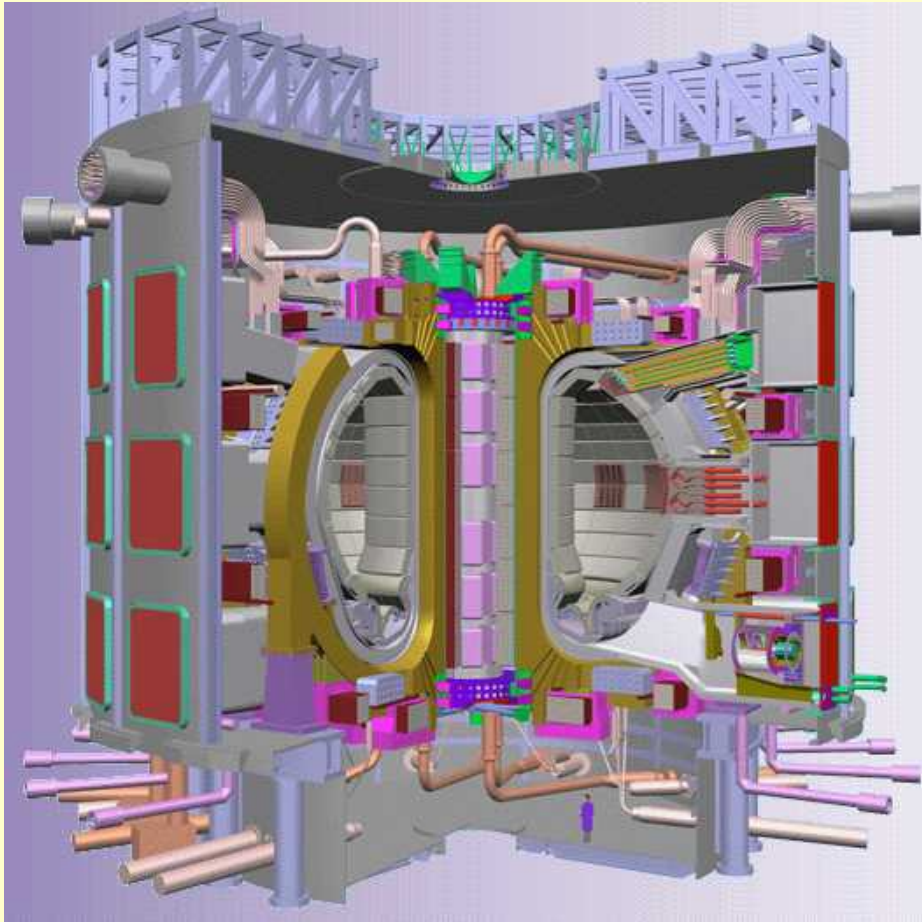


Puissance



Durée

ITER : passage nécessaire



Plasma D-T 1500m³

10⁸°C 500MW

But: fournir 10 fois
l'énergie introduite

Implantation

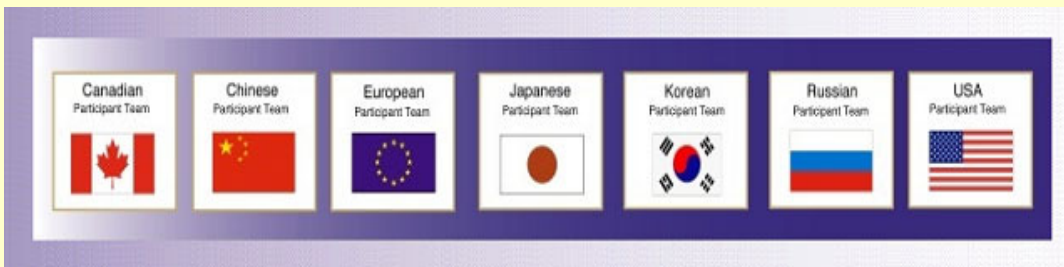
France, Cadarache

6 G€

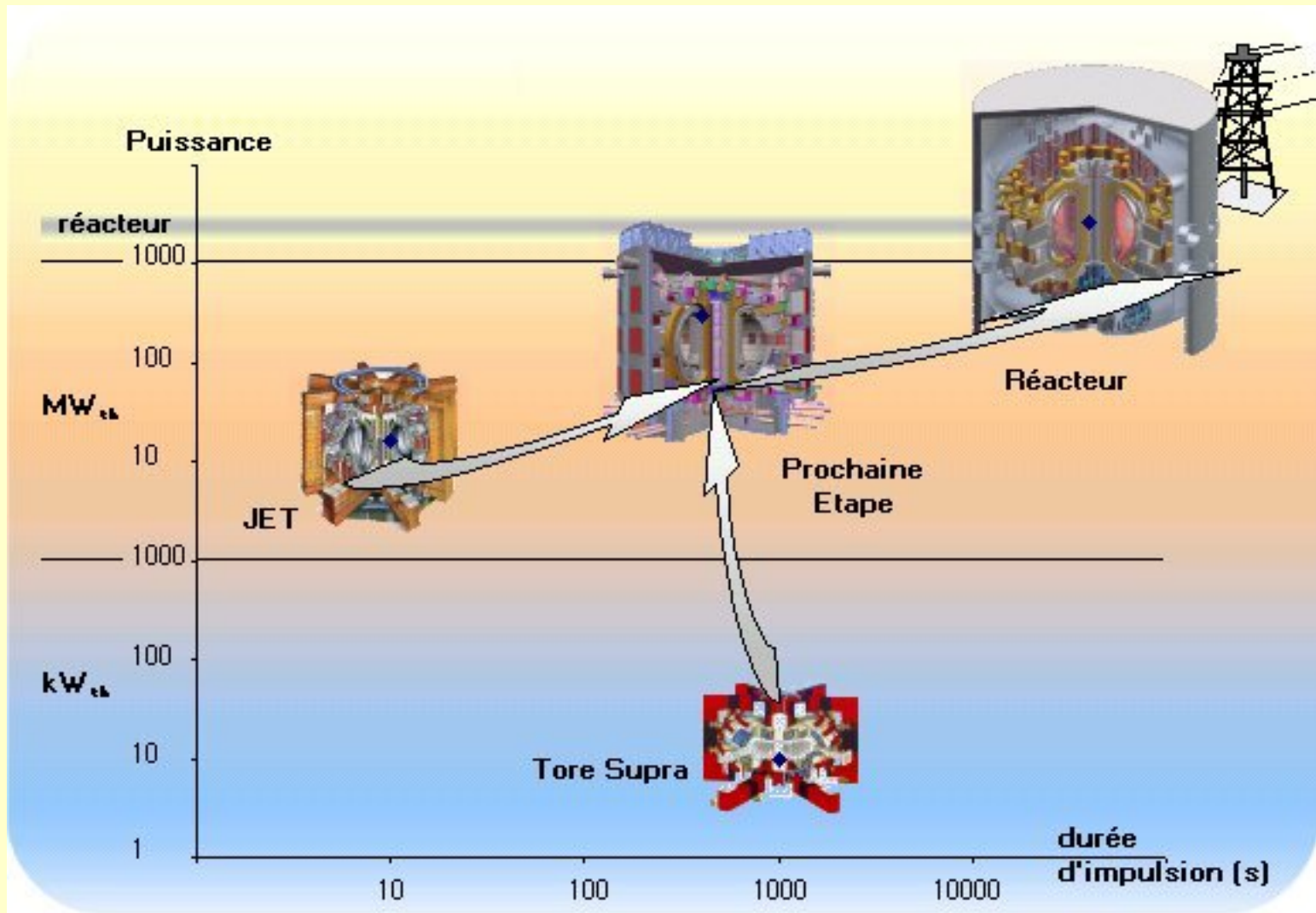
Opérationnel

2015

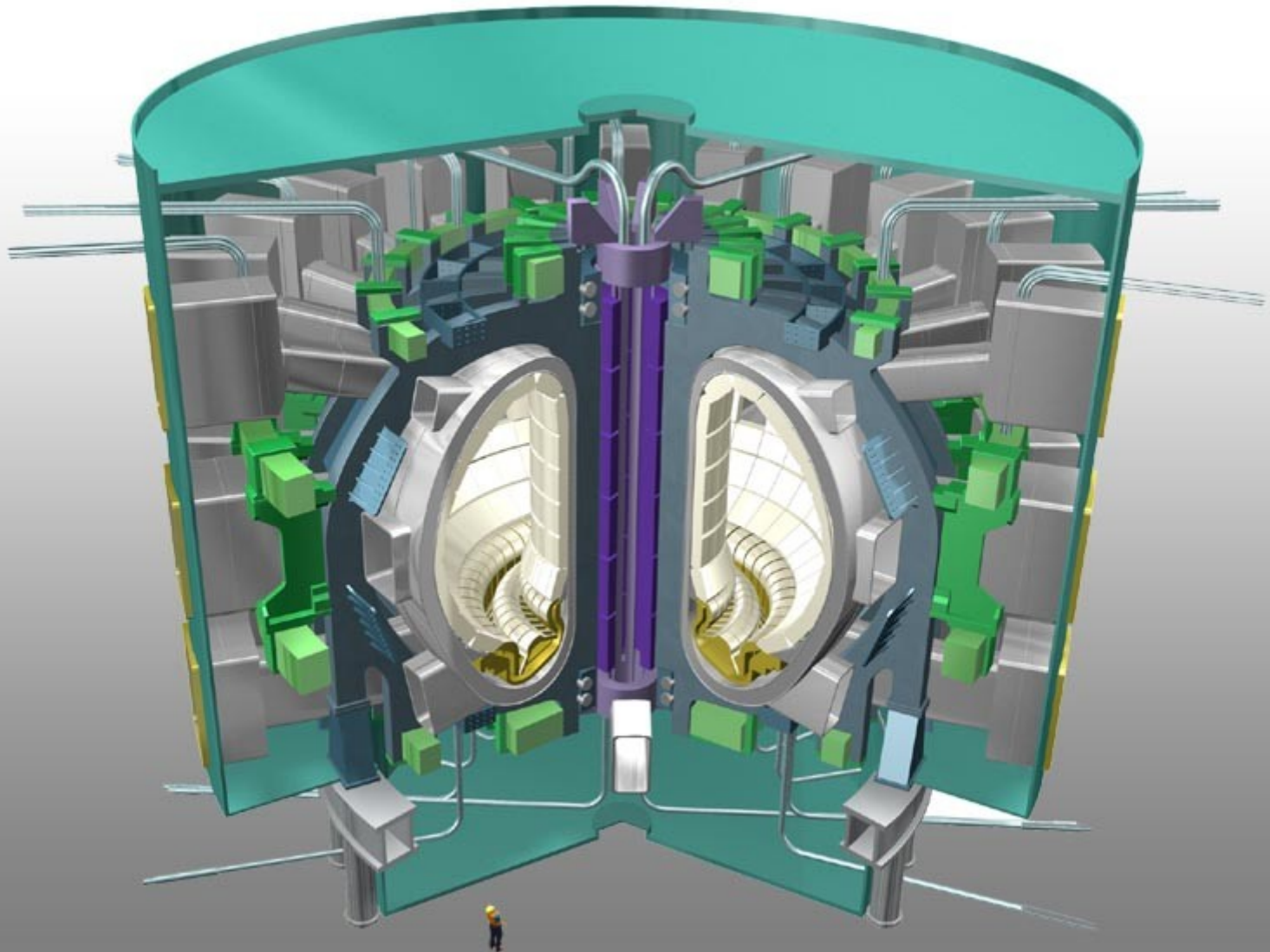
<http://www.iter.org>



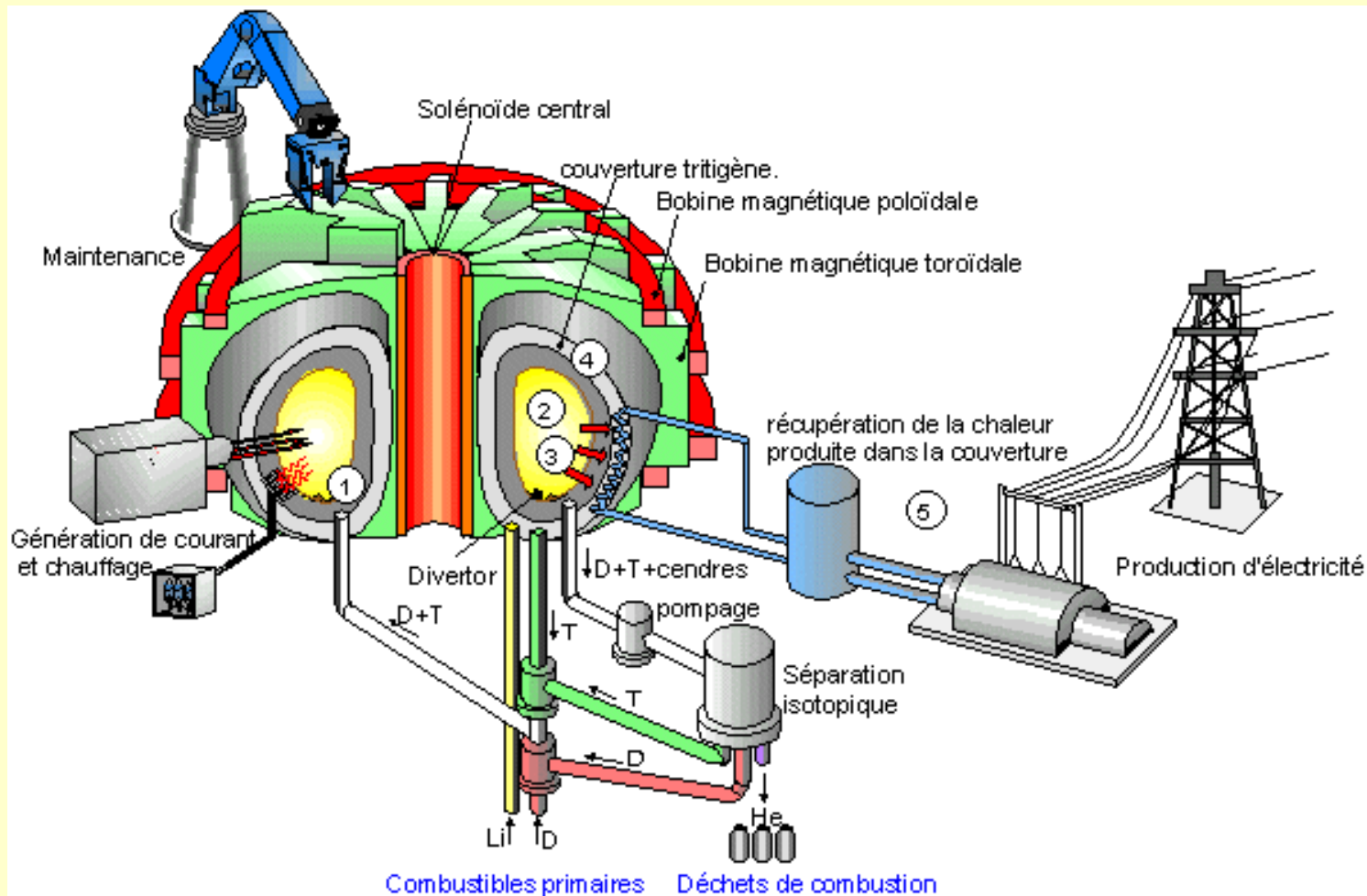
Espoir...



Réacteur de fusion: ITER



Production d'électricité



1: injection des réactifs dans plasma

2: production de cendres (4He) et d'énergie (particules chargées et neutrons)

3: récupération d'énergie dans 1ère paroi

4: couverture: récupération de la chaleur - tritigène 5: production d'électricité

Fusion : Energie du futur ??

	Combustion Chimique	Nucléaire Fission	Nucléaire Fusion
Réaction	$C + O_2 \Rightarrow CO_2$	$^{235}U + n \Rightarrow PF + 2,3n$	$D + T \Rightarrow ^4He + n$
Combustible	Charbon	UO2 (3% ^{235}U)	D + Li
T° typique	700	1000	10^8
J/Kg	$3,3 \cdot 10^7$	$2,1 \cdot 10^{12}$	$3,4 \cdot 10^{14}$
Réserves (An)	$2 \cdot 10^2$	$10^2 - 10^3$ (Surgénérateur)	10^9 ? D+D 300 l H ₂ O = 1gD

Consommation et production de déchets journalières 1GW

	Centrale thermique Charbon	Centrale à Fusion D-T
Carburant	9000 T	0,5 Kg D ₂ 1,5 Kg 6Li (0,75 Kg T ₂)
Déchets	30000 T CO ₂ 600T SO ₂ 80 T NO ₂	2 Kg 4He

Fusion : Avantages

+++

combustibles abondants et géographiquement répartis

si D-T (Li) 2000 ans ; qlqs 10^6 ans Li ds eau de mer (coût ?)

si D-D 10^9 ans mais $T > 100$ KeV

emballement impossible

pas de gaz à effet de serre, pas de pollution atmosphérique

pas de déchets radioactifs directs (^4He)

Fusion : Inconvénients

- # irradiation n => choix des matériaux constitutifs est important
 - risque de radioactivité des matériaux du réacteur
 - démantèlement
- # défis technologiques
- # fuite de tritium

Agenda

- ITER: début d'opérations en 2018
mais fusion $d + t$ en 2028
500 MW, coût de construction 6G€,
opération 5 G€ sur 20 ans
- DEMO: début de construction en 2020?
énergie de fusion de 2 GW
production d'électricité de quelques centaines de MW
- PROTO, prototype industriel en opération vers 2050