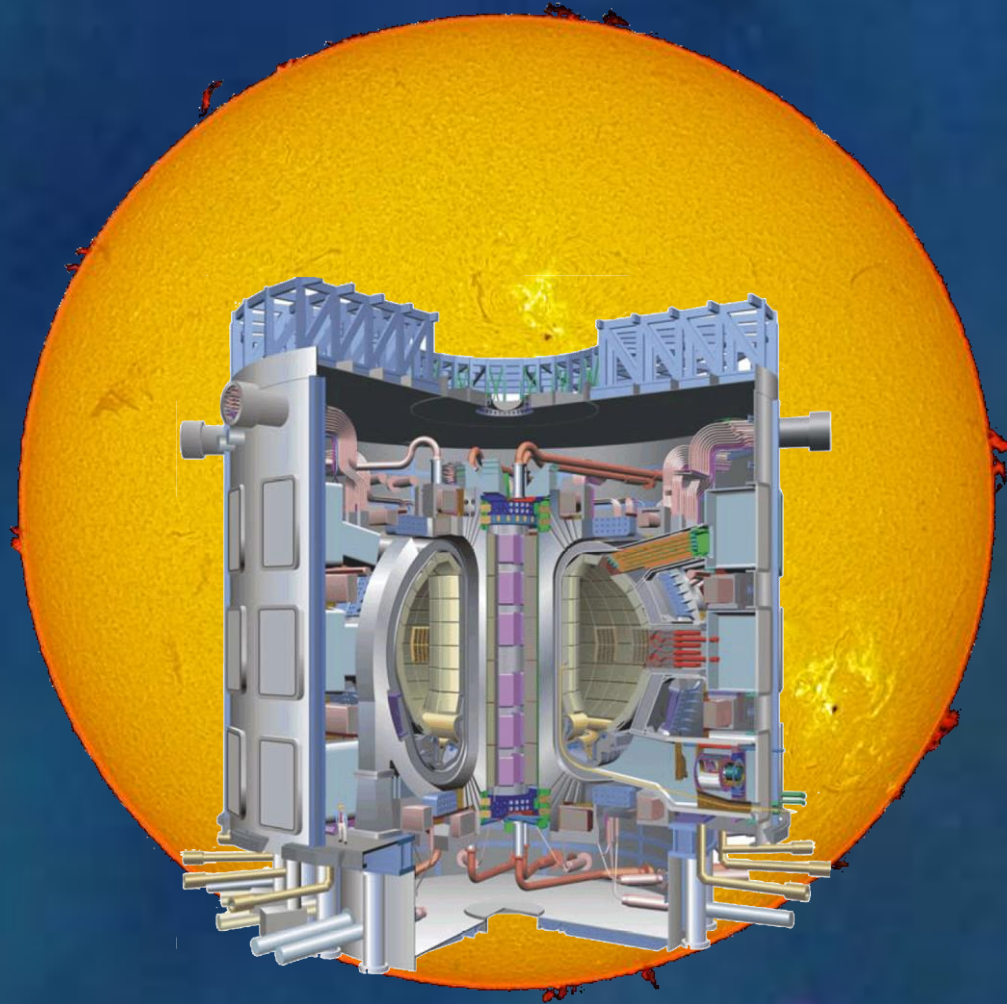


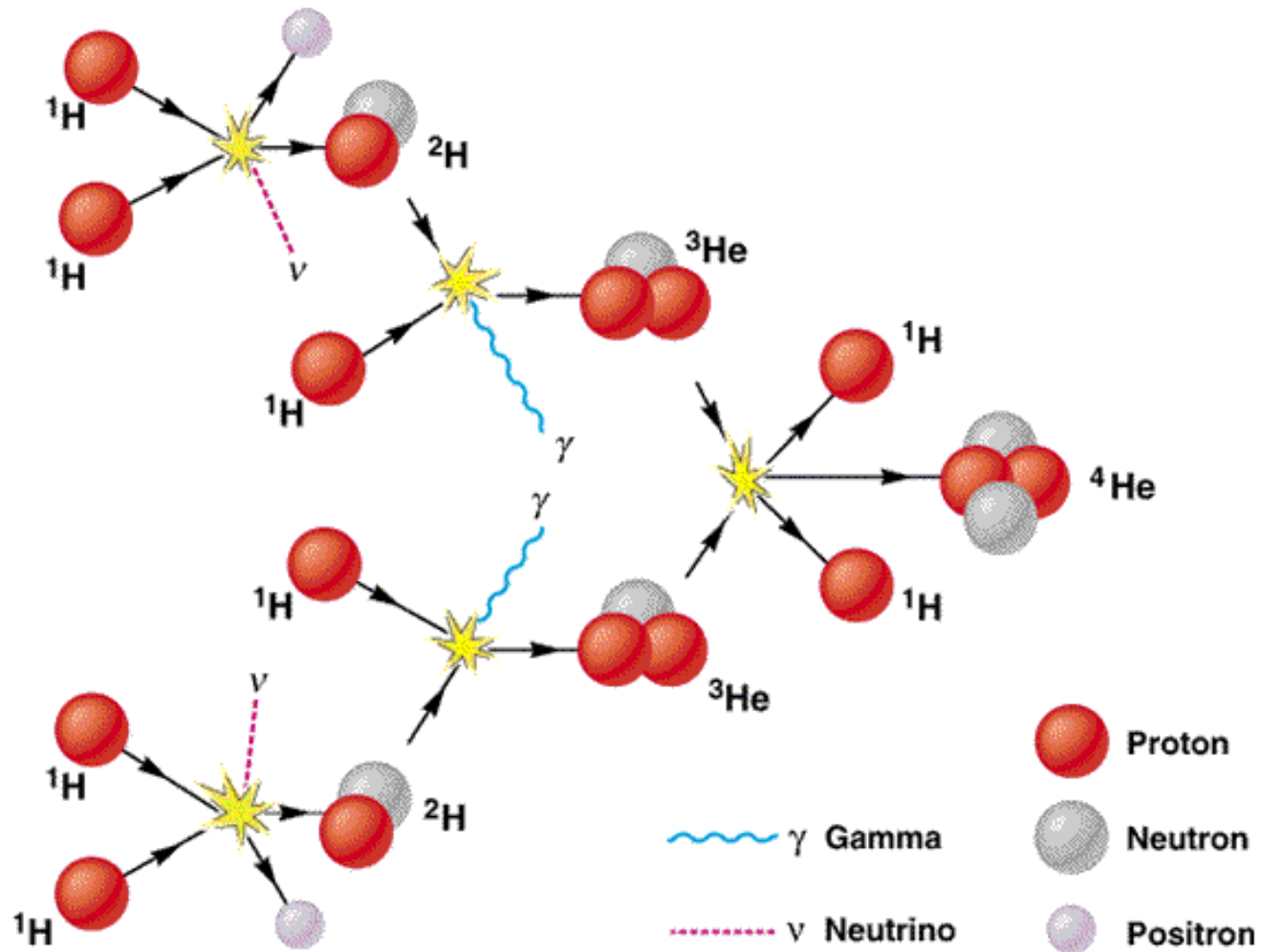
La fusion sera-t-elle un jour une énergie sûre, propre et durable?



"Tête de mouton, mais viande de chien"? Masatoshi Koshiha

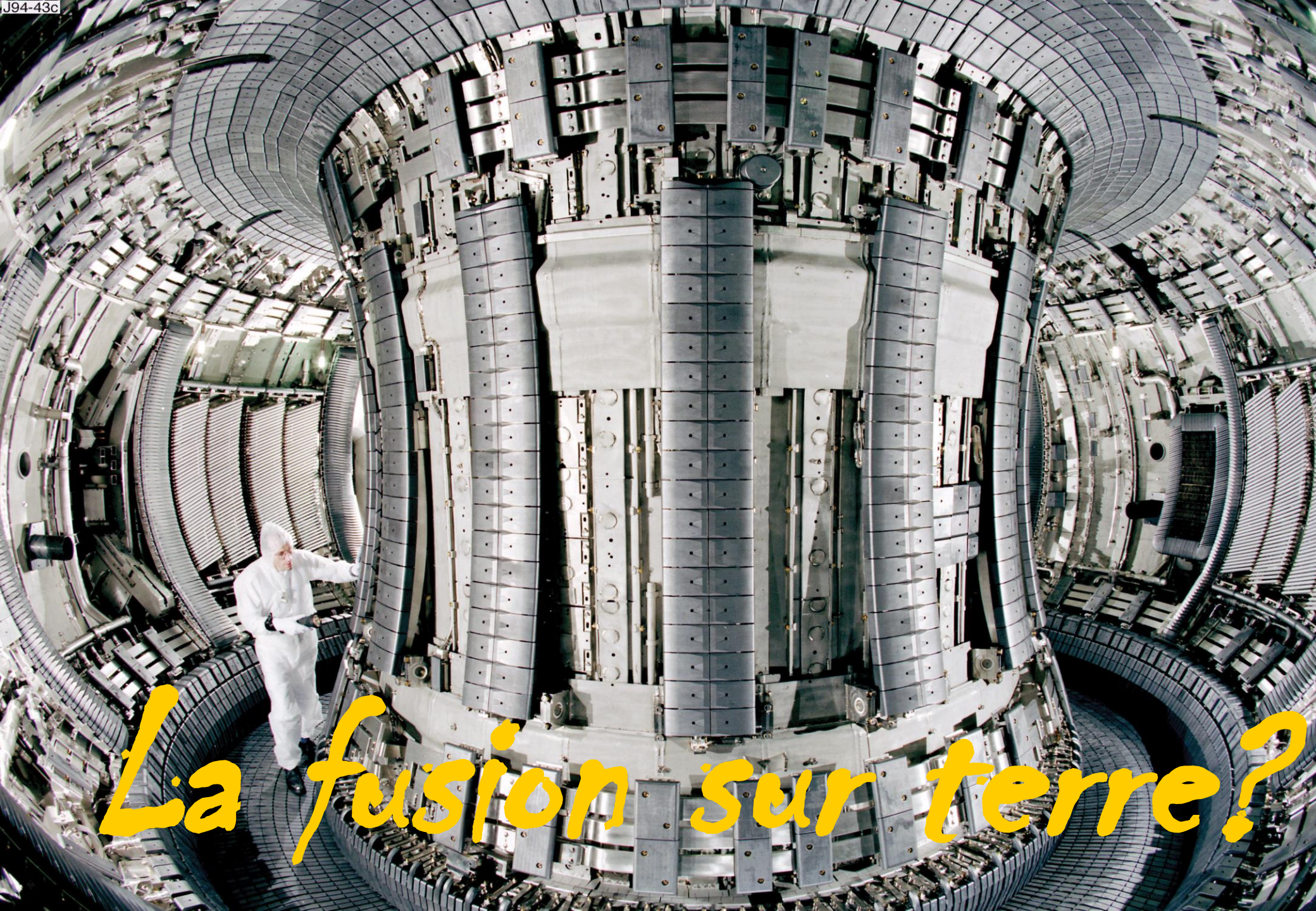


Il ne faut pas rêver...





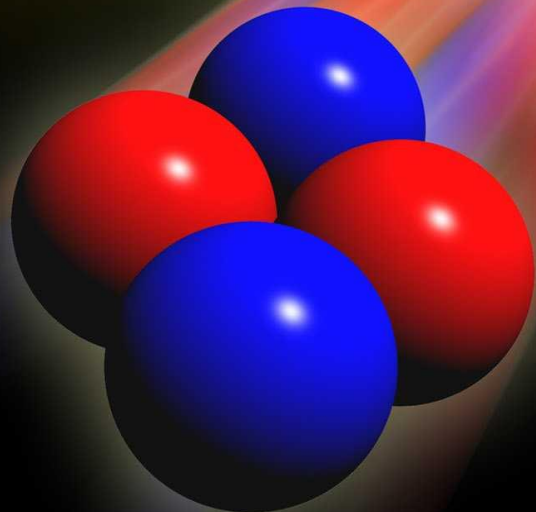
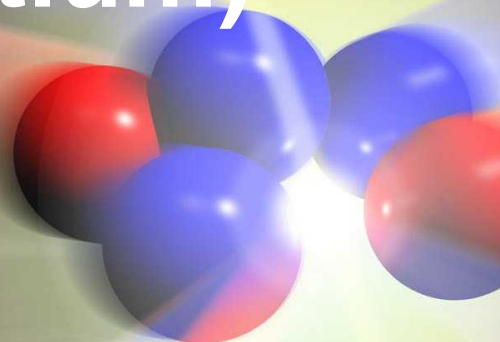
Watt par kilo



La fusion sur terre?

T (tritium)

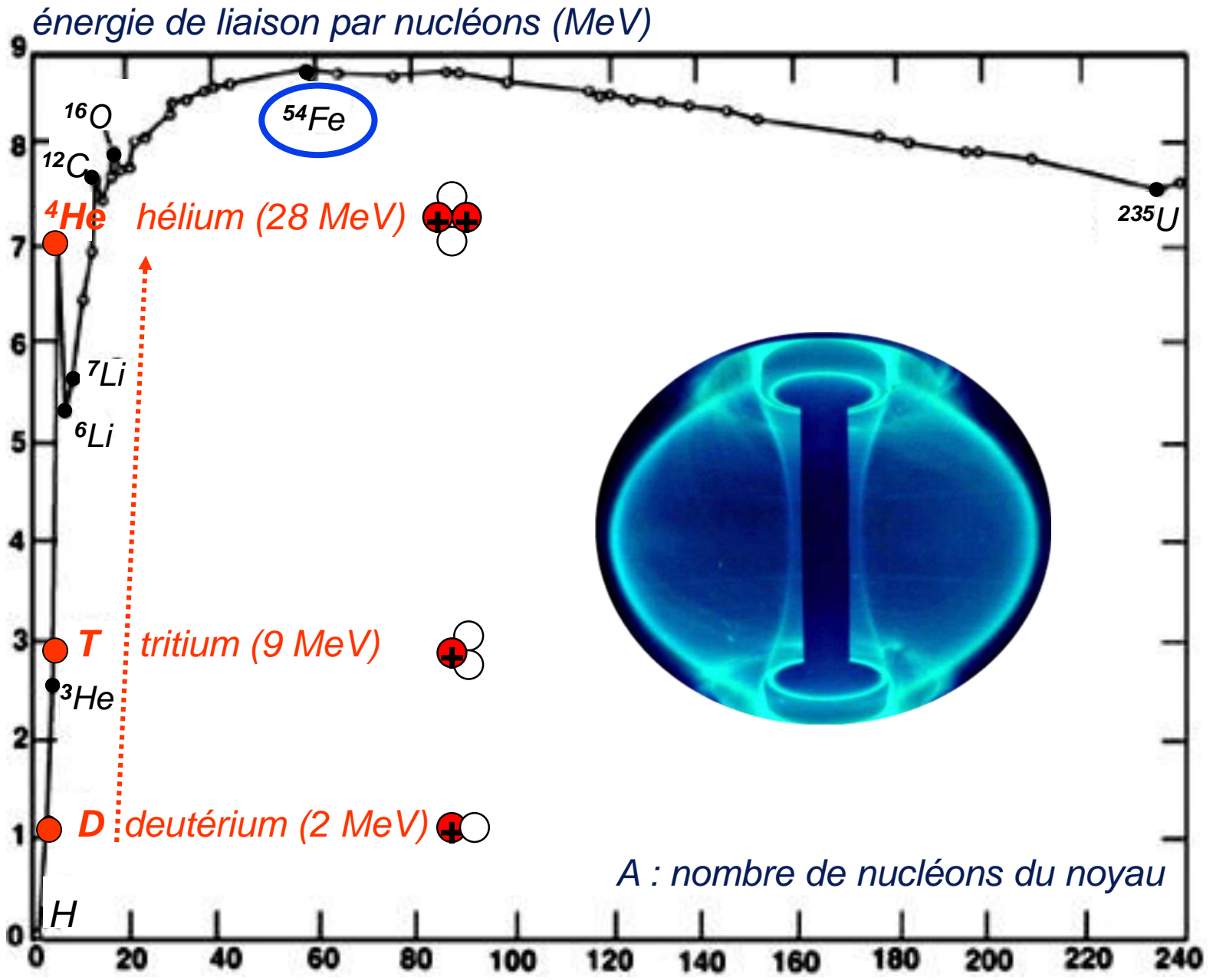
D (deutérium)



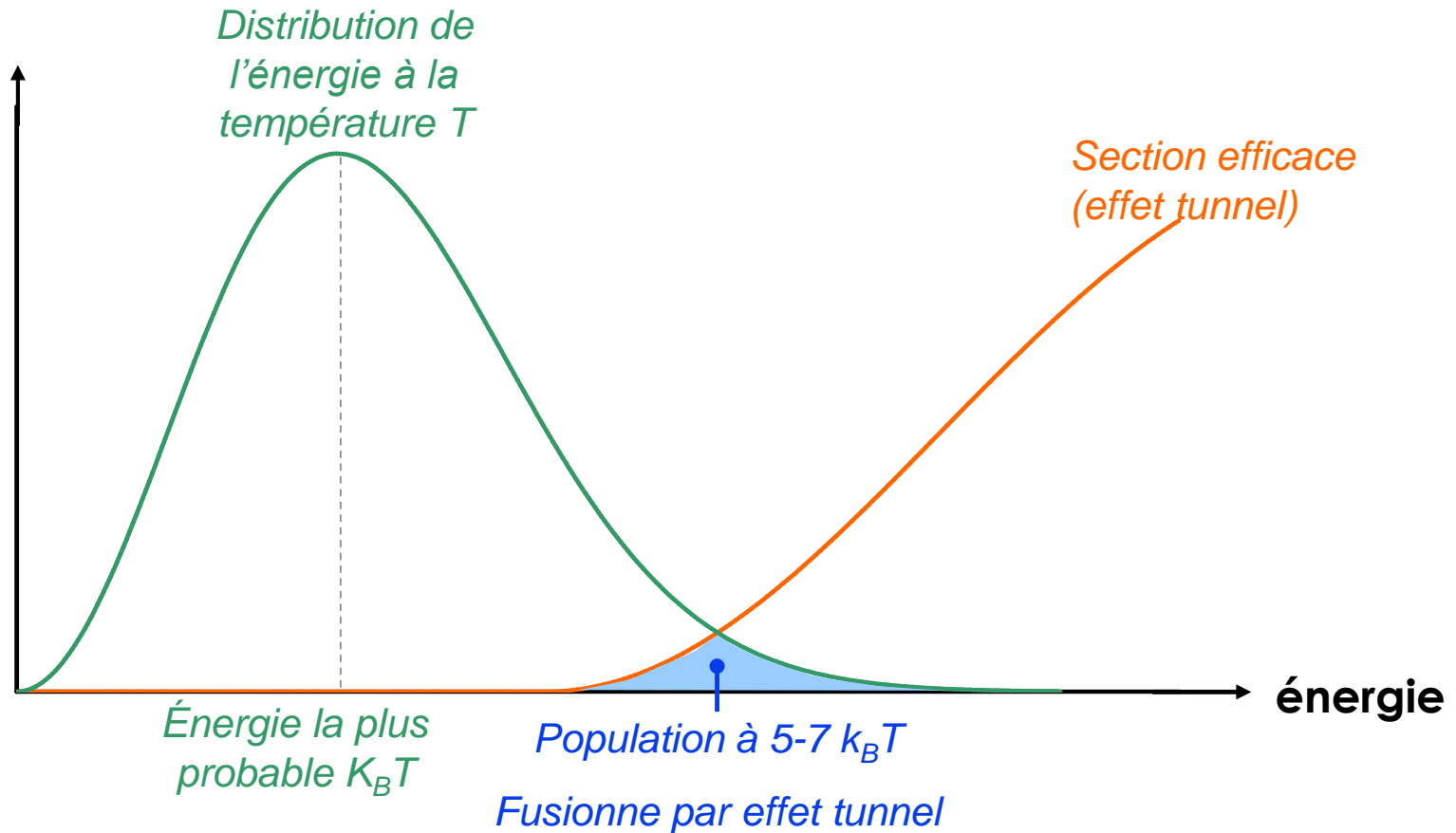
${}^4\text{He}$ (hélium4)



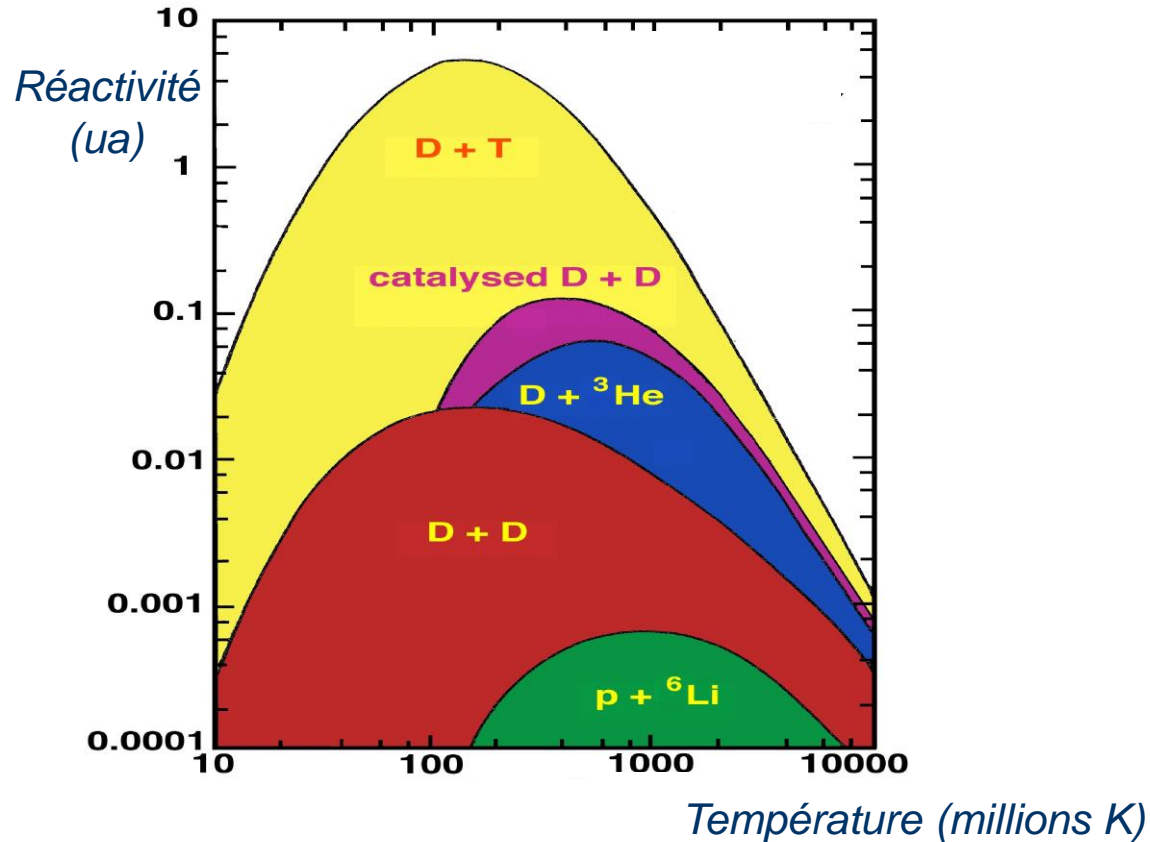
n (neutron)



Quelles températures pour la fusion?



Quelles températures pour la fusion?



$$P \text{ (W/m}^3\text{)} = n_1 n_2 \text{ réactivité } E_{\text{fusion}} \sim p^2$$

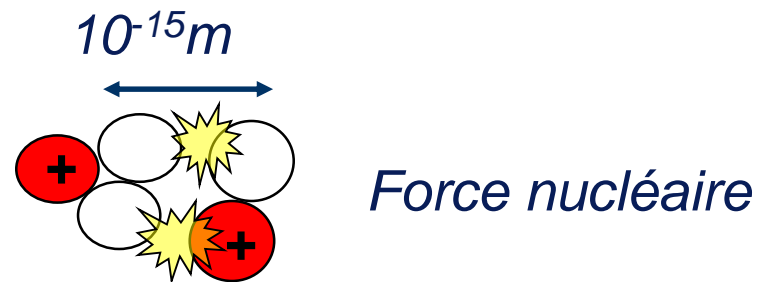
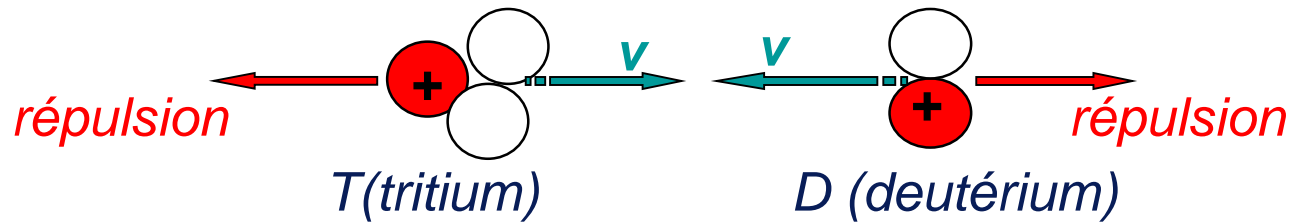
deutérium / tritium

$T_{DT} \approx 150$ millions de degrés

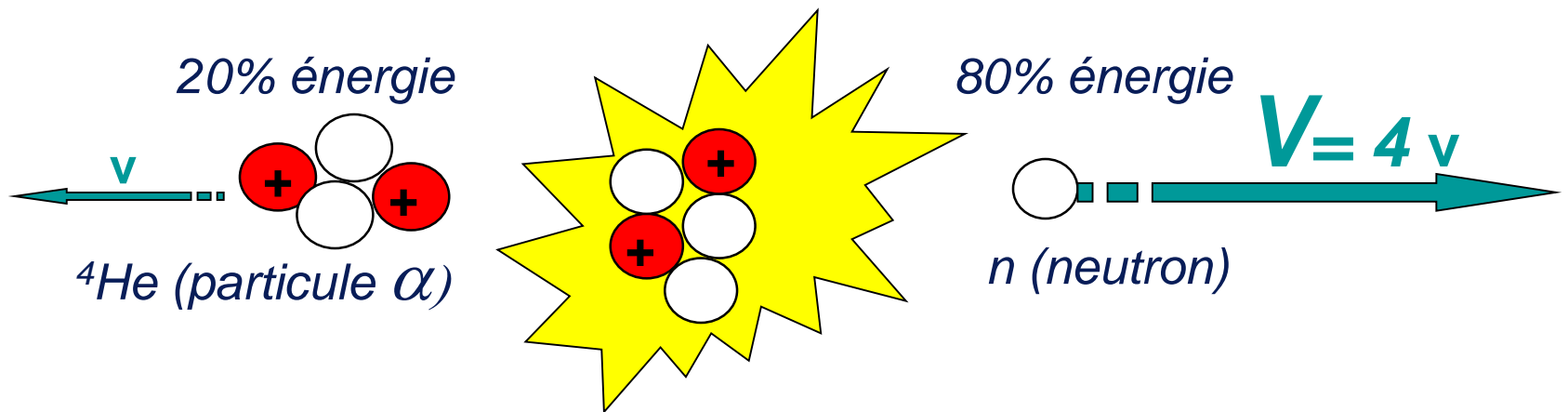
deutérium / deutérium ou hélium3

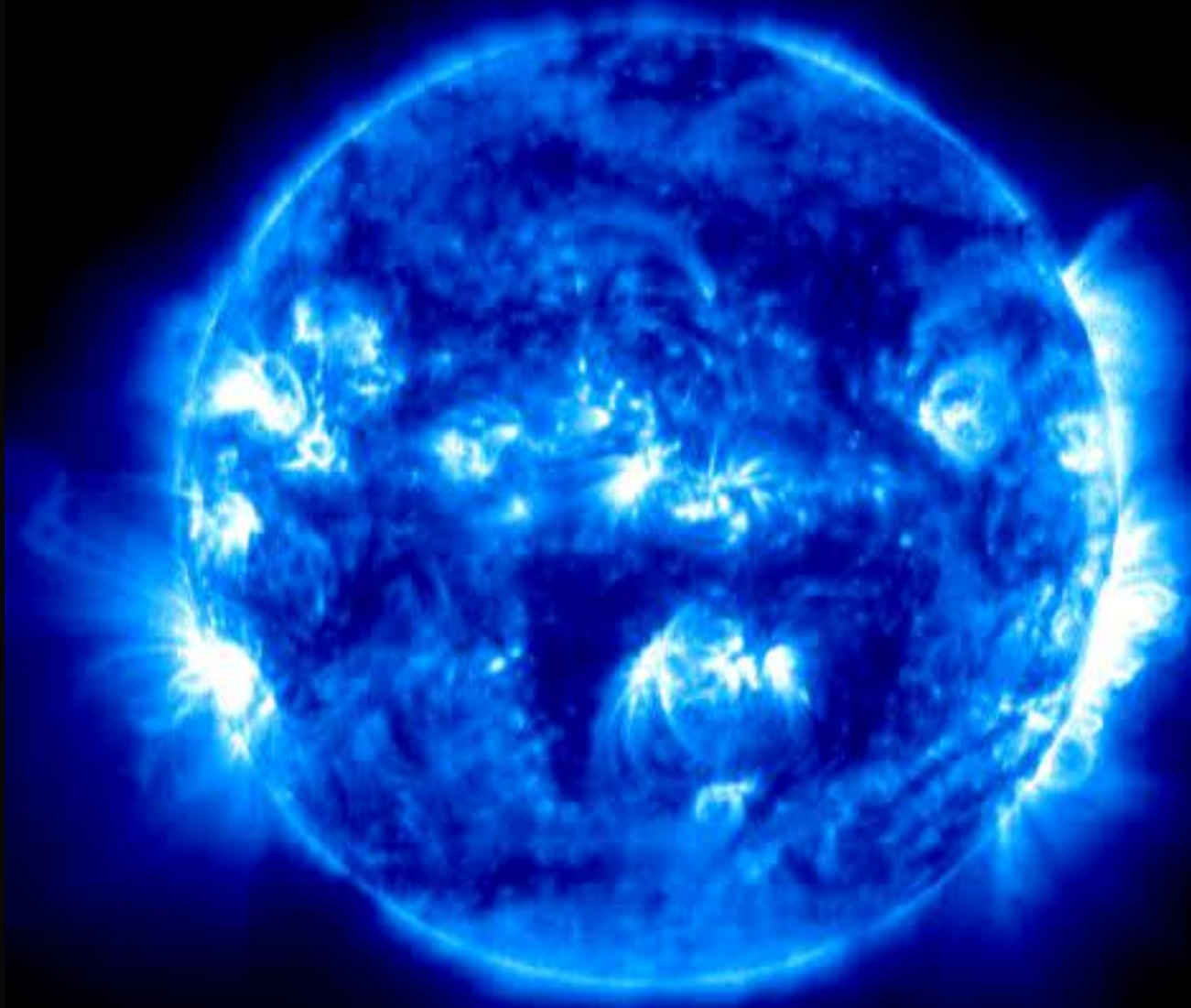
$T_{DD} \approx 500$ millions de degrés

La fusion deutérium-tritium



150 millions de degrés





2001/09/18 18:48:14

Topologie d'un plasma de fusion magnétique

Le gradient de pression est équilibré par une force électromagnétique

$$\nabla p = j \times B$$



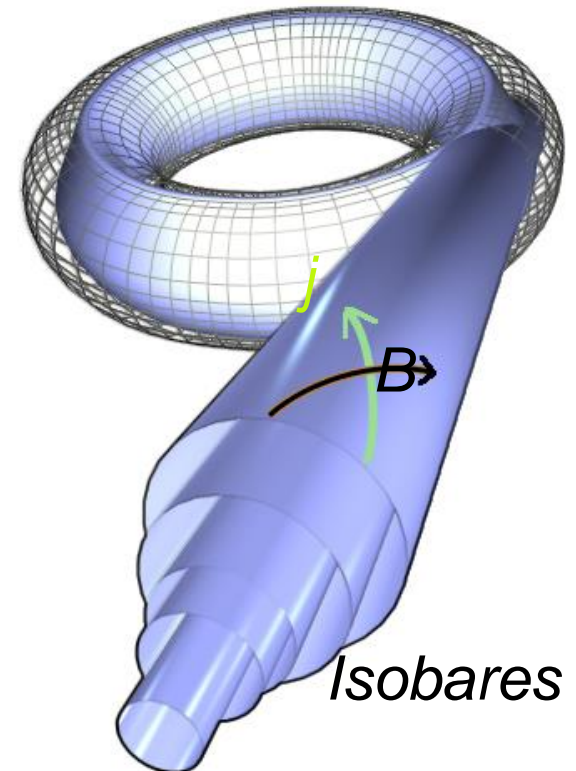
$$B \cdot \nabla p = 0$$

Les lignes de champ magnétique s'inscrivent sur des surfaces isobares

B non singulier, isobares spatialement bornées



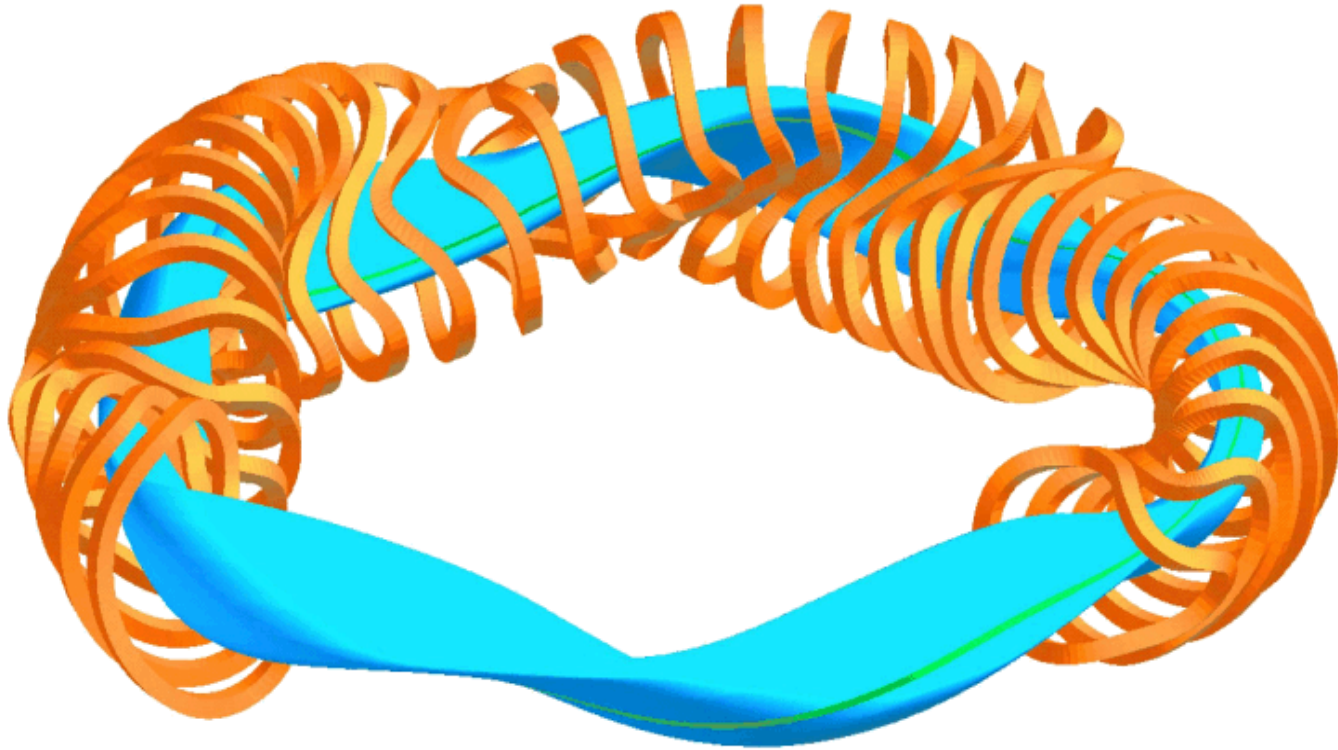
Les isobares sont des tores emboîtés



Fusion magnétique



Pression d'un plasma de fusion magnétique

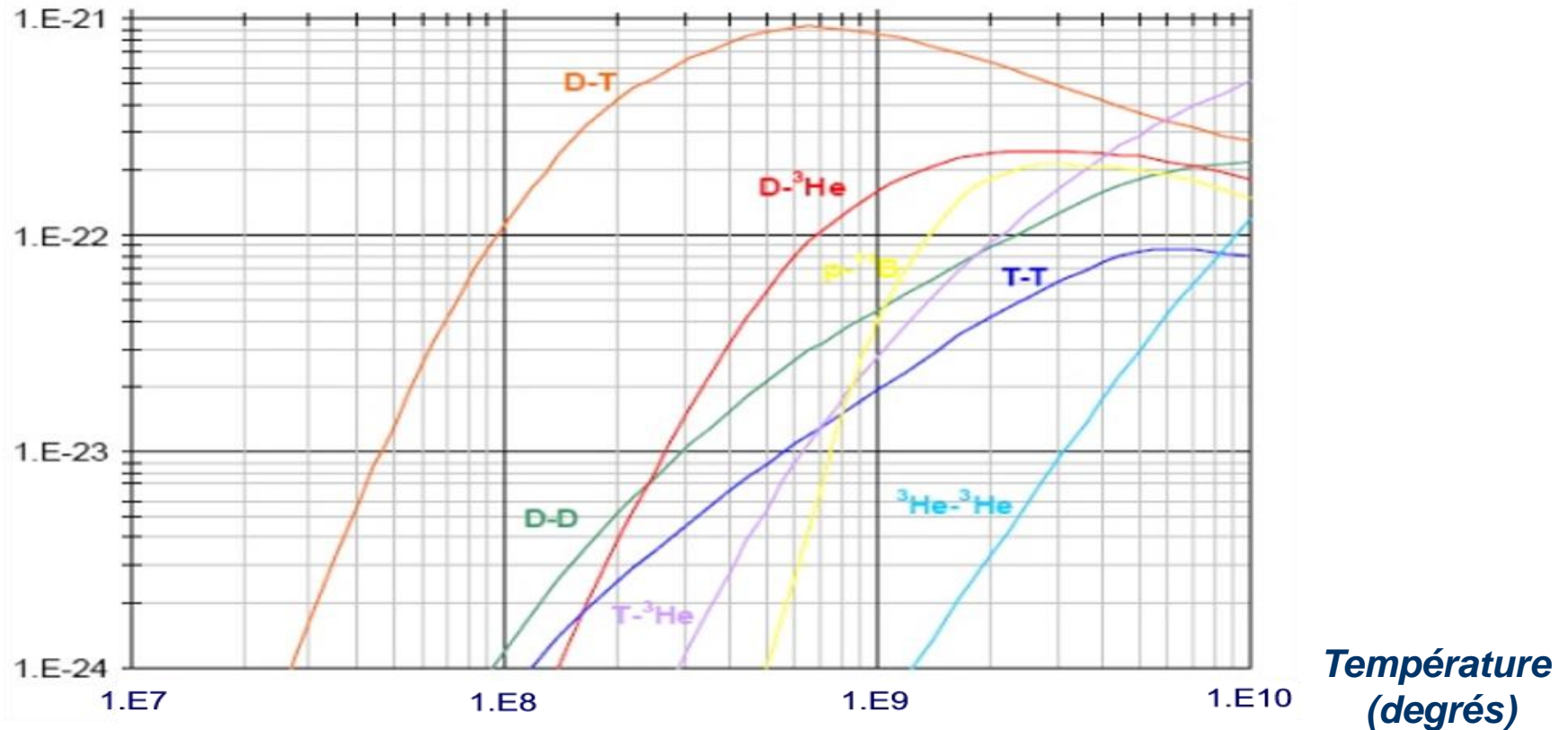


pression magnétique maximum ~ 100 atmosphères

pression plasma ~ quelques atmosphères

Densité de puissance fusion

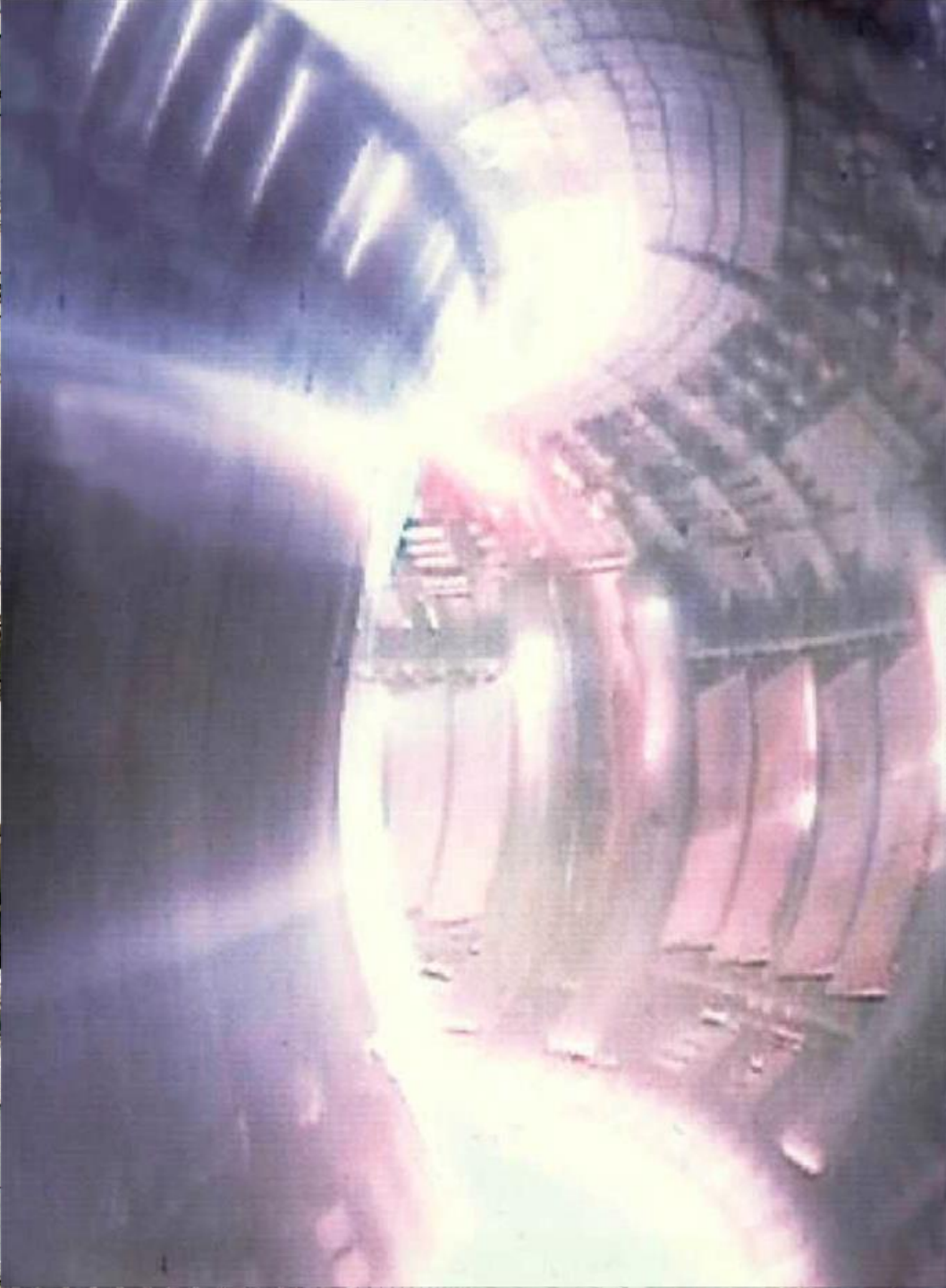
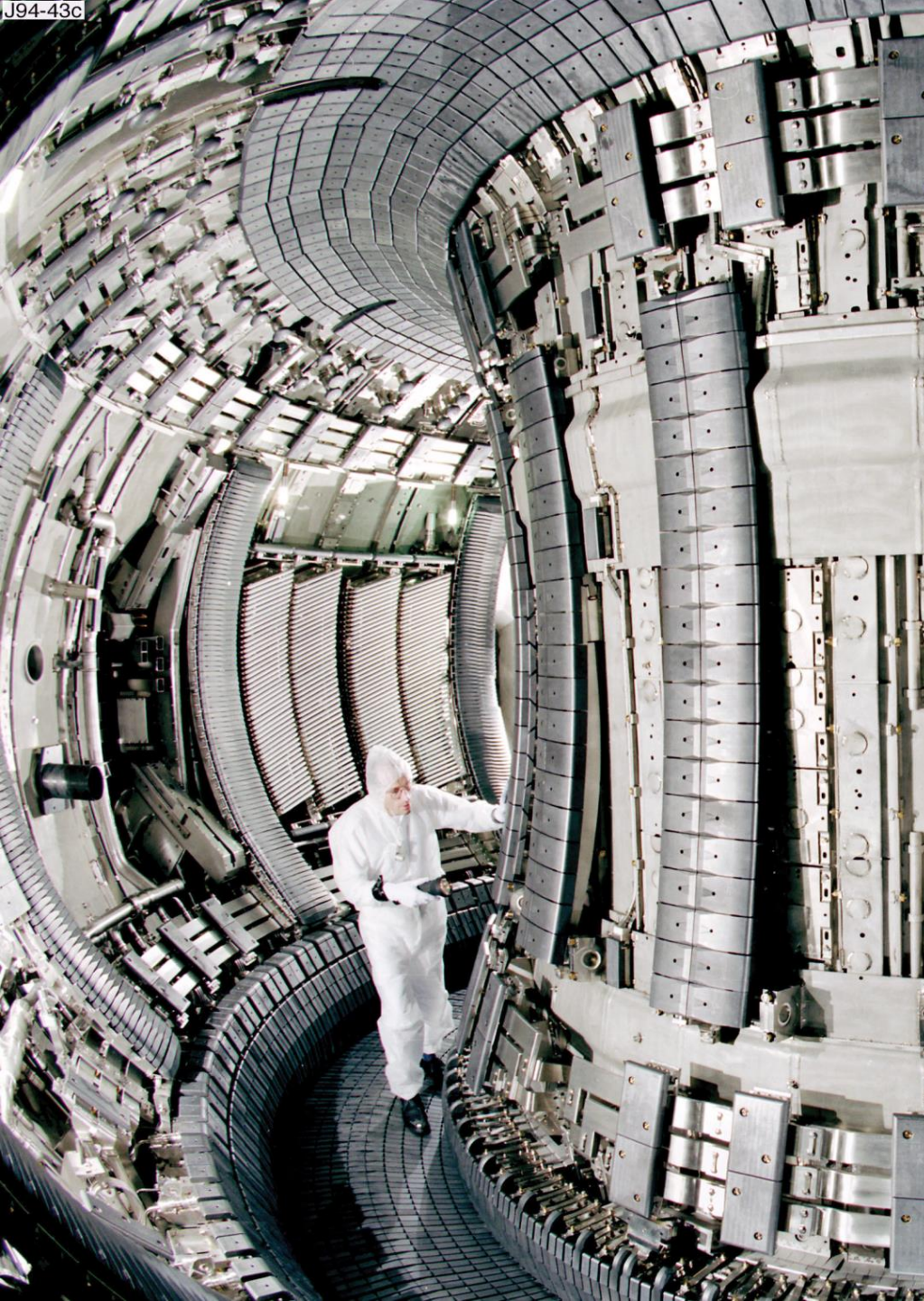
Réactivité (m^3/s)



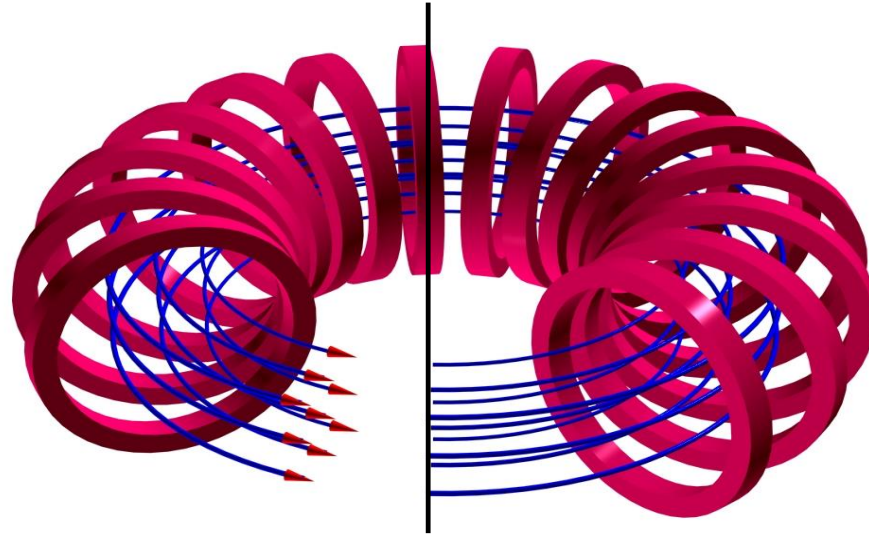
$$P_{fusion} (W/m^3) = n_1 n_2 \text{ réactivité } E_{fusion}$$

pression ~ qq atmosphères & $T \sim 150$ million degrés $\Rightarrow n_1 \sim n_2 \sim 10^{20} m^{-3}$

$$P_{fusion} \sim 10 \text{ MW}/m^3$$



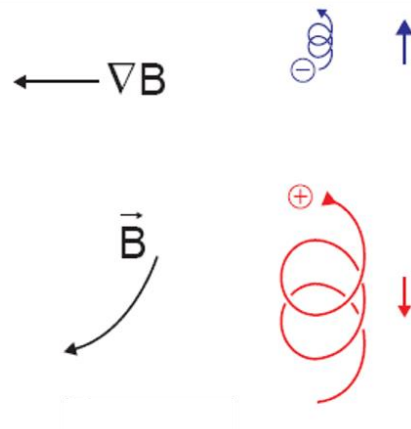
Dérive verticale



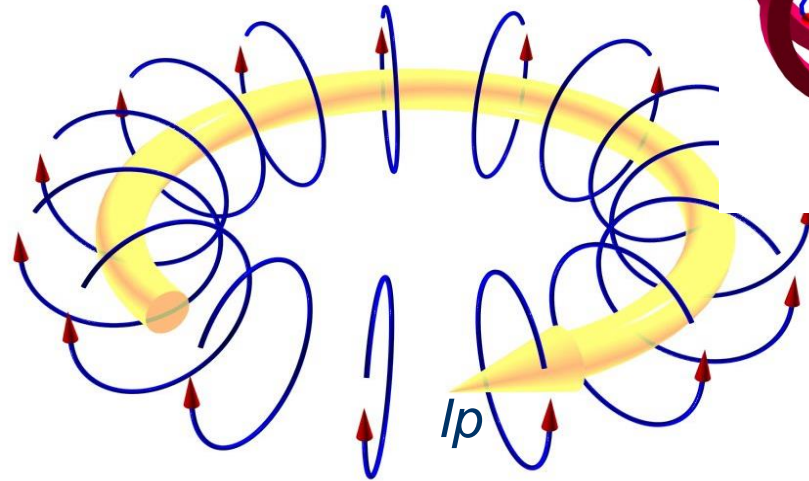
$$B = \mu_0 I_{bob} / 2\pi R$$

rayon de giration

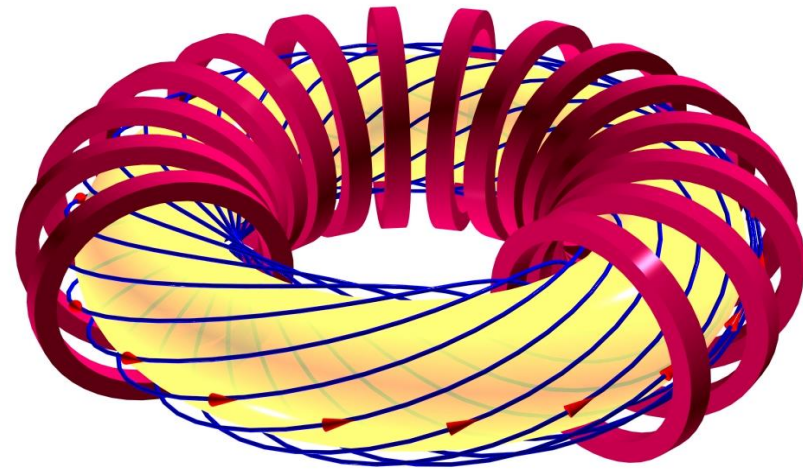
$$R_g \propto 1/B$$



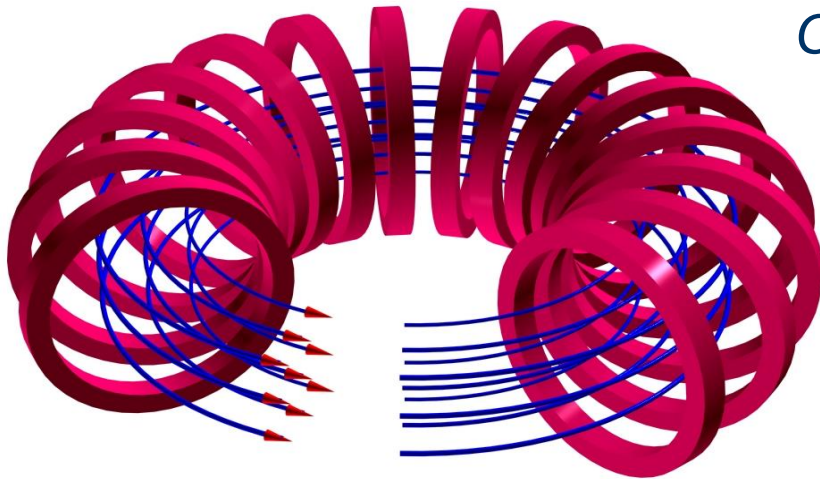
*”toroidalnaya kamera
magnitnaya katushka”*



Champ poloïdal créé par I_p



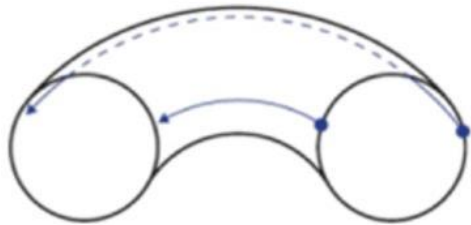
Champ total



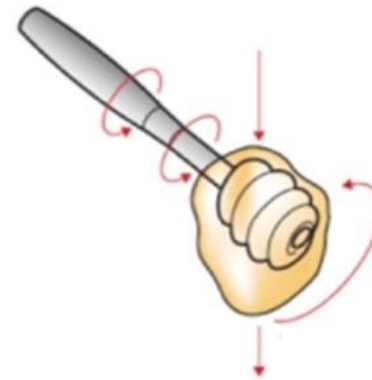
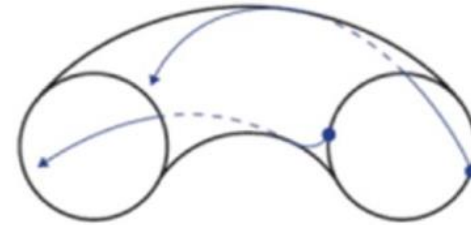
Champ toroïdal

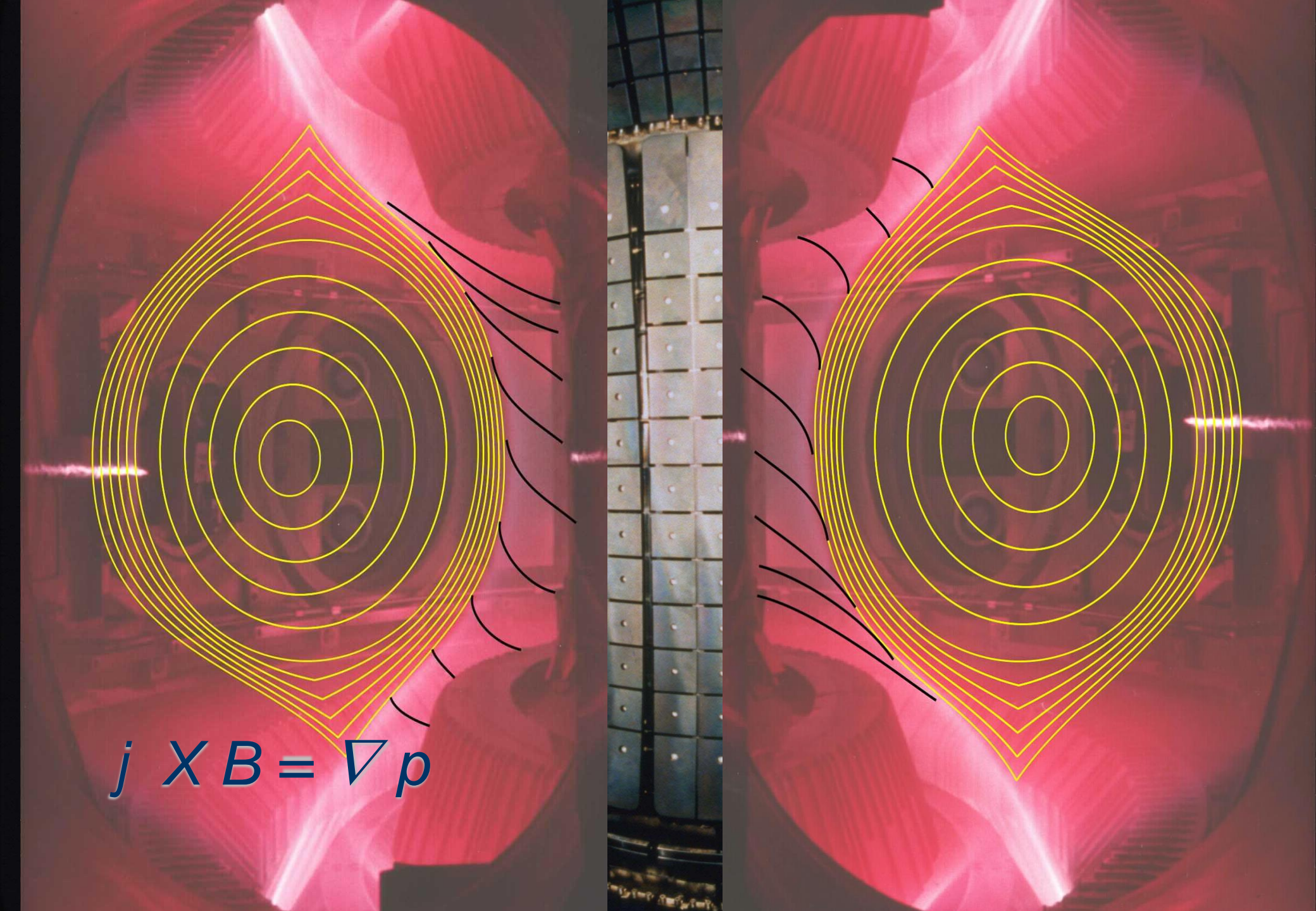
L'hélicité permet de compenser la dérive verticale

sans hélicité



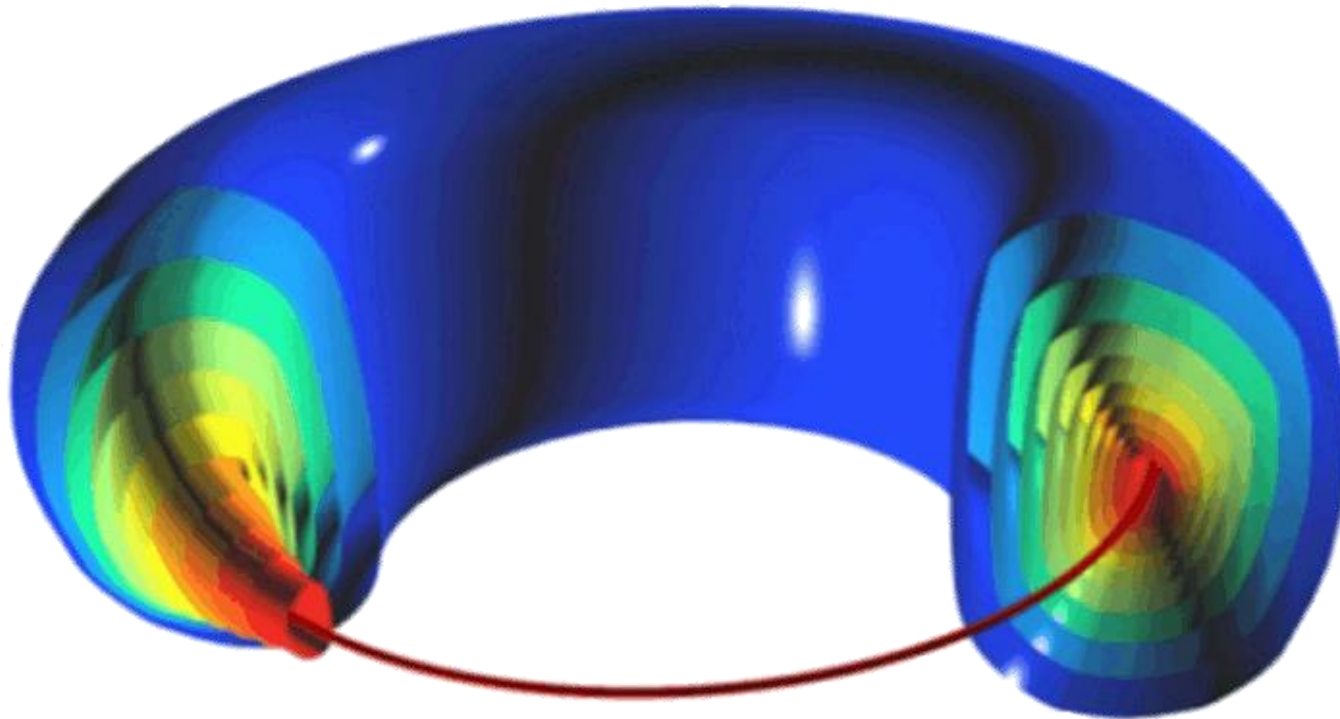
avec hélicité





$$j \times B = \nabla p$$

Temps de refroidissement du cœur d'un réacteur de fusion



Le cœur du plasma doit être quasiment auto chauffé par l'hélium

Chauffage = puissance fusion hélium (20% P_{fusion}) \sim MW/m³

Pertes = énergie stockée dans le plasma / temps de refroidissement

Energie stockée dans le plasma \sim qq atmosphères \sim MJ/m³

temps de refroidissement du plasma \sim seconde

The image shows two large, glowing blue tokamak fusion reactors, likely the ITER project, viewed from the front. The reactors are cylindrical with a complex internal structure of magnetic coils. The glow is a bright blue-white, indicating the intense heat of the plasma. The reactors are mounted on a dark, industrial-looking structure.

*Paramètres
d'un
plasma
de
fusion*

Température

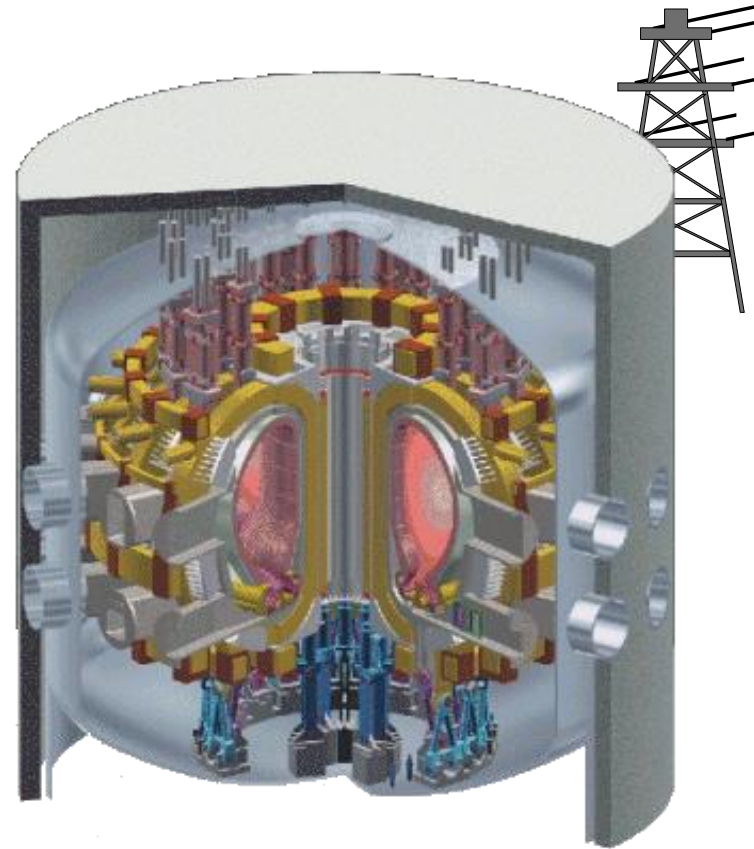
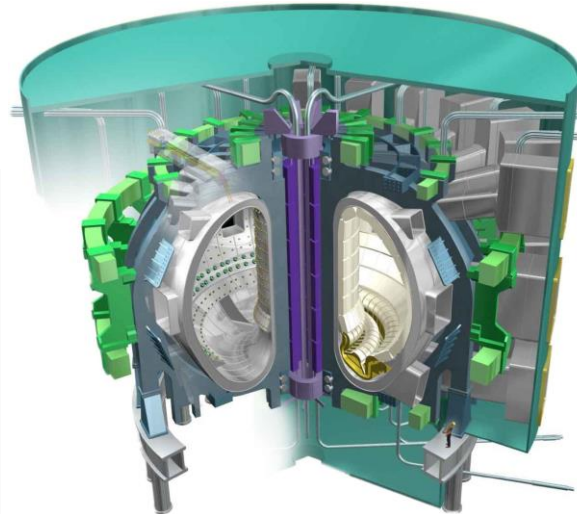
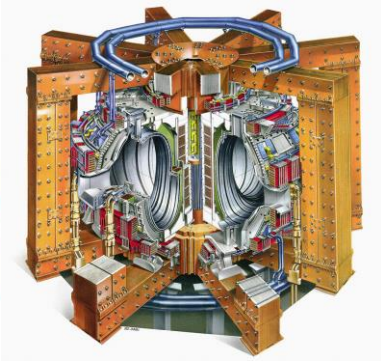
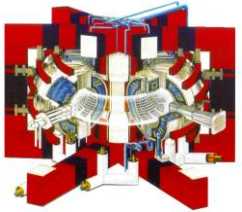
150 millions de degrés (cœur plasma)

Pression

quelques atmosphères (qq grammes)

Temps de refroidissement quelques secondes

Des cœurs de mieux en mieux isolés...



Tore Supra

25 m³

~ 0 MW_{th}

Autochauffage

0%

JET

80 m³

~ 16 MW_{th}

Autochauffage

10%

ITER

830 m³

~ 500 MW_{th}

Autochauffage

70%

Réacteur

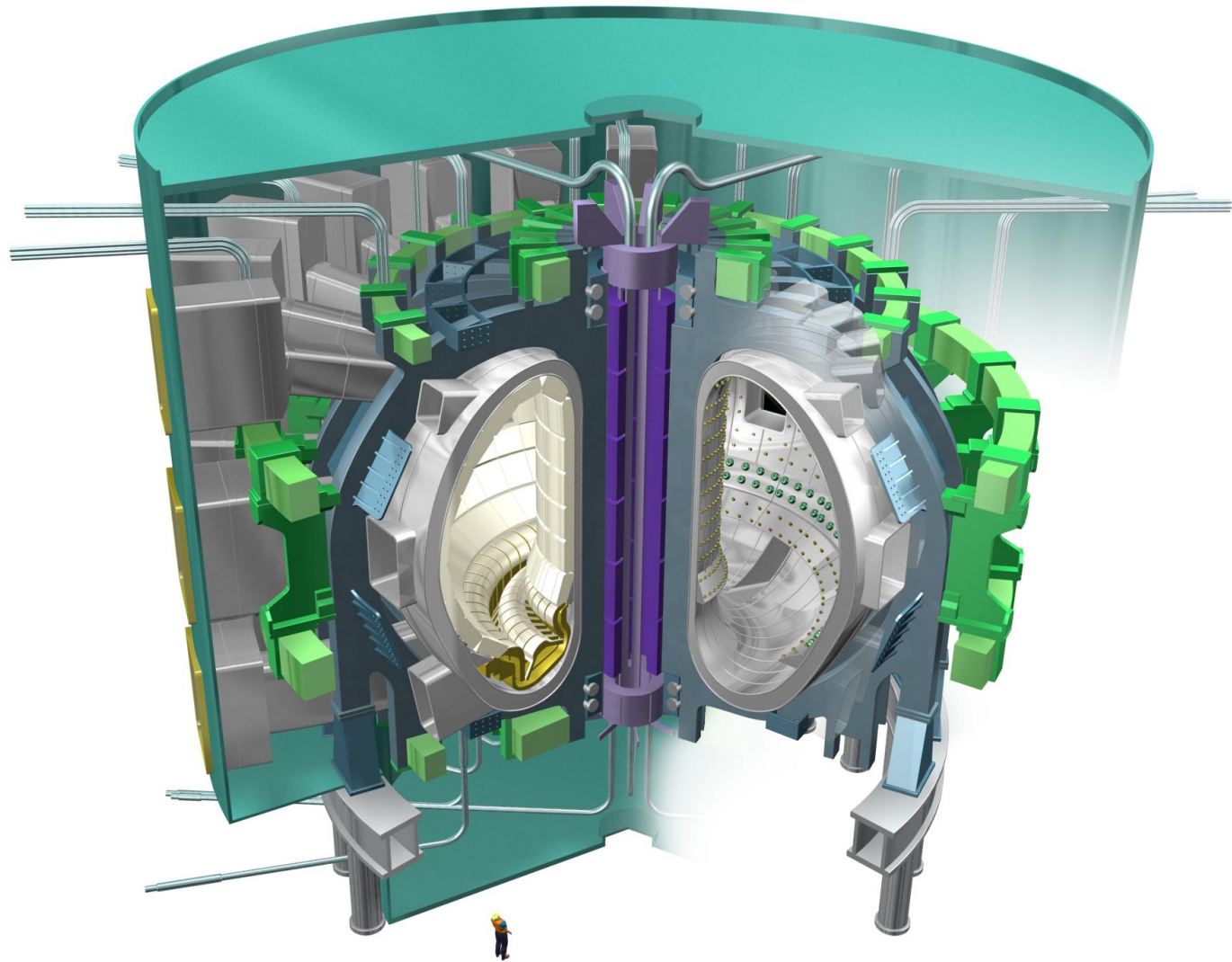
~ 1000 - 3500 m³

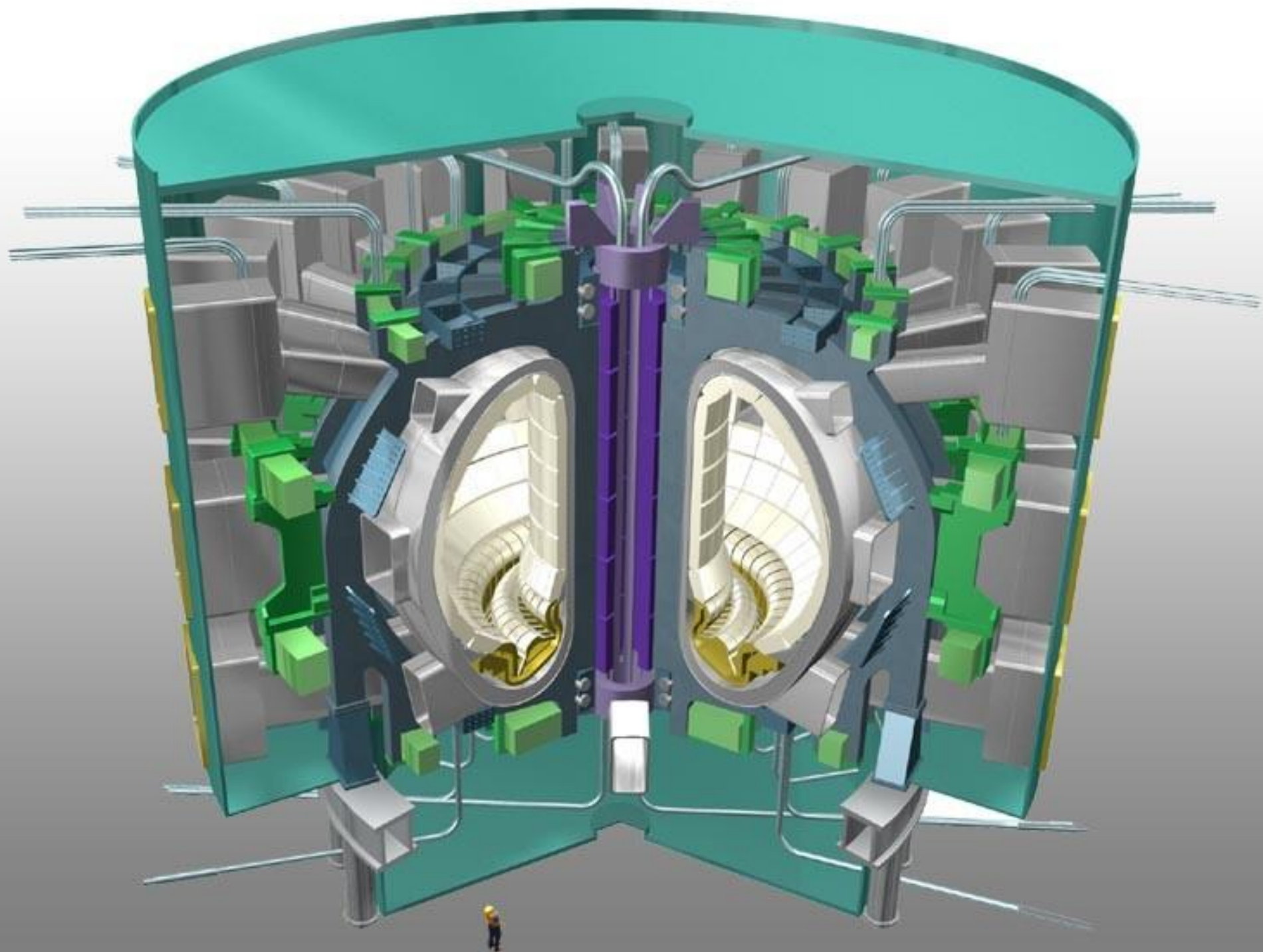
~ 3000 - 5000 MW_{th}

Autochauffage

80-90%

A quoi ressemblerait un réacteur de fusion magnétique?





Les combustibles de la fusion



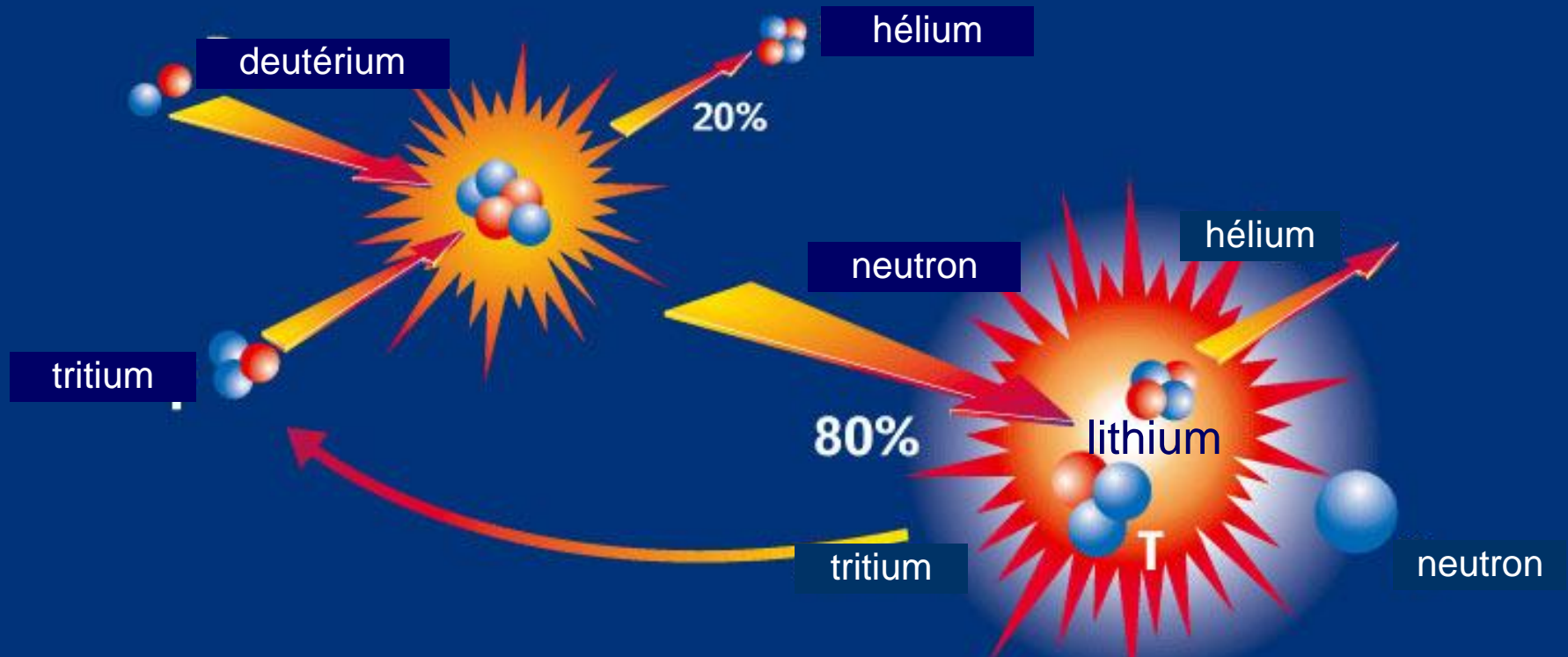
Combustibles & cendres de la fusion D-T



Deutérium 33g/m³ d'eau  *milliards d'années de combustible*



Produire du tritium à partir de lithium



Combustibles & cendres de la fusion D-T



Combustibles fusion D-T



deutérium / lithium

Cendre fusion D-T



hélium

Deutérium 33g/m³ d'eau



milliards d'années

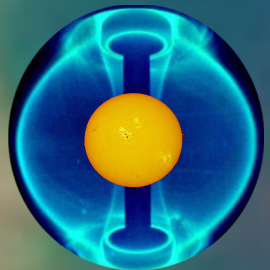
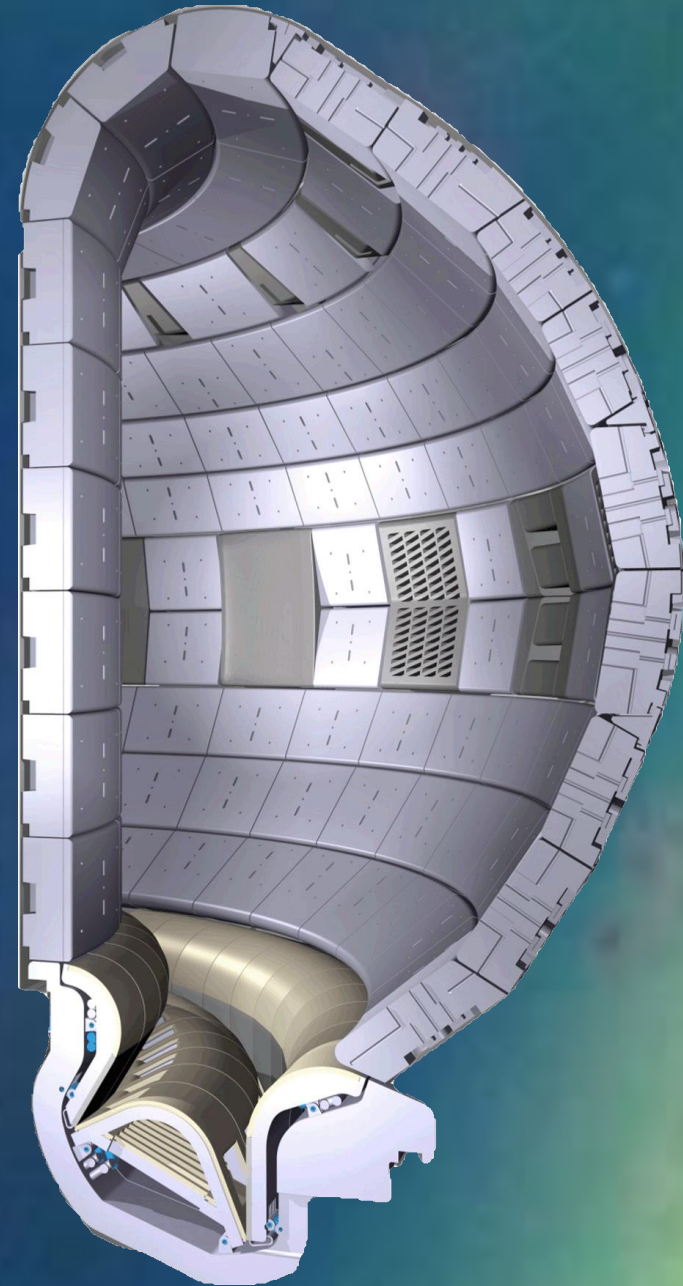
Lithium 0.17g/m³ d'eau



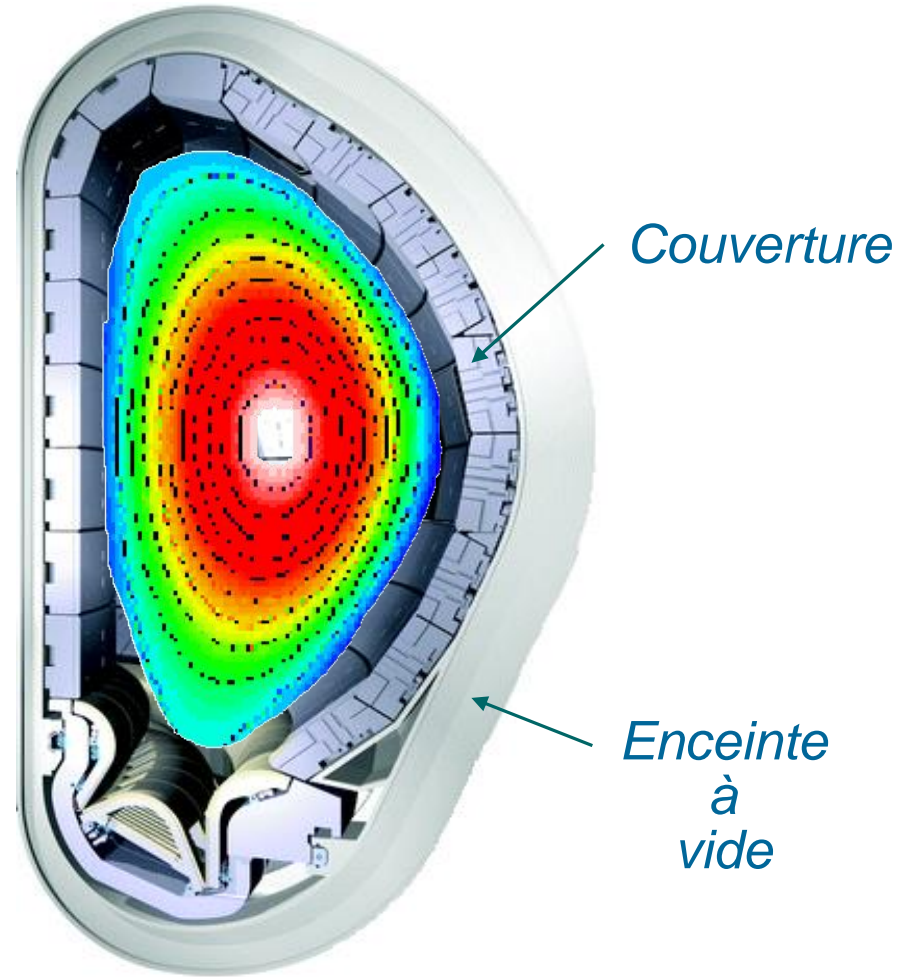
millions d'années



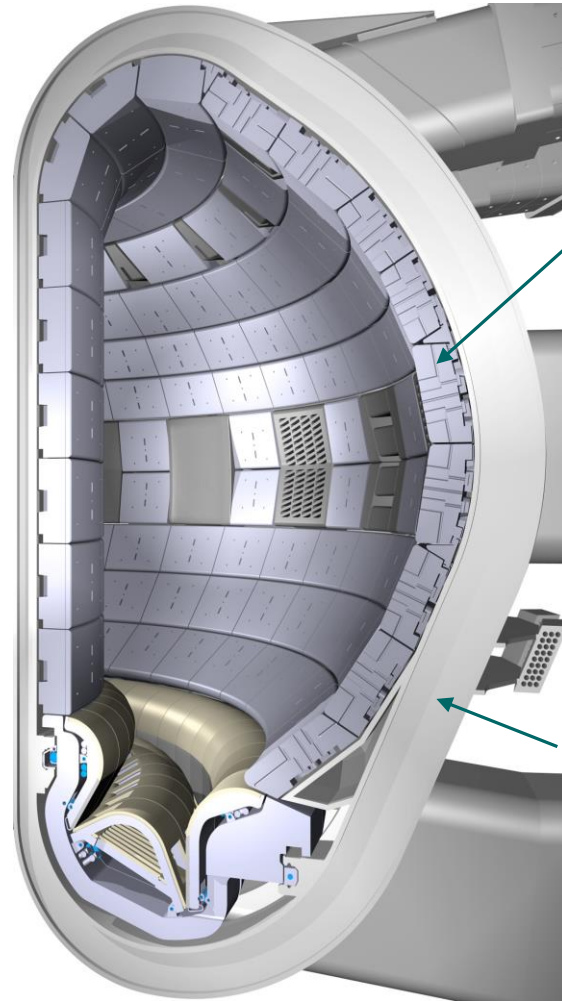
Couverture



Couverture



Couverture



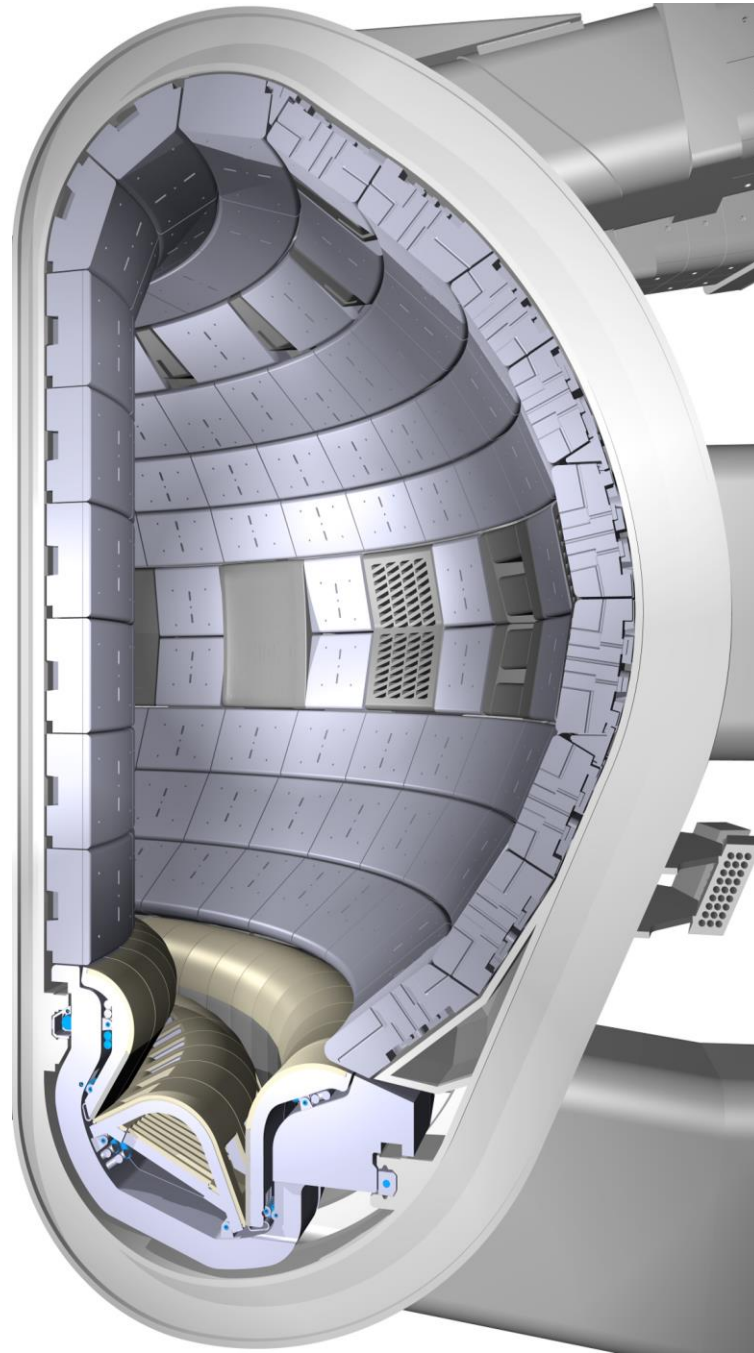
Couverture

Enceinte
à
vide

Couverture

Contient
du lithium

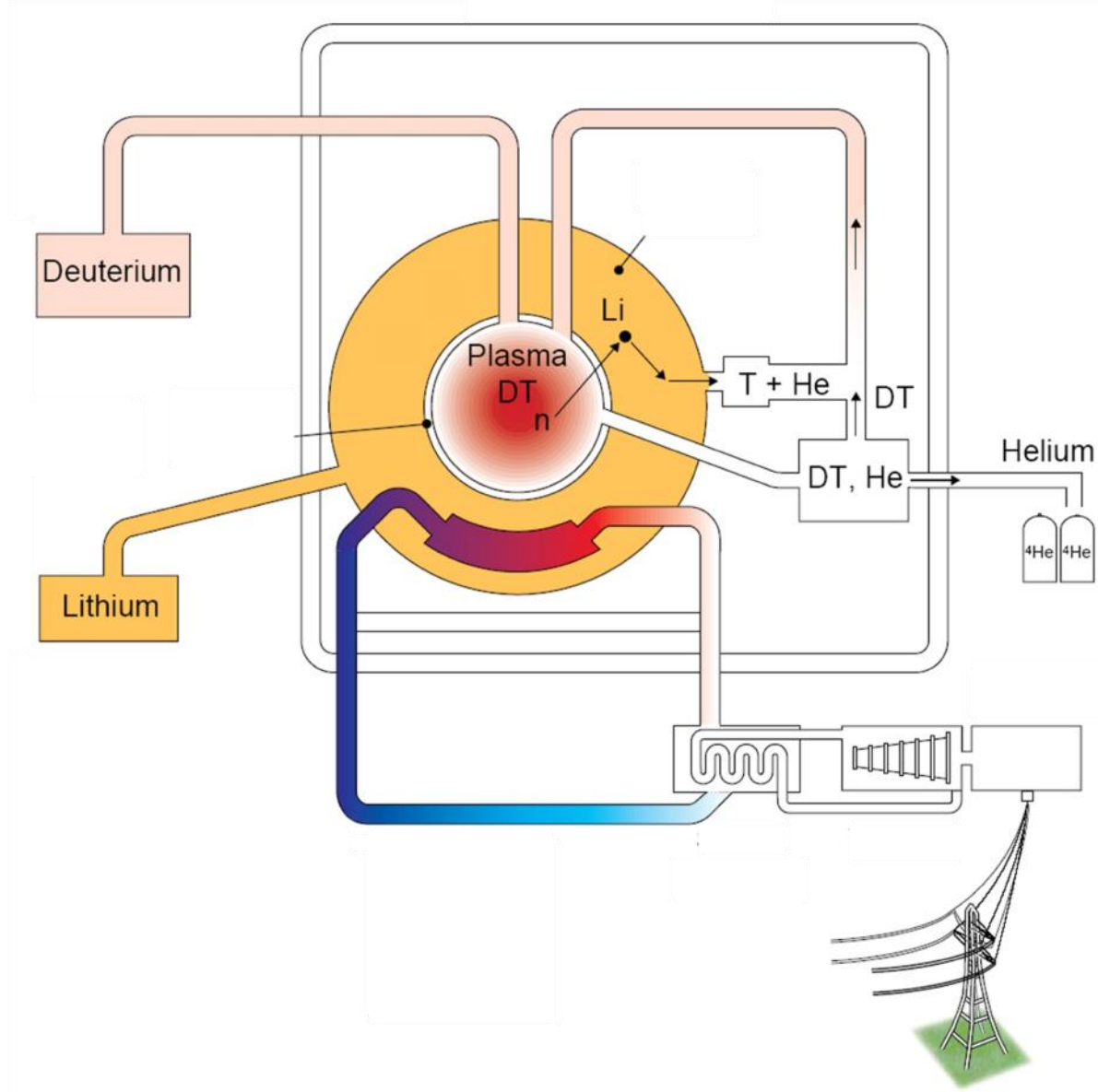
L'impact
des
neutrons
sur le lithium
produit le
tritium



Transforme
en chaleur
l'énergie
des neutrons

Protège
l'enceinte
des neutrons

Schéma d'un réacteur de fusion D-T



La fusion une énergie sûre et propre?

MANIFESTATION SAMEDI 26 MARS PERTUIS



DÉPART 14H30 STADE DU FARIGOULIER



Les Verts

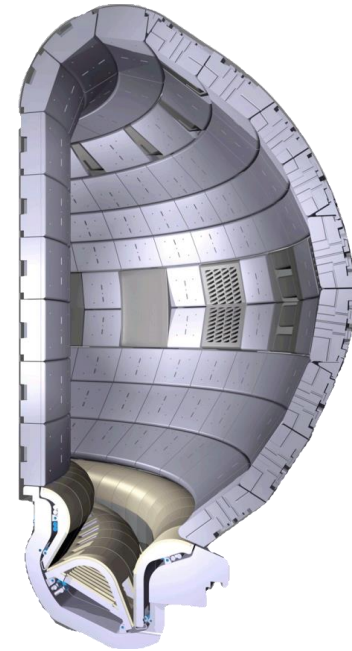
ITER tue

LCR

MEDIANE

Une énergie propre?

La plupart des neutrons:



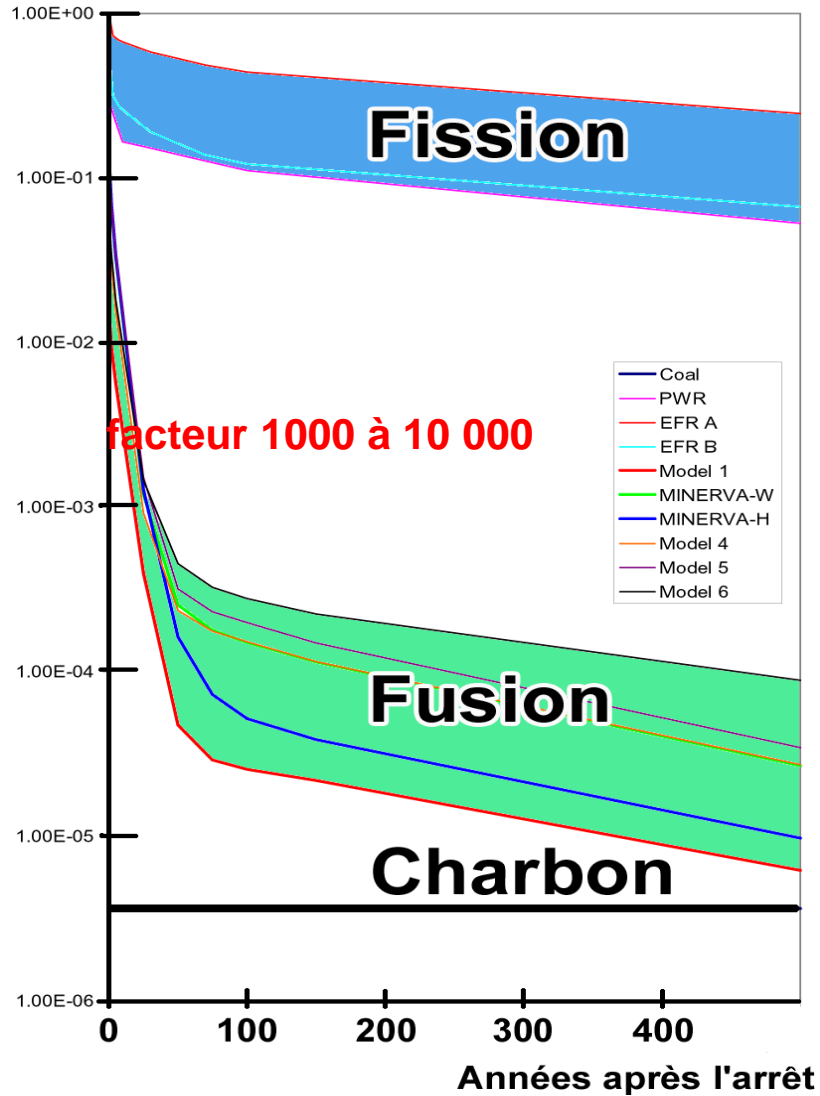
Couverture en lithium liquide

Pas de déchets...

Pas de vieillissement des matériaux sous neutrons 14 Mev...

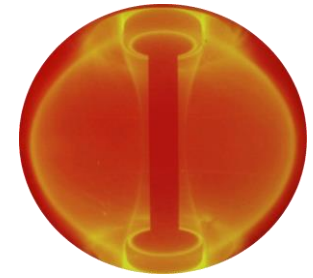
Une énergie propre?

Radioactivité relative
(ingestion)



*Pas de déchets transmis à nos
petits enfants...*

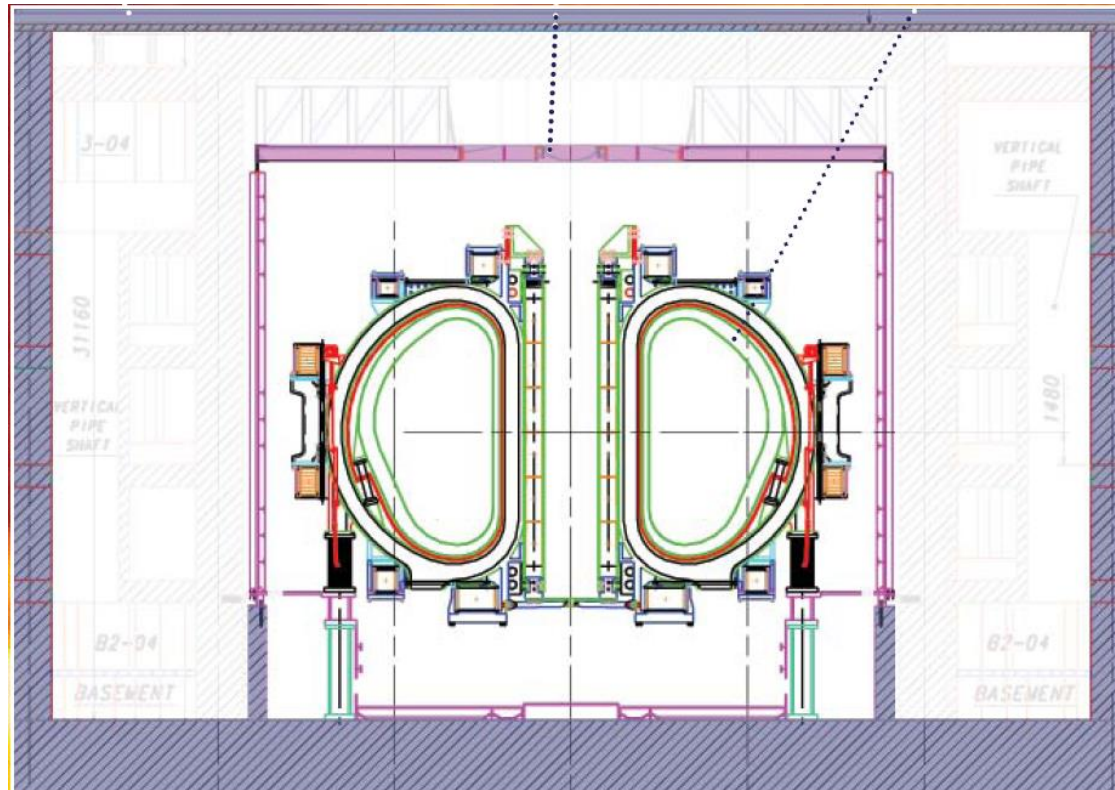
Une énergie sûre?



3 bâtiment dépressurisé

2 cryostat sous vide

1 enceinte à vide

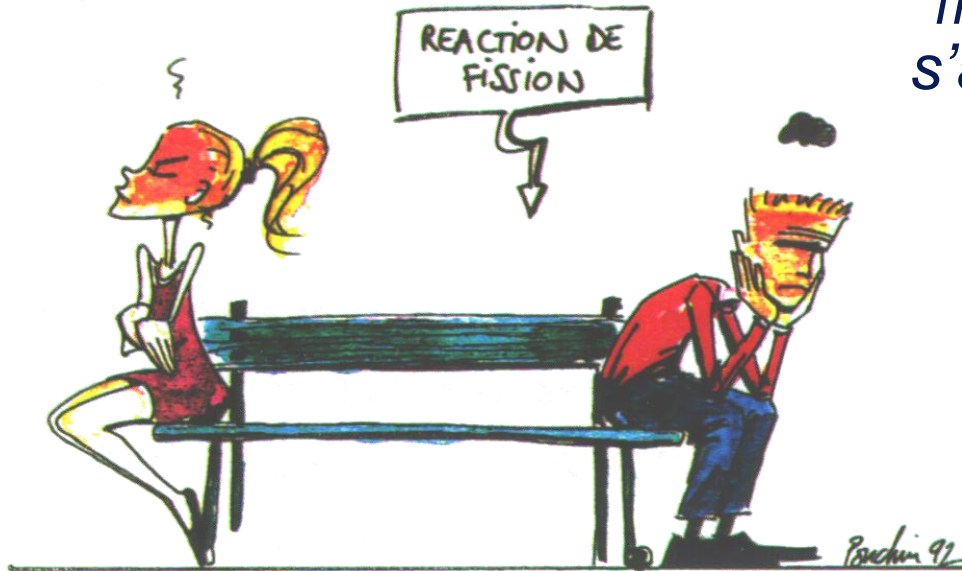


Accident majeur d'ITER 1.5 gramme de tritium

dose maximale conditions météo défavorables : 0.2 mSv (< 10% dose annuelle)

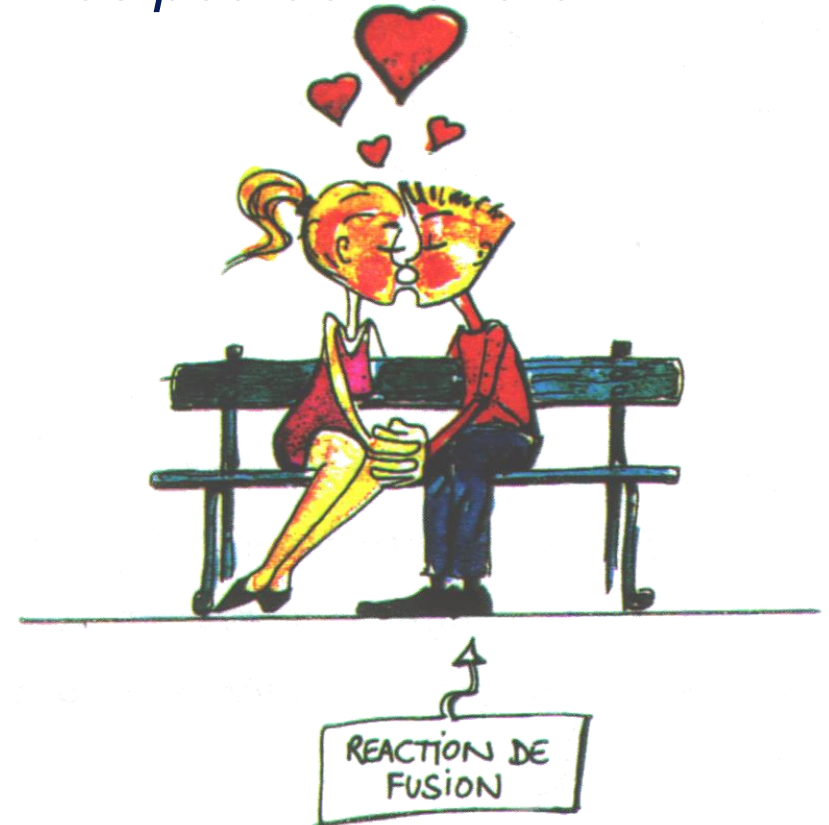
Risque cancer ~ 1 paquet de cigarettes

Fission / Fusion



Fission
réactions en chaîne
éviter l'emballement...

Fu&on
chaud, très chaud
fragile, ça a tendance à refroidir
s'arrête à la moindre perturbation
très peu de matière...



The image shows the interior of a tokamak fusion reactor, characterized by its complex, multi-layered metallic structure. The walls are composed of numerous small, rectangular tiles, each with a grid of small holes. The lighting is dramatic, with bright highlights on the metallic surfaces and deep shadows in the recesses, creating a sense of depth and complexity. The overall color palette is dominated by metallic grays and silvers, with some warmer tones from the lighting.

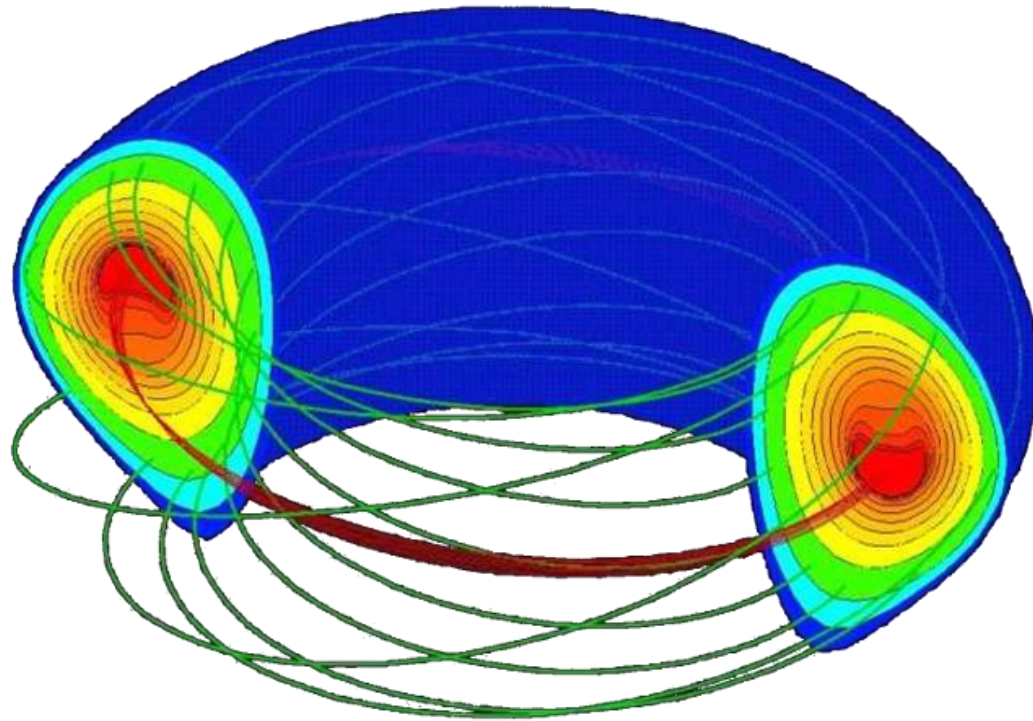
Les défis de la fusion

A glowing blue heart diagram with a central vertical bar and the text 'Un cœur bien isolé'. The heart is depicted in a stylized, glowing blue color, with a central vertical bar running through its center. The text 'Un cœur bien isolé' is written in a yellow, cursive font across the heart. The background is a dark, textured blue.

Un cœur

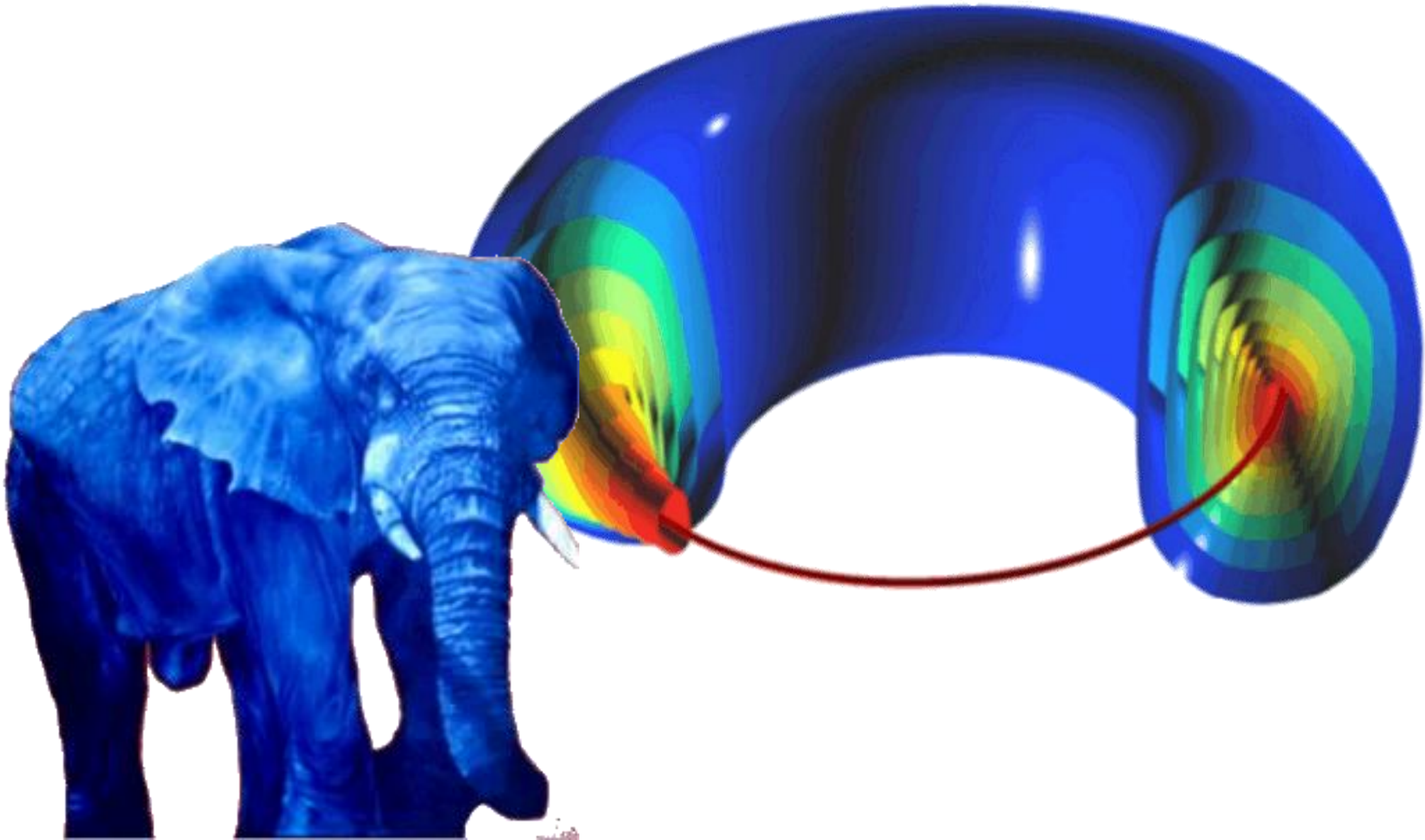
bien isolé

Loin de l'équilibre thermodynamique...

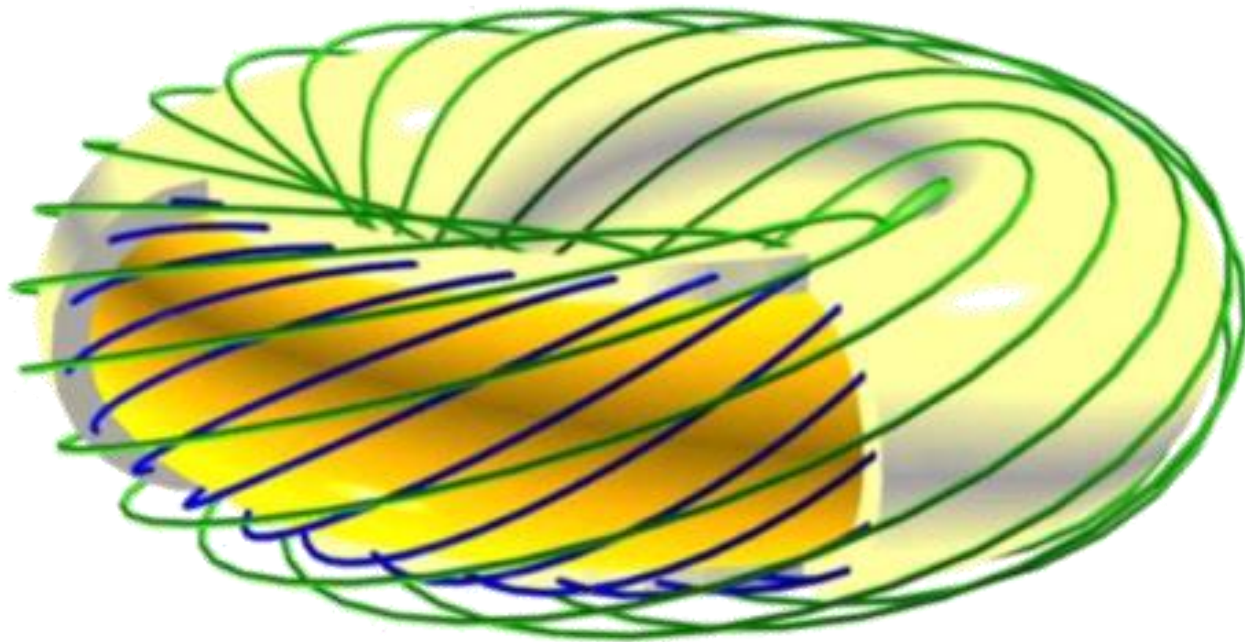


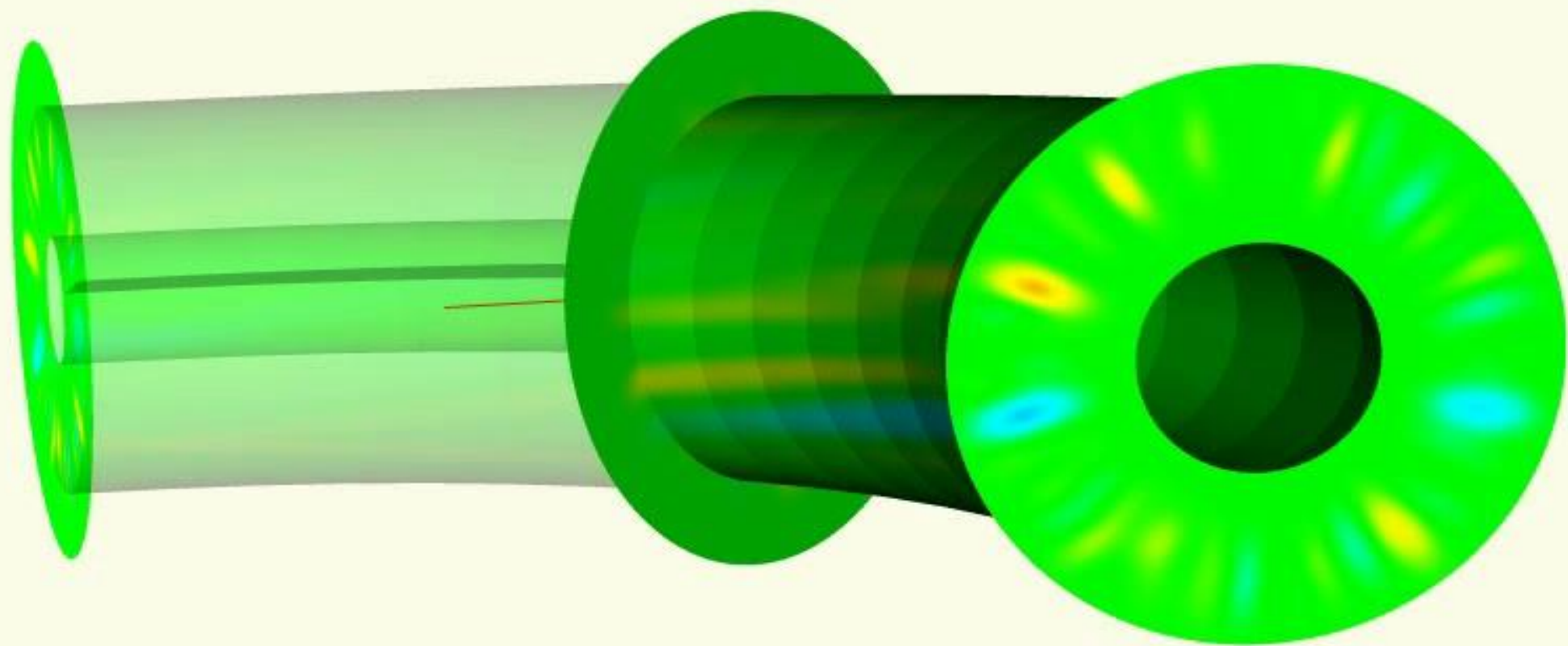
" Confining plasma with magnetic fields is much like trying to contain Jell-O with rubber bands"

Suffit-il d'augmenter l'épaisseur d'isolant?

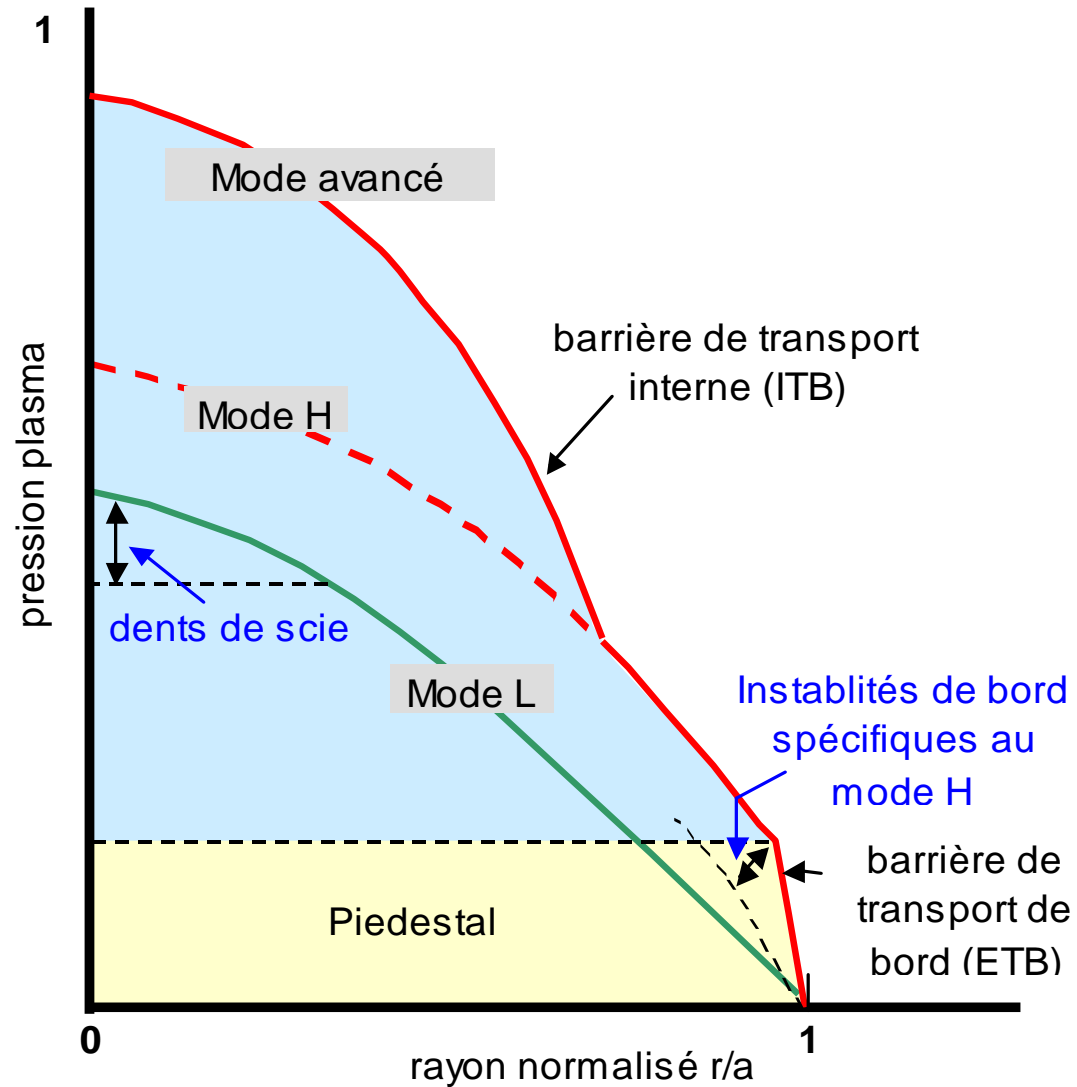


Cisaillement des lignes de champ



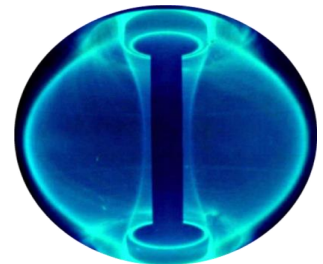
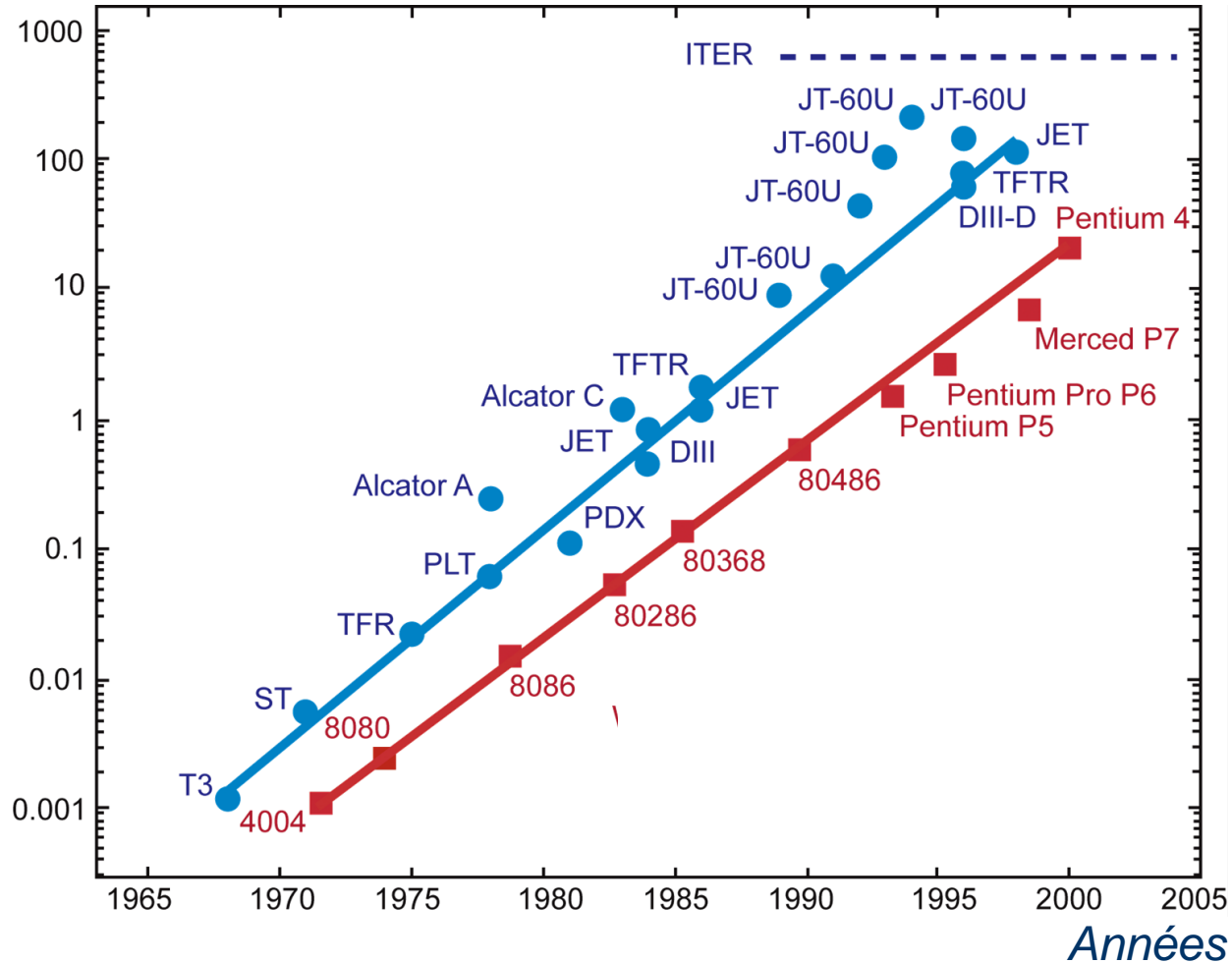


Des régimes de confinement améliorés...



La seule constante de temps de la fusion est-elle 50 ans?

Performances



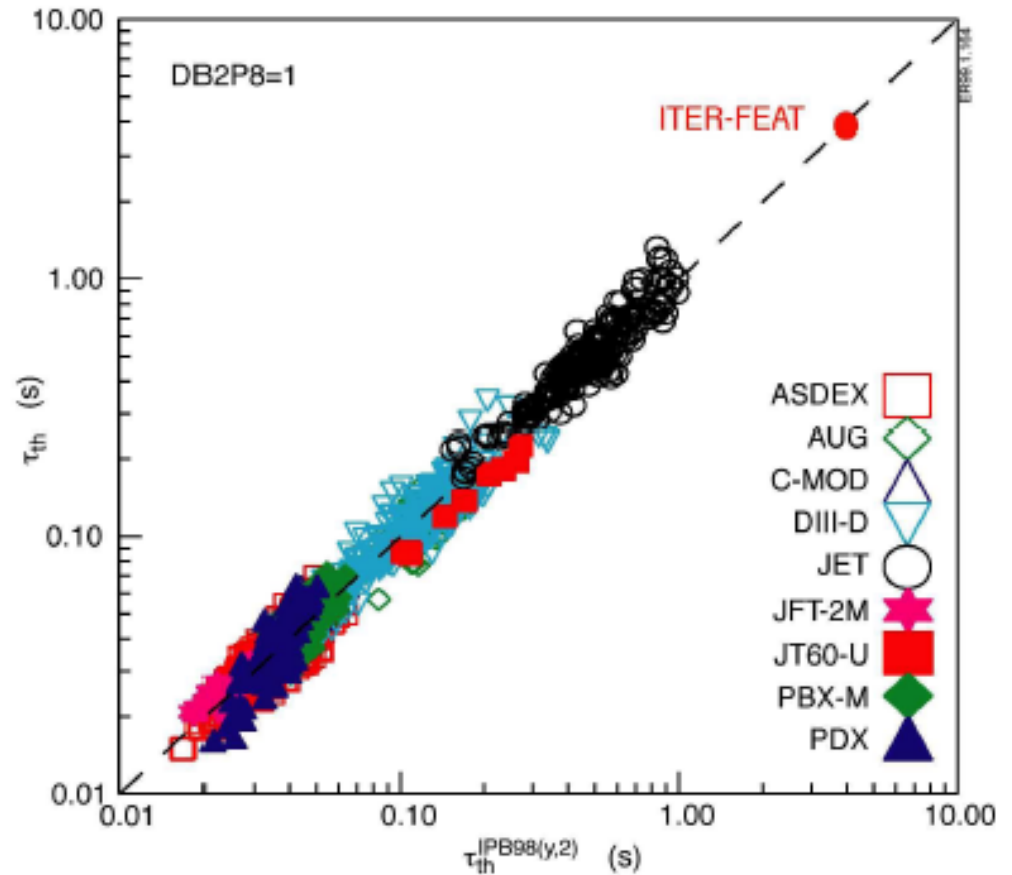
ITER une extrapolation raisonnable?

Physique des plasmas :
Fokker-Planck + Maxwell
Non linéarités, couplage

$$\beta = \frac{p}{B^2/2\mu_0}$$

$$\rho_* = \frac{\rho_c}{a}$$

$$v_* = \frac{v_{coll}}{c_s/a}$$



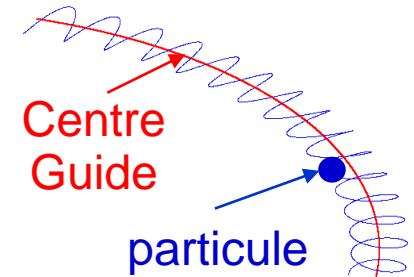
Vérifié sur plus de deux ordres de grandeur

code Gyrocinétique SEmi-LAgrangien

Description fluide insuffisante

2000: gyrocinétique (5D) \neq fluide (3D)

2001: DOE **S**cientific **D**iscovery through **A**dvanced **C**omputing



Gyrocinétique semi-Lagrangien

Transport aux grandes échelles

équilibre + fluctuations

Projet "Grand Challenge": simulation non linéaire sur "Tera10"

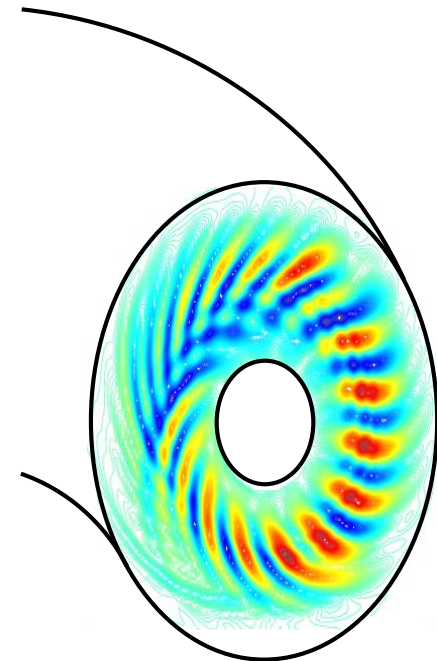
70 h avec 64 processeurs (sur 4352):

Grille 5D \sim 1 milliard de points ($256 \times 256 \times 64 \times 32 \times 16$)

Transport ITER

53 jours avec 4000 processeurs:

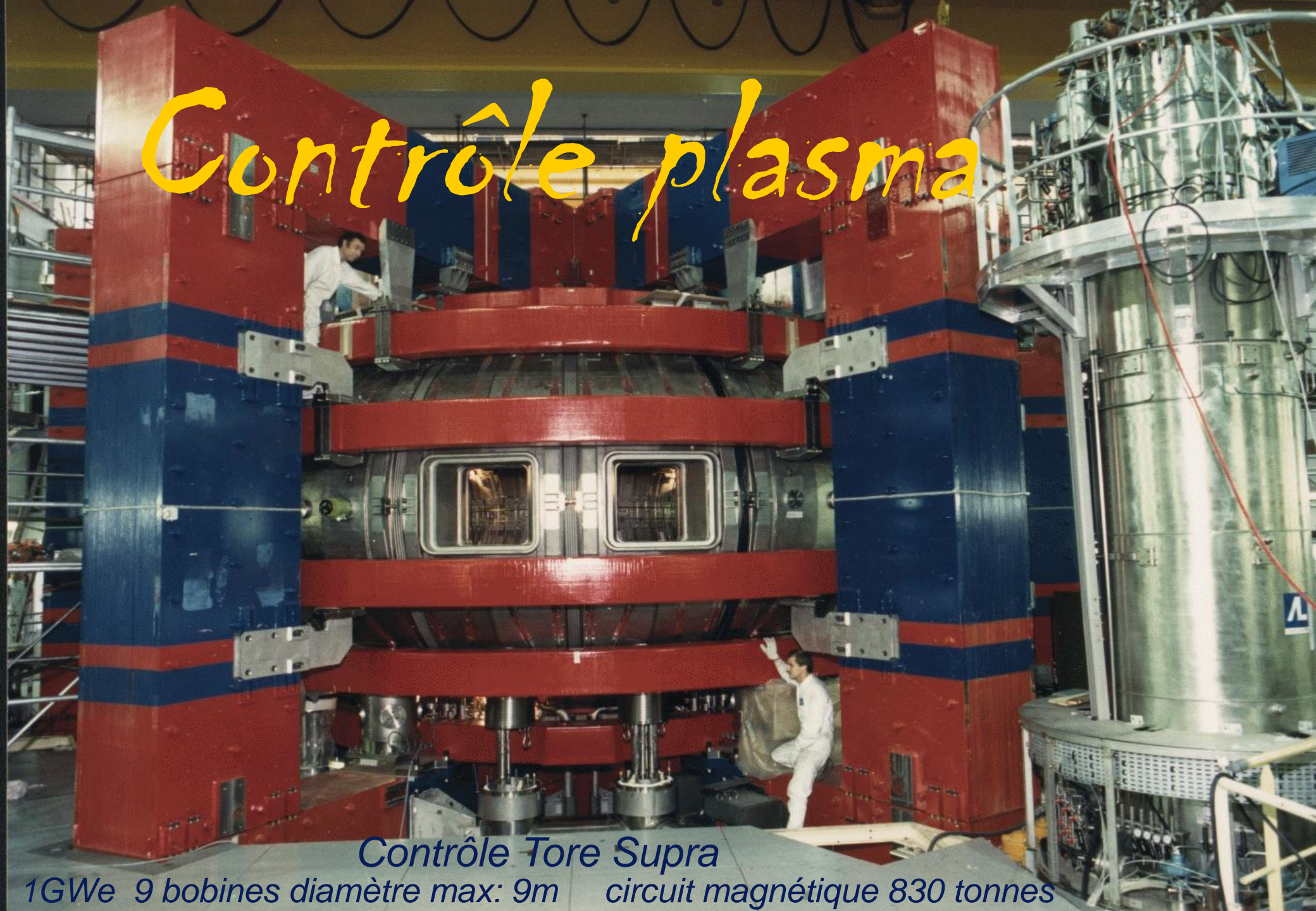
Grille 5D \sim 50 milliards de points ($512 \times 512 \times 256 \times 64 \times 10$)



*On n'a toujours pas résolu les équations de Navier-Stokes
et pourtant les avions volent...*



Contrôle plasma



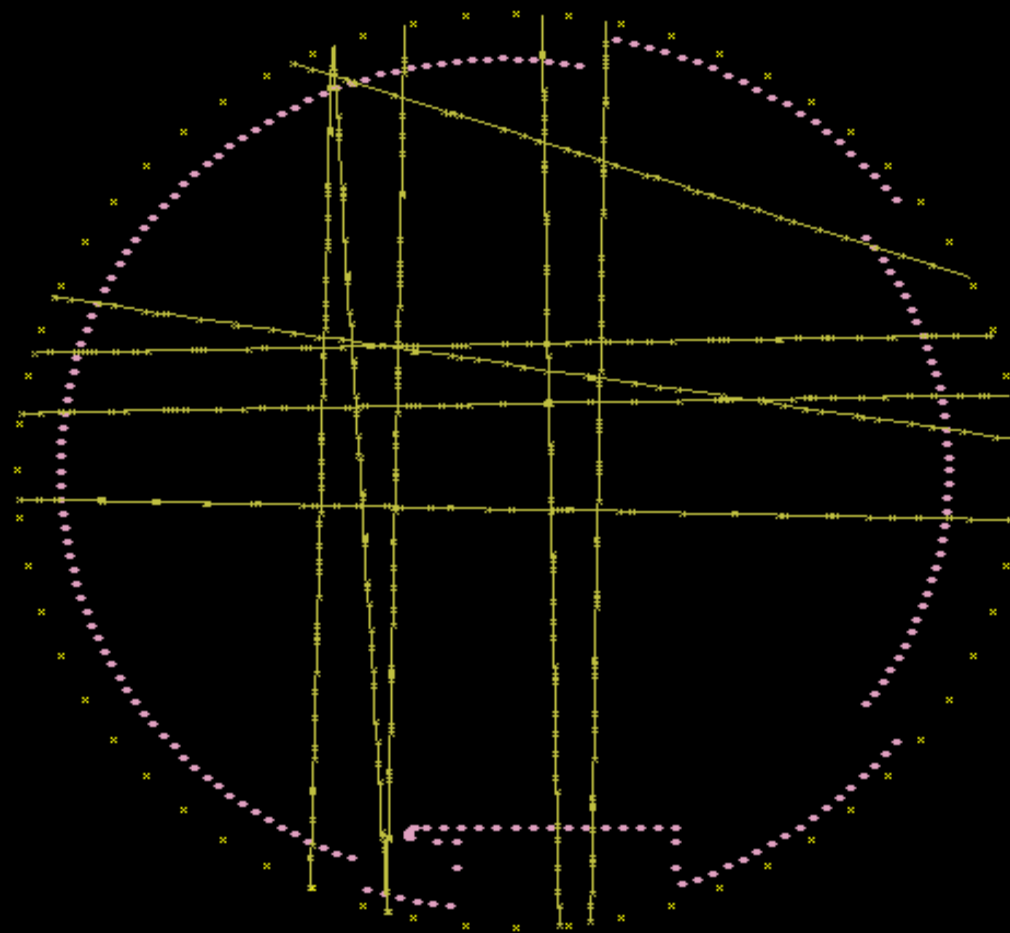
Contrôle Tore Supra

1GWe 9 bobines diamètre max: 9m circuit magnétique 830 tonnes

30 juin 2005



Plasma isoflux
#29620 at 0.001770s



RAXIS=0.000

ZAXIS=0.000

[XLOC]:
Ip=0.000000e+000
psi_b=0.000
psi_s=0.000
psi_u=0.000
RX=0.000
ZX=0.000
RXU=0.000
ZXU=0.000
XL

[EFIT]:
PSIA=0.000
PSIB=0.000
|PSIA-PSIB|=0.000

QAX=0.000

Q95=0.000

BETAP=0.000

LI=0.000000

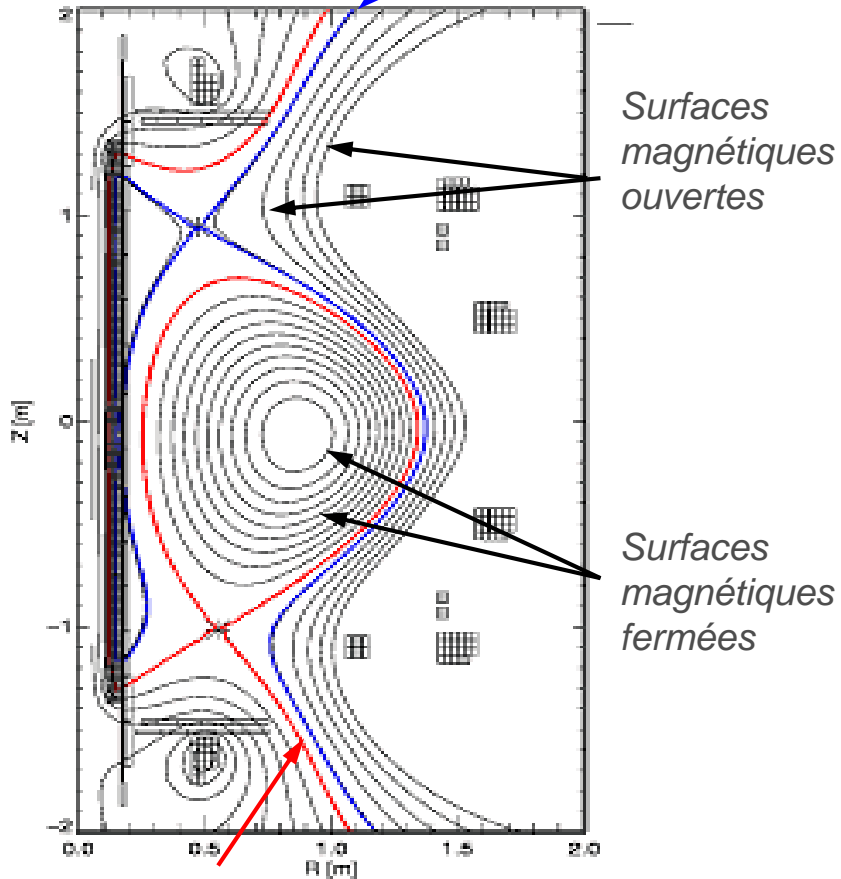
NEVL=0.000e+000



*Interaction
plasma-paroi*

Interaction plasma-paroi

Surface magnétique ouverte avec point de champ nul



Séparatrice première surface magnétique ouverte

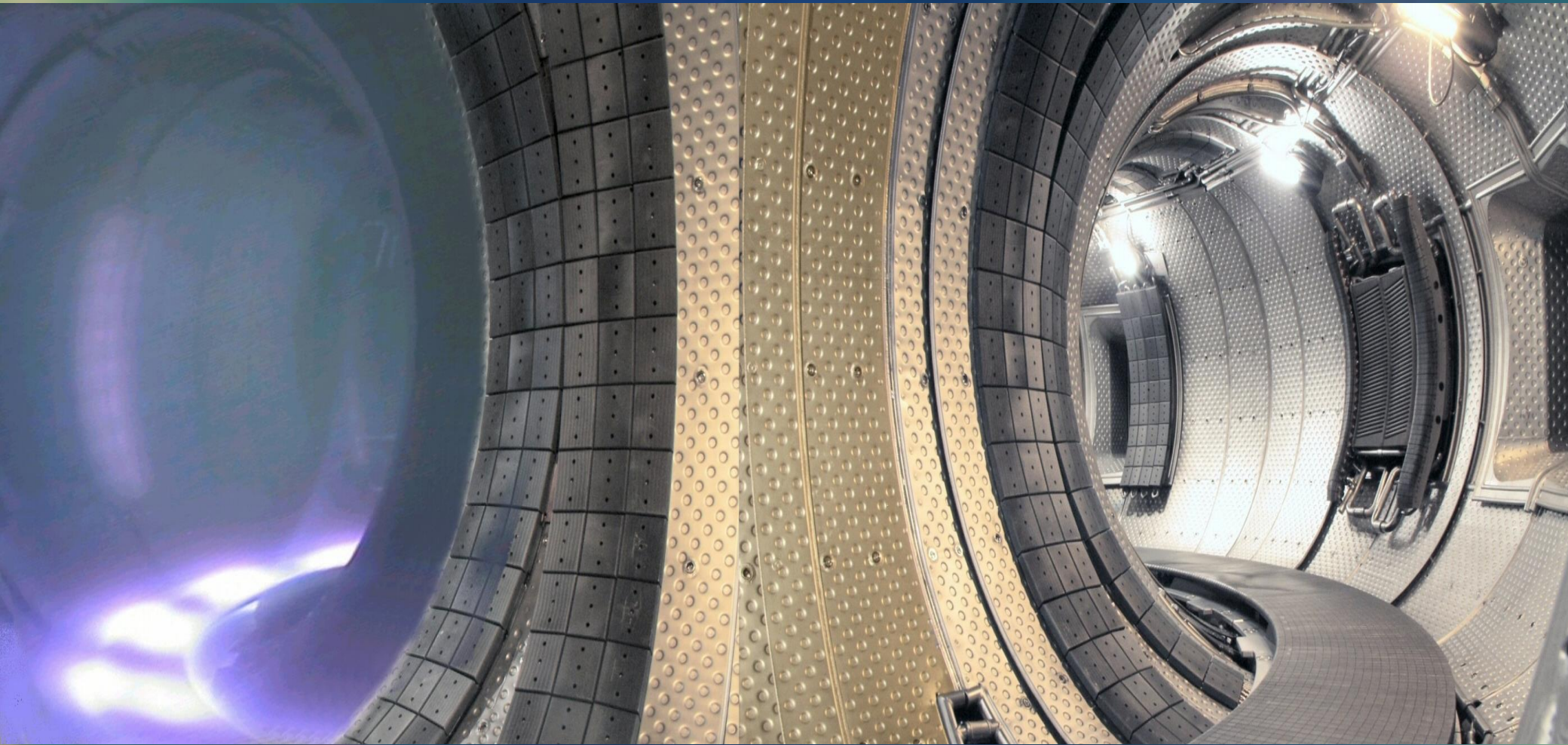


Le flux de chaleur, mal réparti, est très élevé

10 MW/m²

$10 \text{ MW} / \text{m}^2$

$800 \text{ K} / \text{cm}$

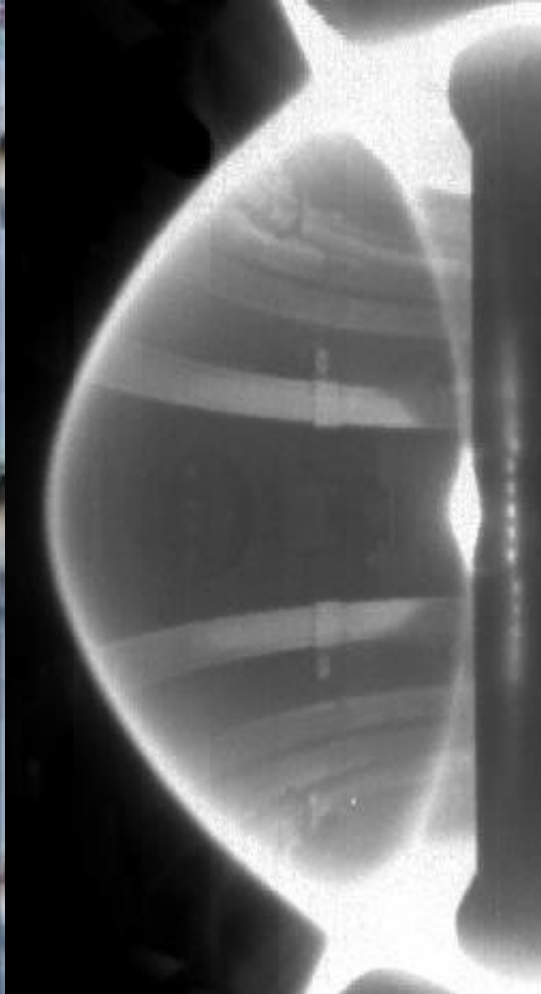
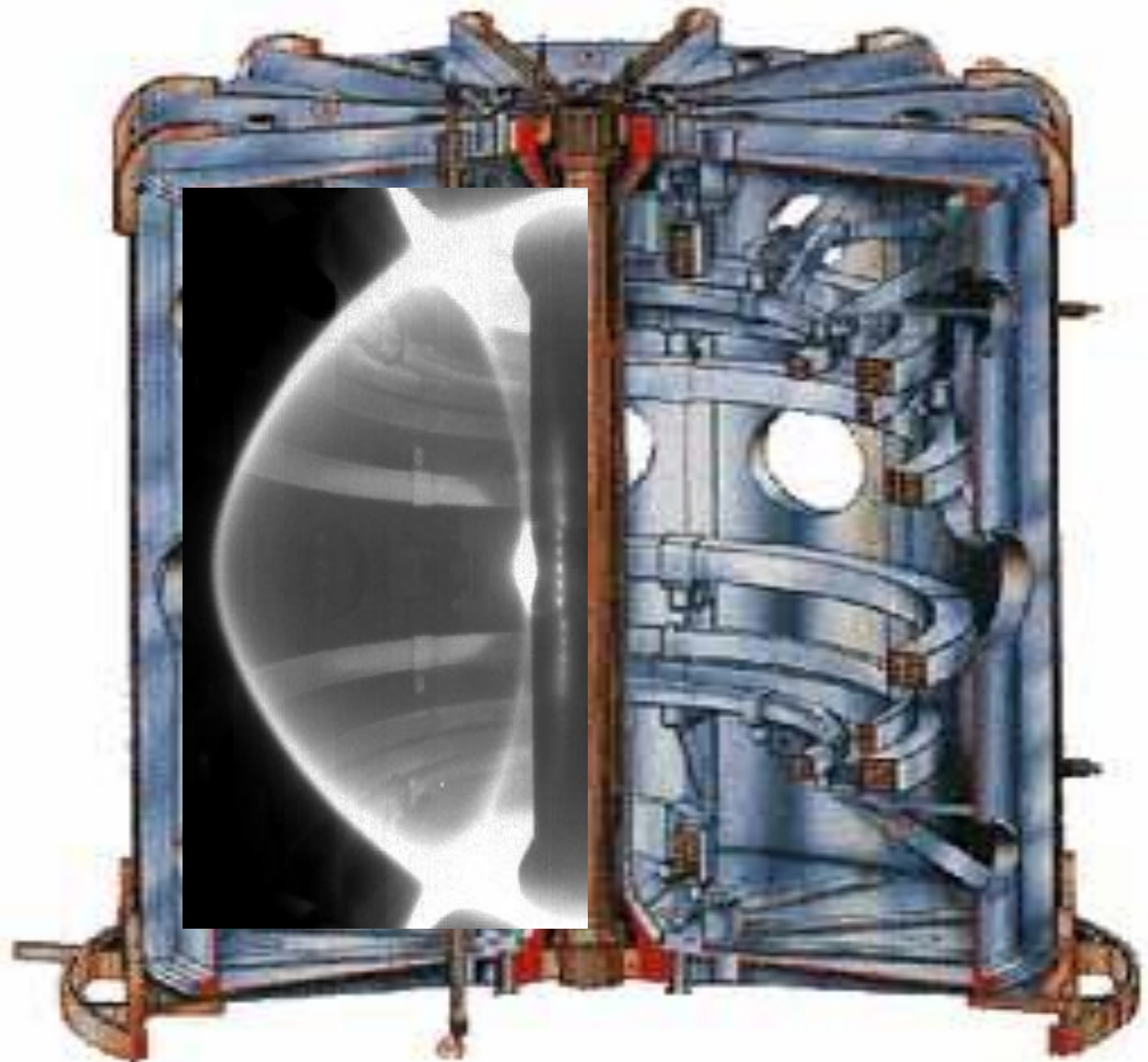


Tore supra

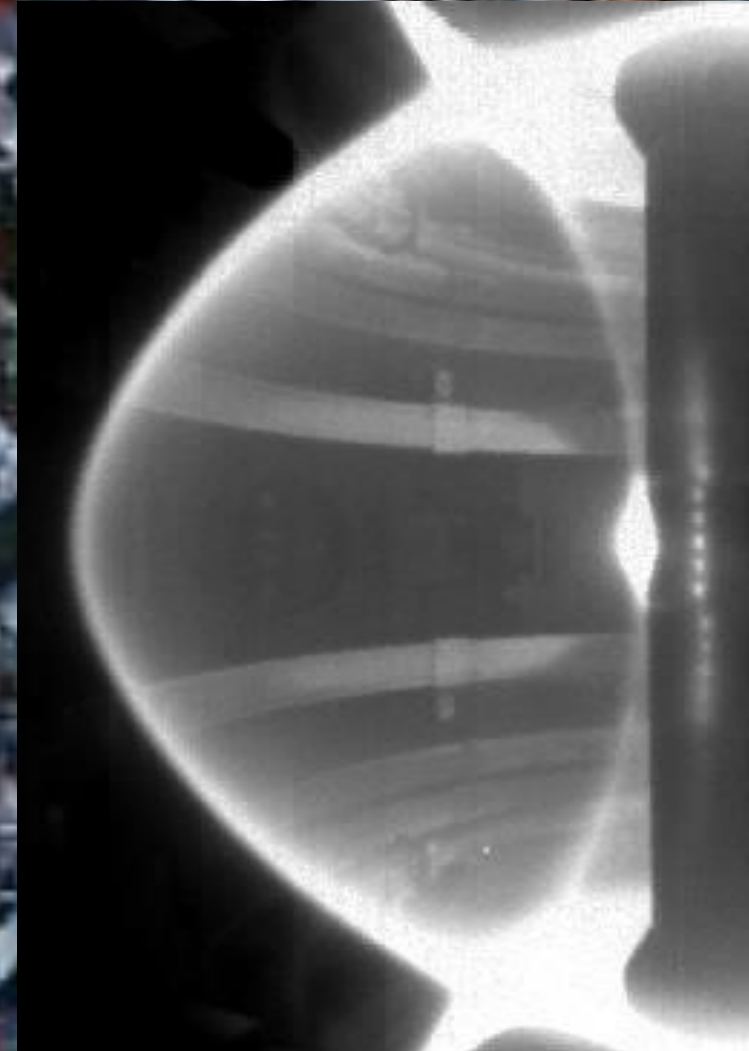
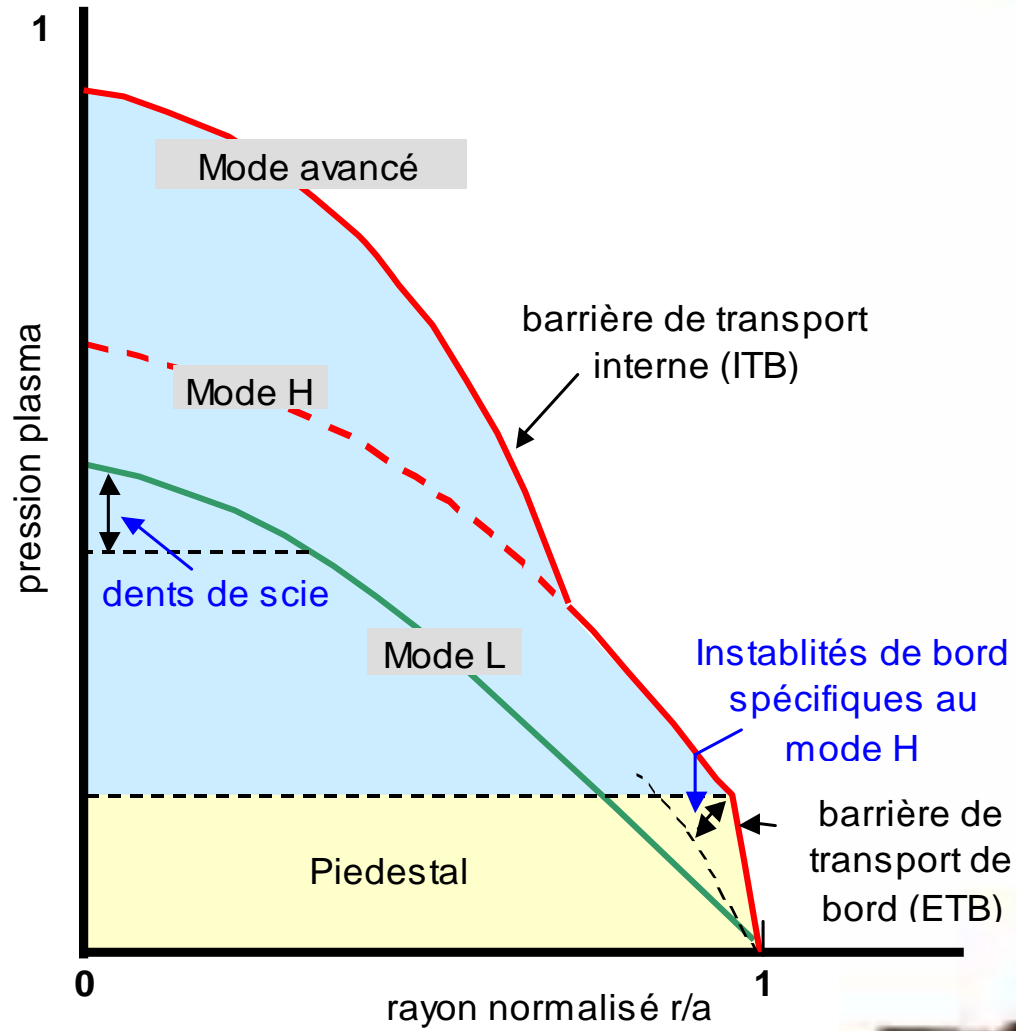
2003 record du monde: six minutes...



...à trois fois la température du centre du soleil

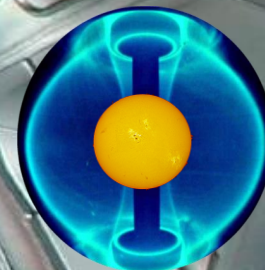


De brusques dépôts de chaleur...

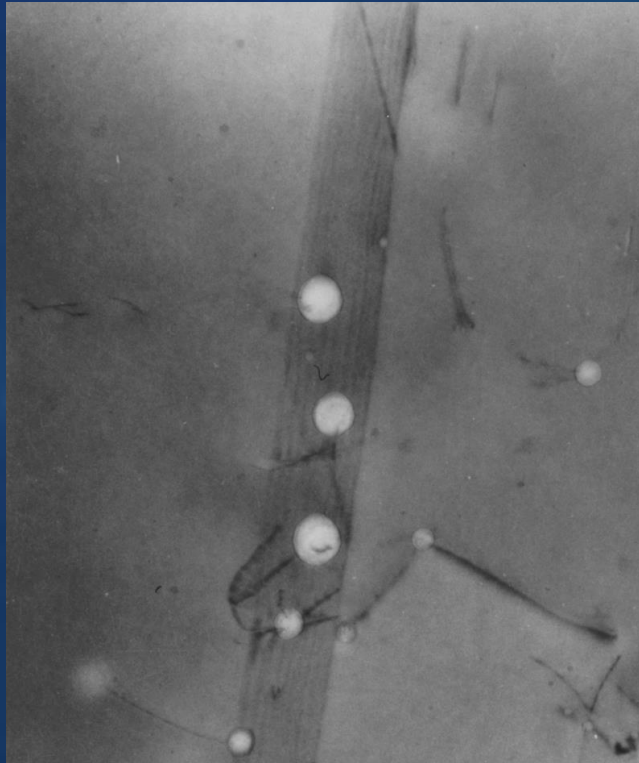


Matériaux un rude défi

Asdex Upgrade :
paroi Tungstène



Les neutrons très énergétiques peuvent arracher des morceaux aux noyaux des matériaux des premiers décimètres du bouclier



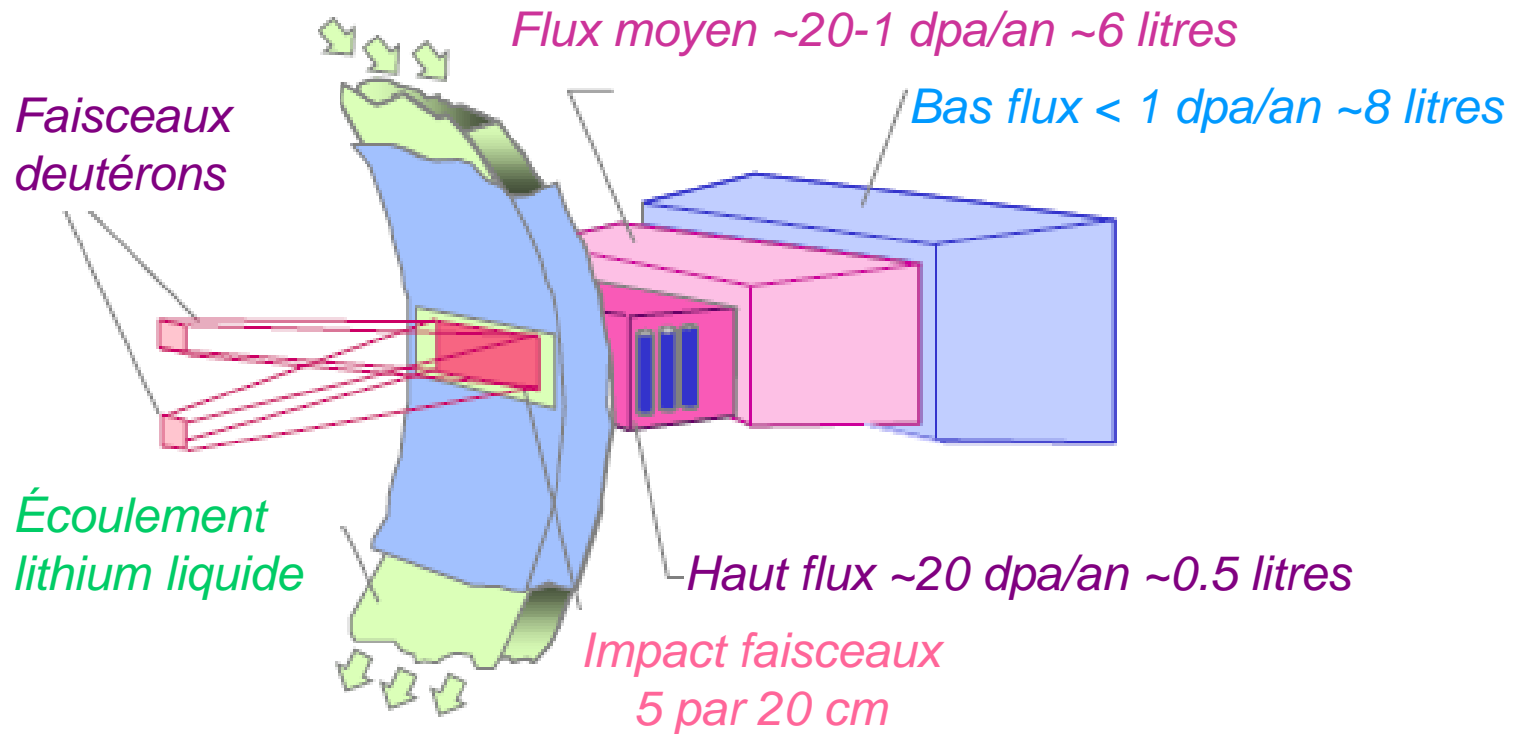
*Activation, apparition d'hydrogène et d'hélium
risque de fragilisation et de gonflement
fréquence de remplacement ?*

Test matériaux sous neutrons de 14 MeV IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility)

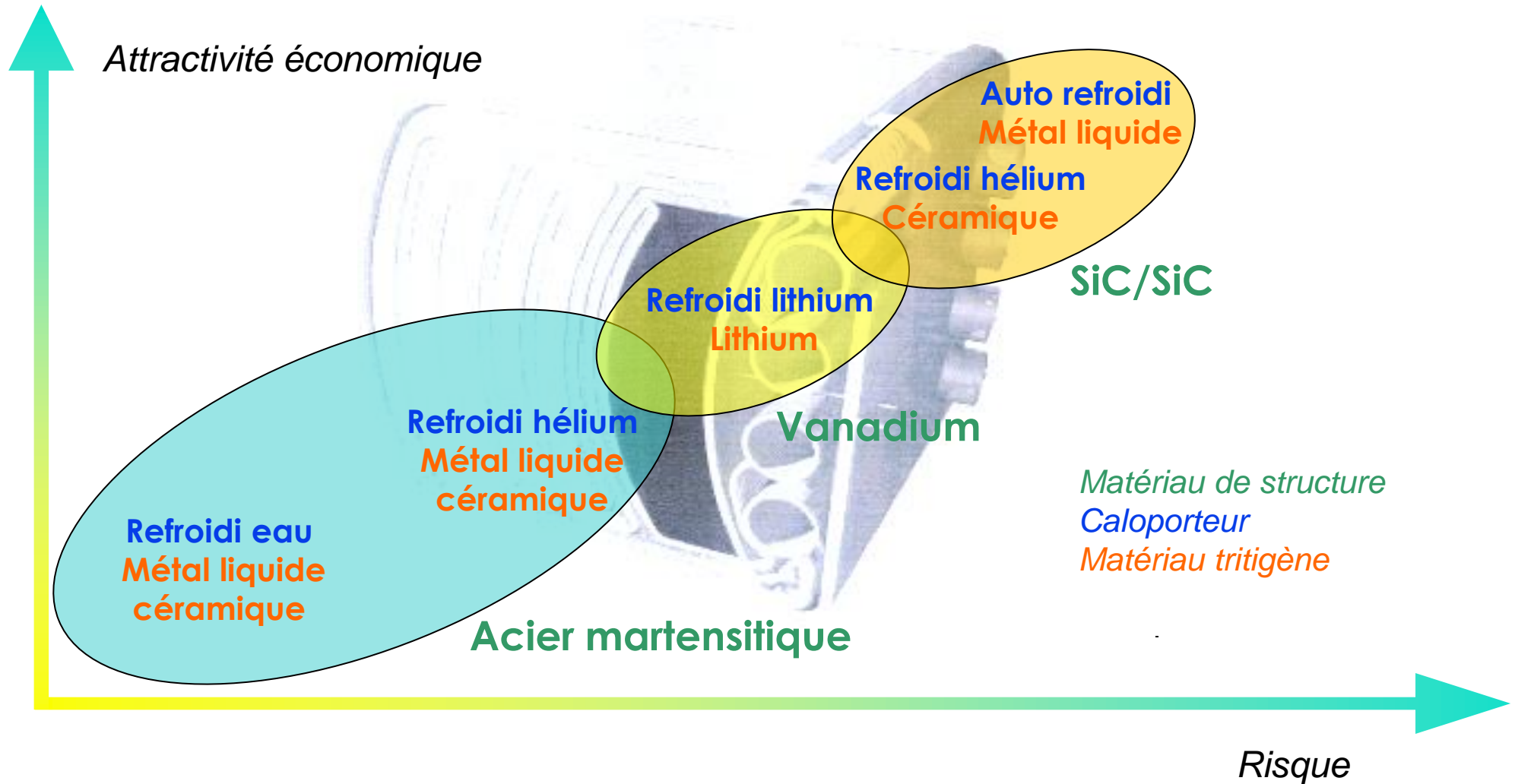
DAPNIA

Deuterons 32, 36 & 40 MeV 2 lignes 125 mA 5 par 20 cm²

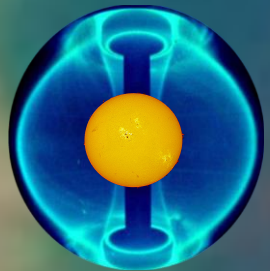
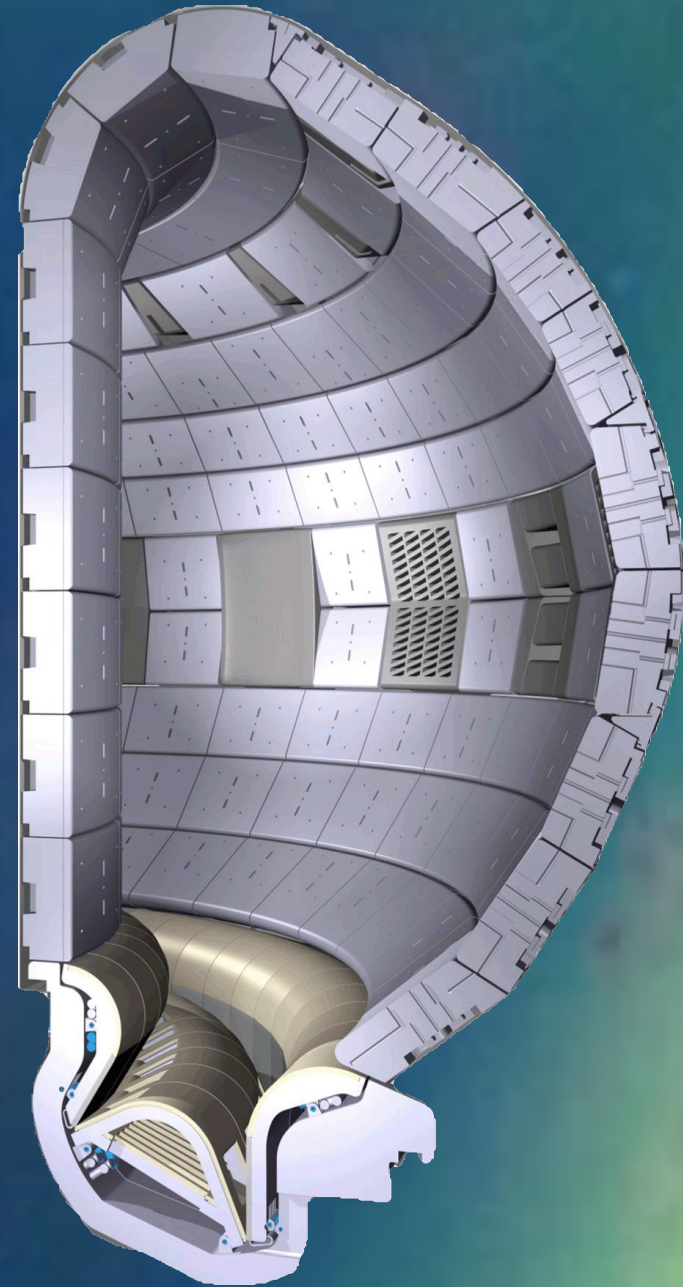
Réactions typiques : ${}^7\text{Li}(d,2n){}^7\text{Be}$, ${}^6\text{Li}(d,n){}^7\text{Be}$, ${}^6\text{Li}(n,T){}^4\text{He}$



Couverture tritigènes

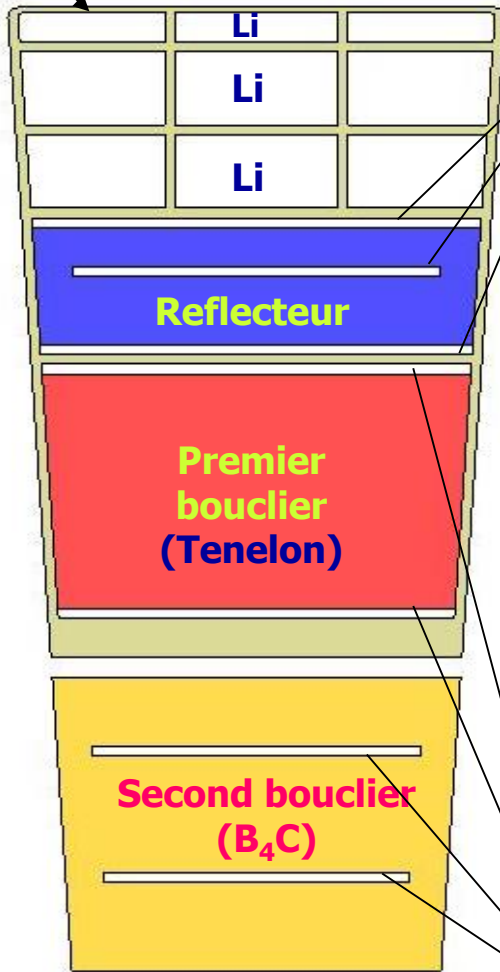


Couverture

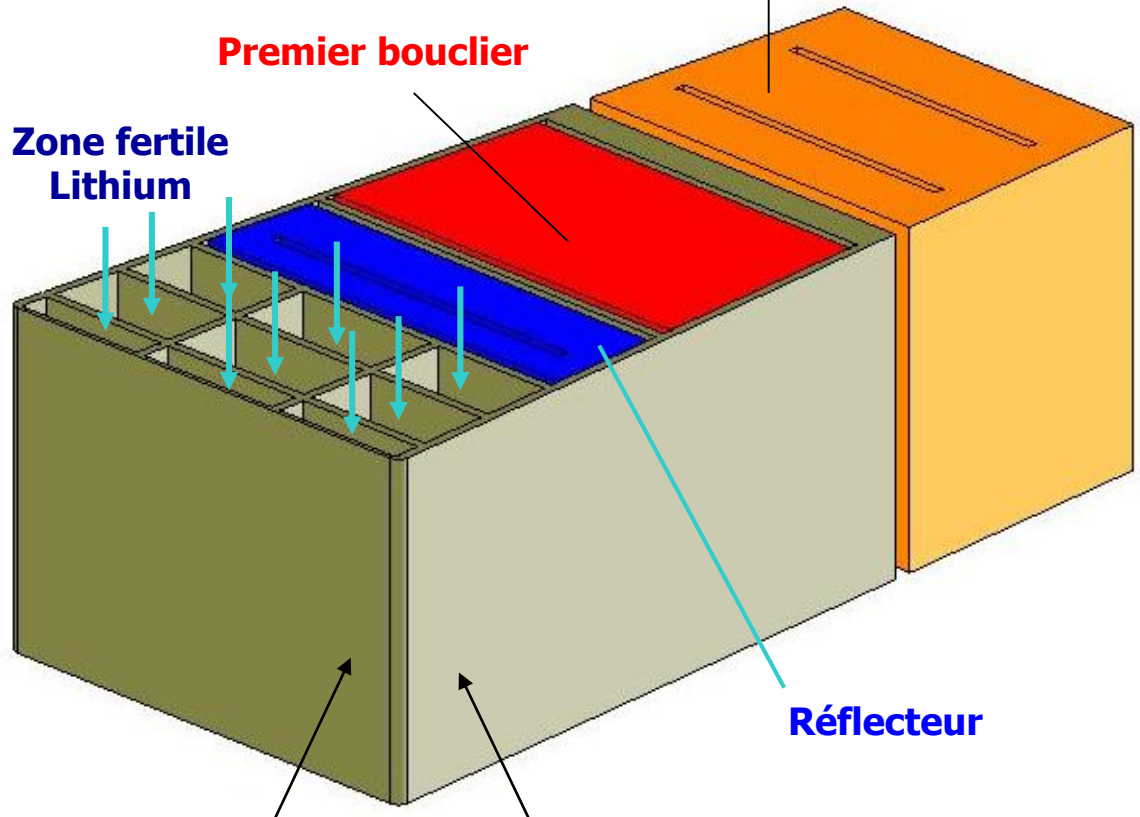


Couverture lithium / vanadium

Structure vanadium



Lithium



Second bouclier

Premier bouclier

Zone fertile
Lithium

Reflecteur

Premier
bouclier
(Tenelon)

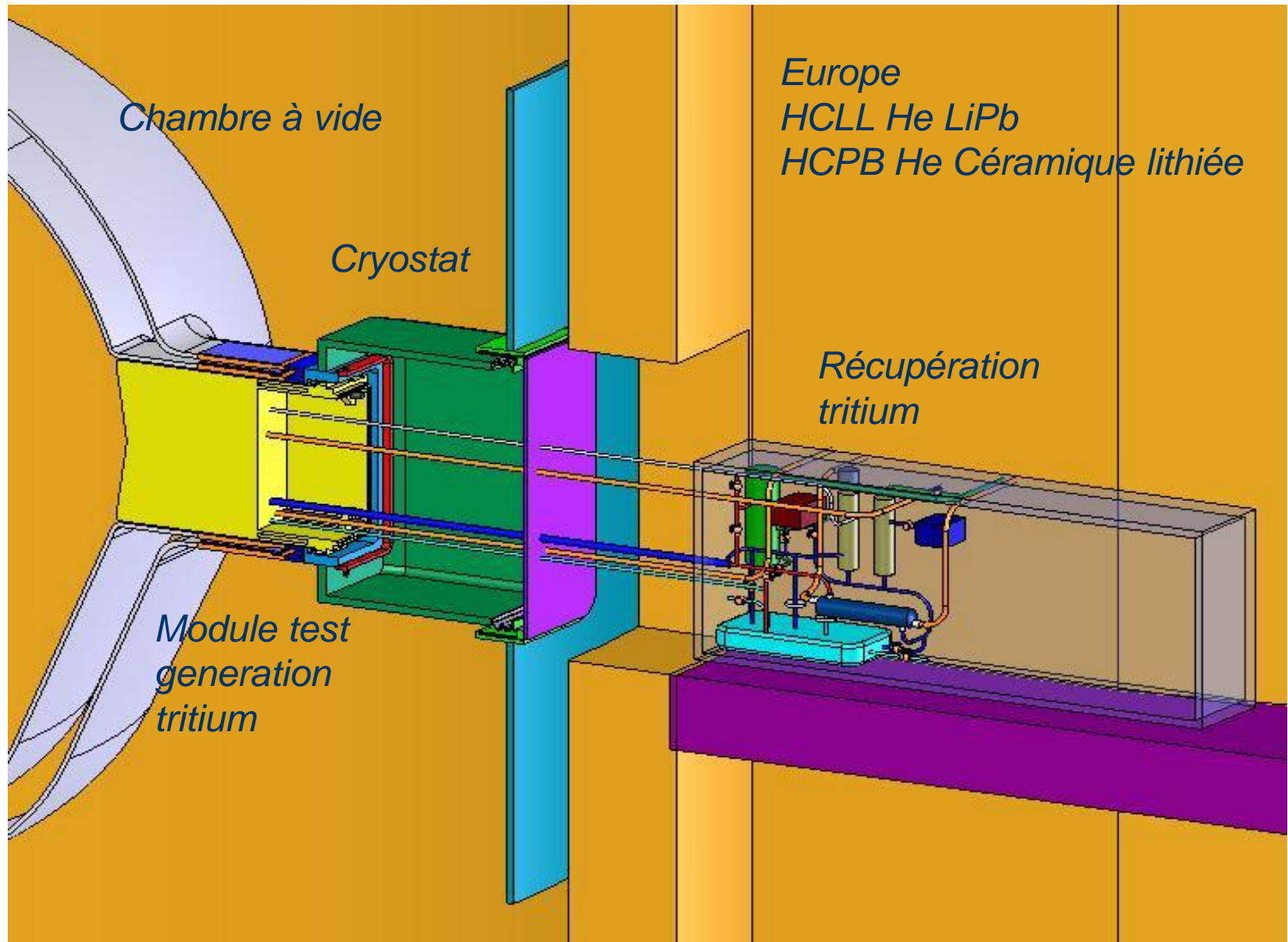
Second bouclier
(B₄C)

Réflecteur

Structure vanadium

Lithium

Modules de couverture tritigènes dans ITER



ITER : 1 milliard € de R&D en 20 ans

Bobine du solénoïde central modèle



Rayon 3.5 m
Hauteur 2.8m
Bmax=13 T
W = 640 MJ
0.6 T/sec



Chambre à vide échelle 3/2!



Double paroi, tolérance ± 5 mm



Module de couverture



liaison HIP
1.6 m x 0.93 m x 0.35 m



Robotique maintenance divertor



Attachment Tolerance ± 2 mm



Robotique maintenance couverture



Module de couverture de 4 t
Précision de positionnement ± 0.25 mm



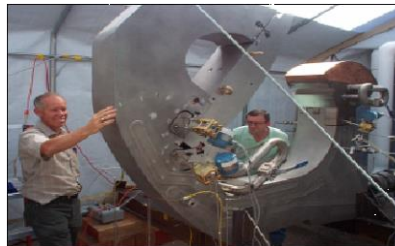
Bobine de champ toroïdal modèle



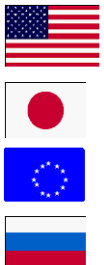
Hauteur 4 m
largeur 3 m
Bmax=7.8 T
Imax = 80kA



Élément de divertor



Heat Flux >15 MW/m², CFC/W

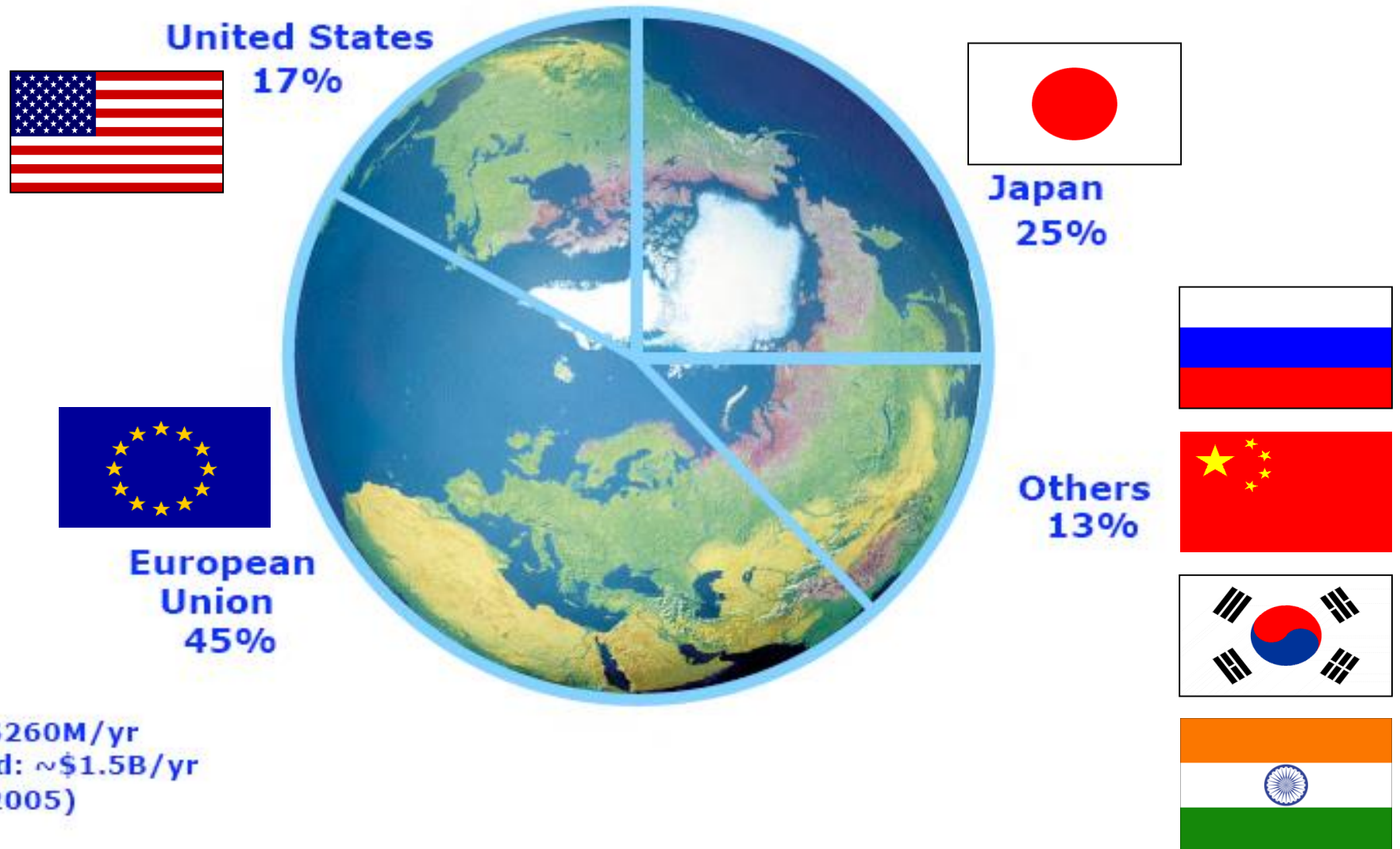



28 juin 2005

ITER
en
Europe



Europe + Japon : 70% de la recherche mondiale

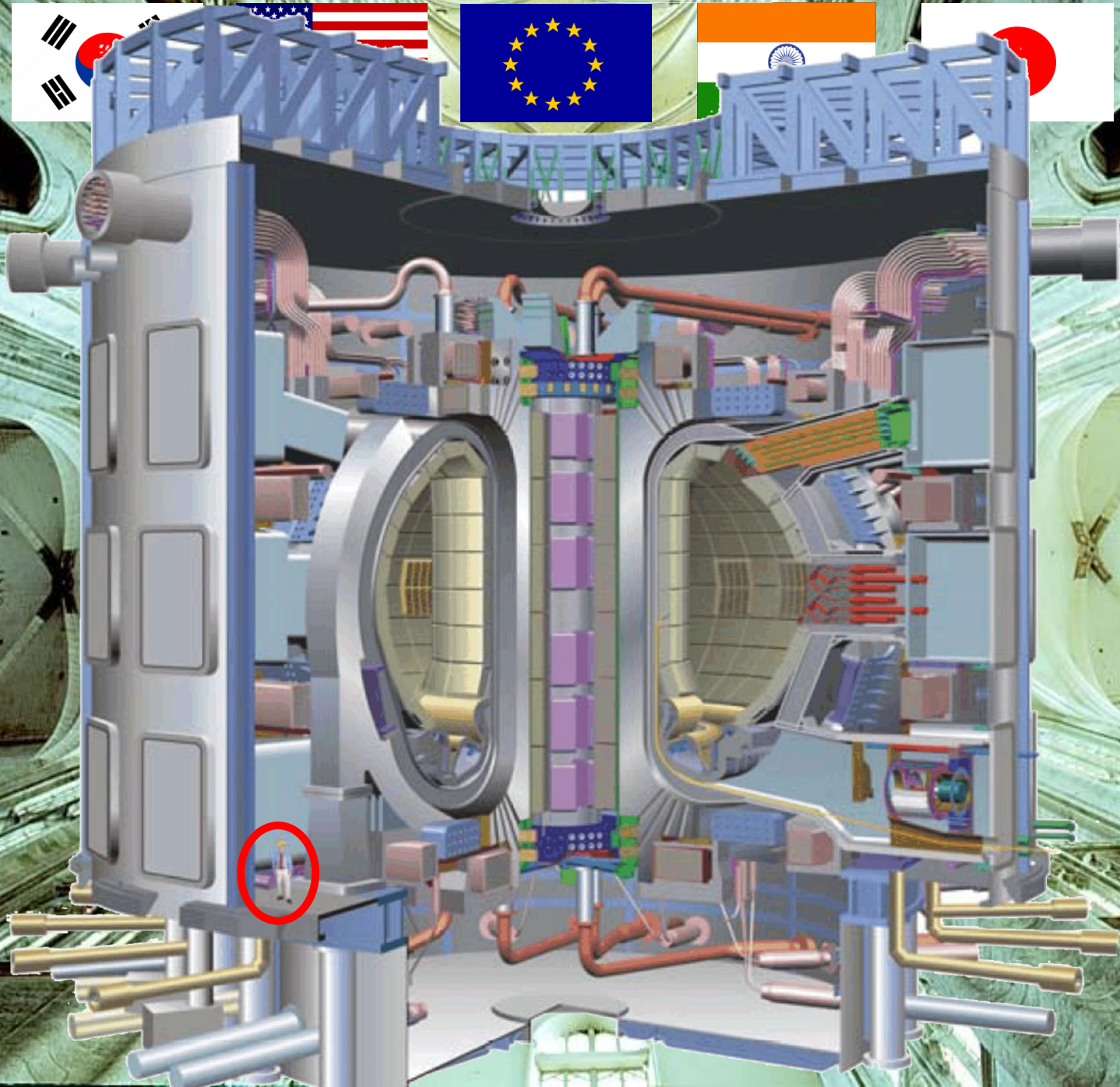
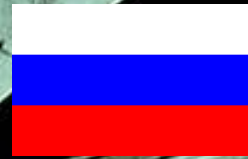


Euratom - CEA (1958) France		Euratom - IST (1990) Portugal
Euratom - ENEA (1960) Italie		Euratom - TEKES (1995) Finlande
Euratom - IPP (1961) Allemagne		Euratom - DCU (1996) Irlande
Euratom - FOM (1962) Pays Bas		Euratom - OAW (1996) Autriche
Euratom - FZJ (1962) Allemagne		Euratom - Hellenic Rep (1999) Grèce
Euratom - Belgian State (1969) Belgique		Euratom - IPP.CR (1999) République tchèque
Euratom - Riso (1973) Danemark		Euratom - HAS (1999) Hongrie
Euratom - UKAEA (1973) Royaume Uni		Euratom - MECT (1999) Roumanie
Euratom - VR (1976) Suède		Euratom - Univ. Latvia (2002) Lettonie
Euratom - Conf. Suisse (1979) Suisse		Euratom - IPPLM (2005) Pologne
Euratom - FZK (1982) Allemagne		Euratom - MHST (2005) Slovenie
Euratom - CIEMAT (1986) Espagne		Joint European Torus (JET) (1978) Culham, UK

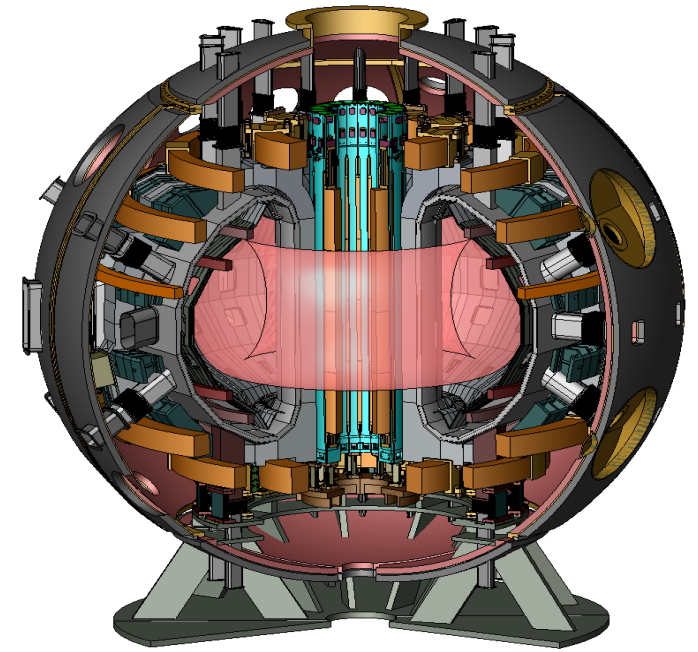
500 M€/an, financé à 40% par l'Europe, 85 % 4 "grands"

ITER à Cadarache...





Approche élargie



Partenariat privilégié Europe Japon:

- *Contribution européenne au nouveau tokamak japonais JT-60 Super-Advanced à aimants supra conducteurs (DAPNIA)*
- *Etudes d'ingénierie de l'installation IFMIF (EVEDA) et réalisation d'un prototype d'une chaîne d'accélérateurs (DAPNIA)*
(IFMIF: dispositif d'irradiation des matériaux avec des neutrons représentatifs de la fusion)
- *Centre de calcul et modélisation à Rokkasho*

Elysée
21 novembre
2006



ITER: le partage des coûts

20 %



Construction / 10 ans / 4,7 G€

Etat/CEA (~4%)
Euratom (~6%)

Collectivités
locales
(~10%)

50 %

10 %

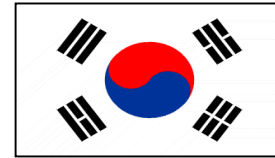
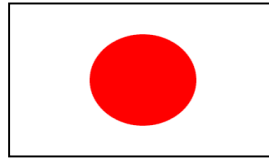
10 %

10 %

10 %

10 %

10 %



Exploitation démantèlement / 20 ans / 5,7 G€

34 %

13 %

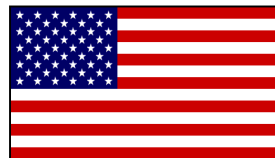
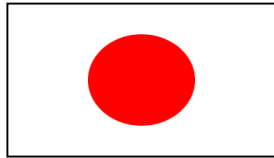
13 %

10 %

10 %

10 %

10 %

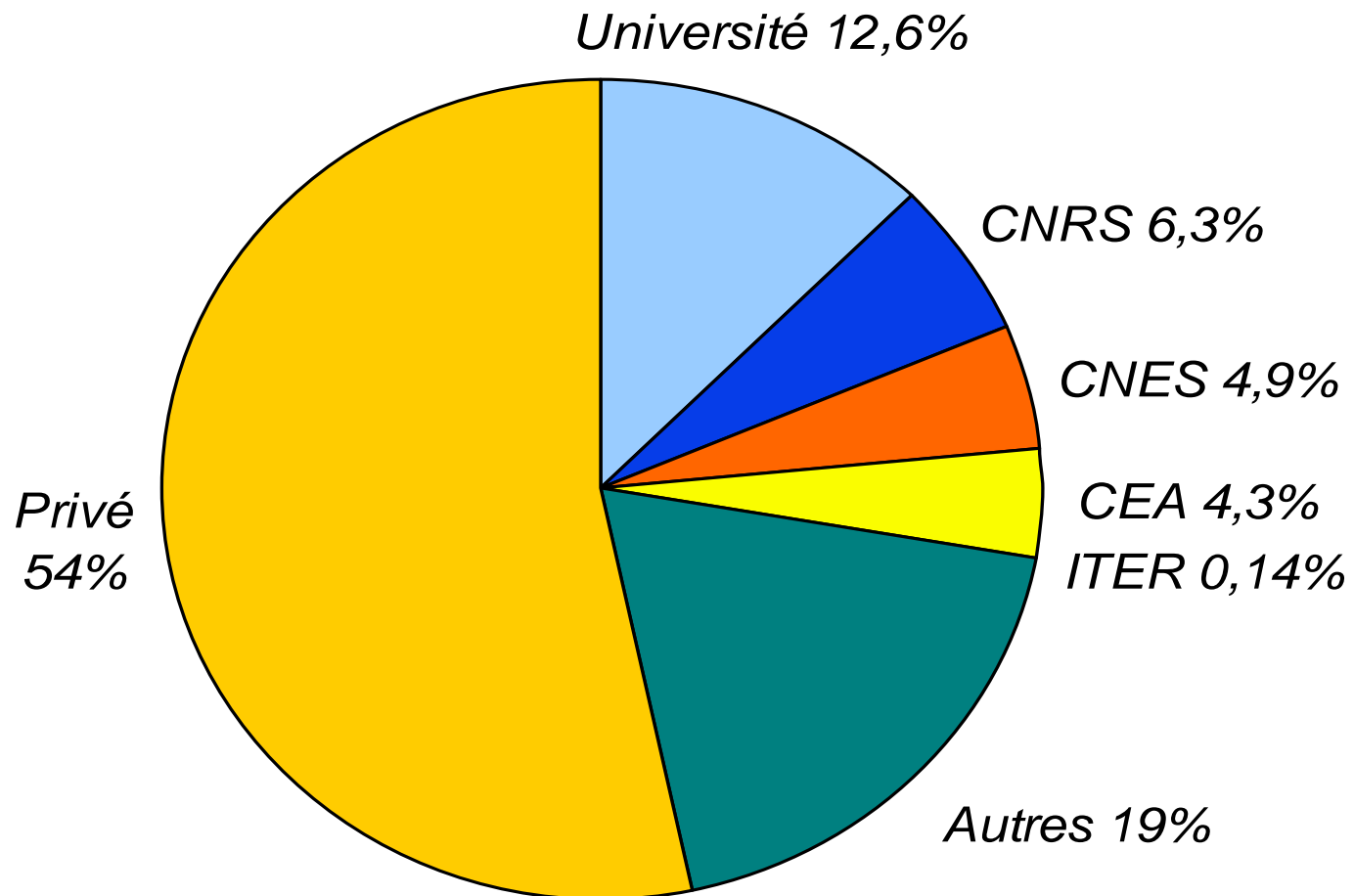


Le poids d'ITER dans la recherche française

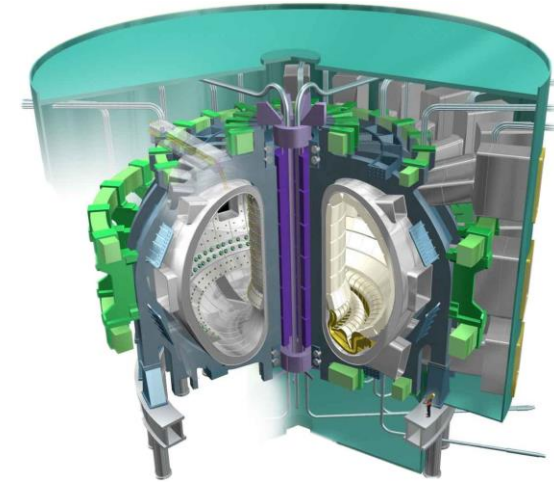
35 G€ / an 350.000 personnes

0.05 G€ / an 350 personnes

1€ investi dans ITER → ~ 3€ dépensés en France



La fusion, une énergie durable?



Ressource quasi-inépuisable (millions / milliards d'années)

Combustibles dans les océans (30 grammes pour une vie), accessibles à tous

Pas de réaction en chaîne, pas de risque d'emballement

Plasma à basse pression, ne contient pas plus d'énergie que l'air qui nous entoure

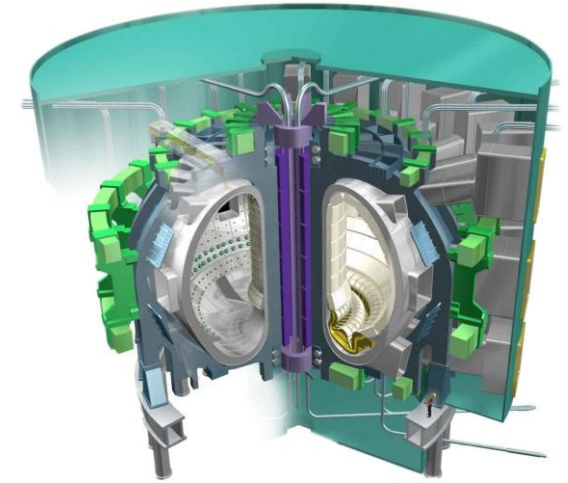
Réacteur alimentant 1 million de personnes → ~ 10 grammes de combustible

Pas de gaz à effet de serre, pas de pollution → pas d'impact sur climat et santé

Pas de déchets transmis aux générations futures

Pas de risque de prolifération

Les défis de la fusion

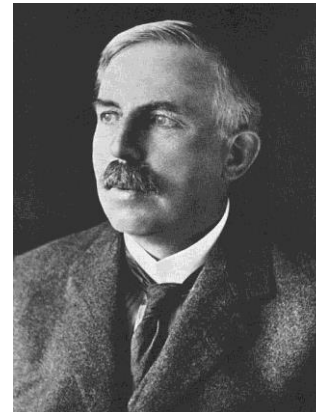


Cœur quasi auto chauffé (ITER : 70% réacteur : 80-90%)

Complexité couverture (générer du tritium, réduire déchets)

Matériaux (résister aux neutrons et à la chaleur)

"Talking moonshine..." ?

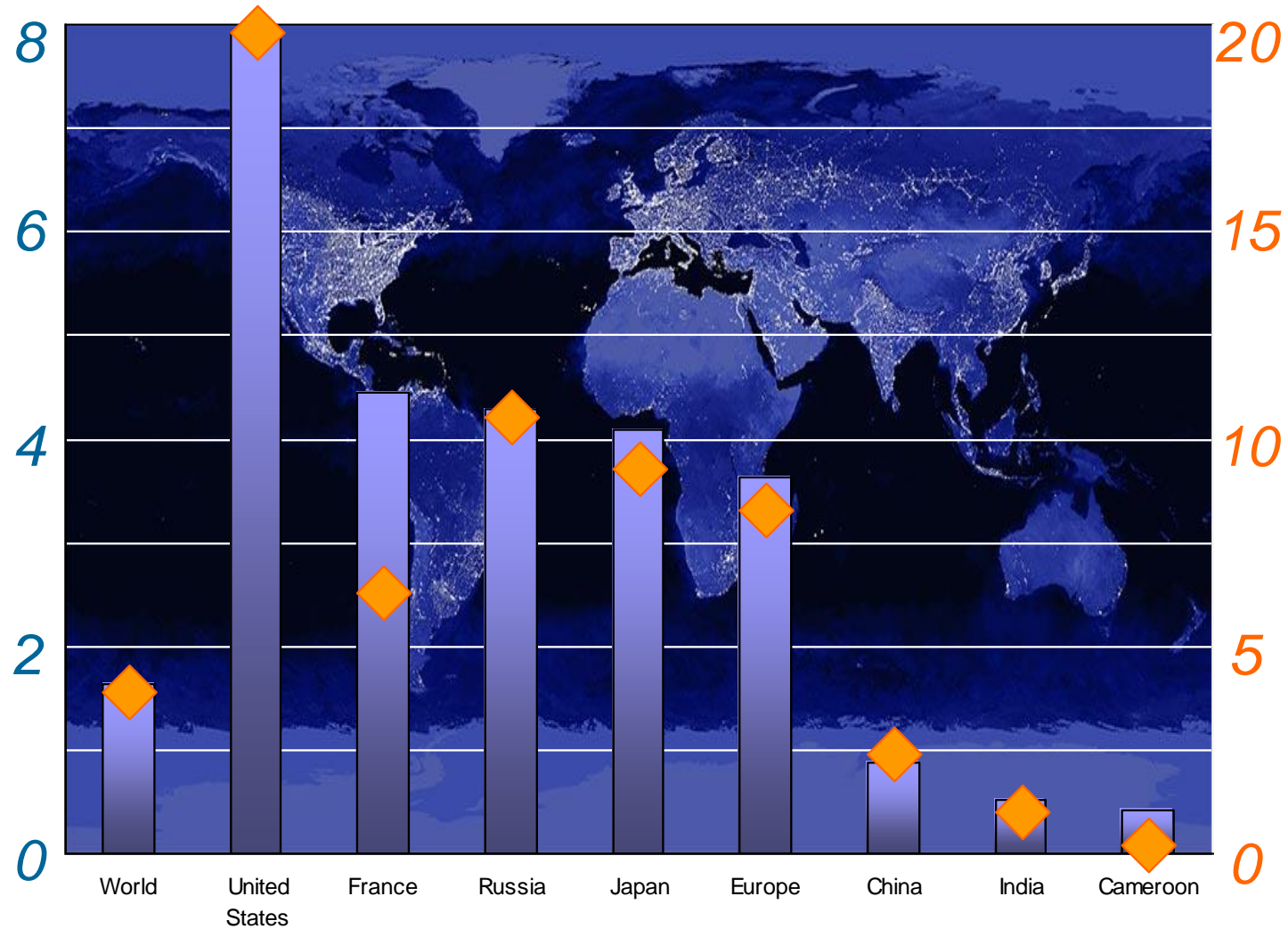


Consommation d'énergie et émission de CO₂ par habitant

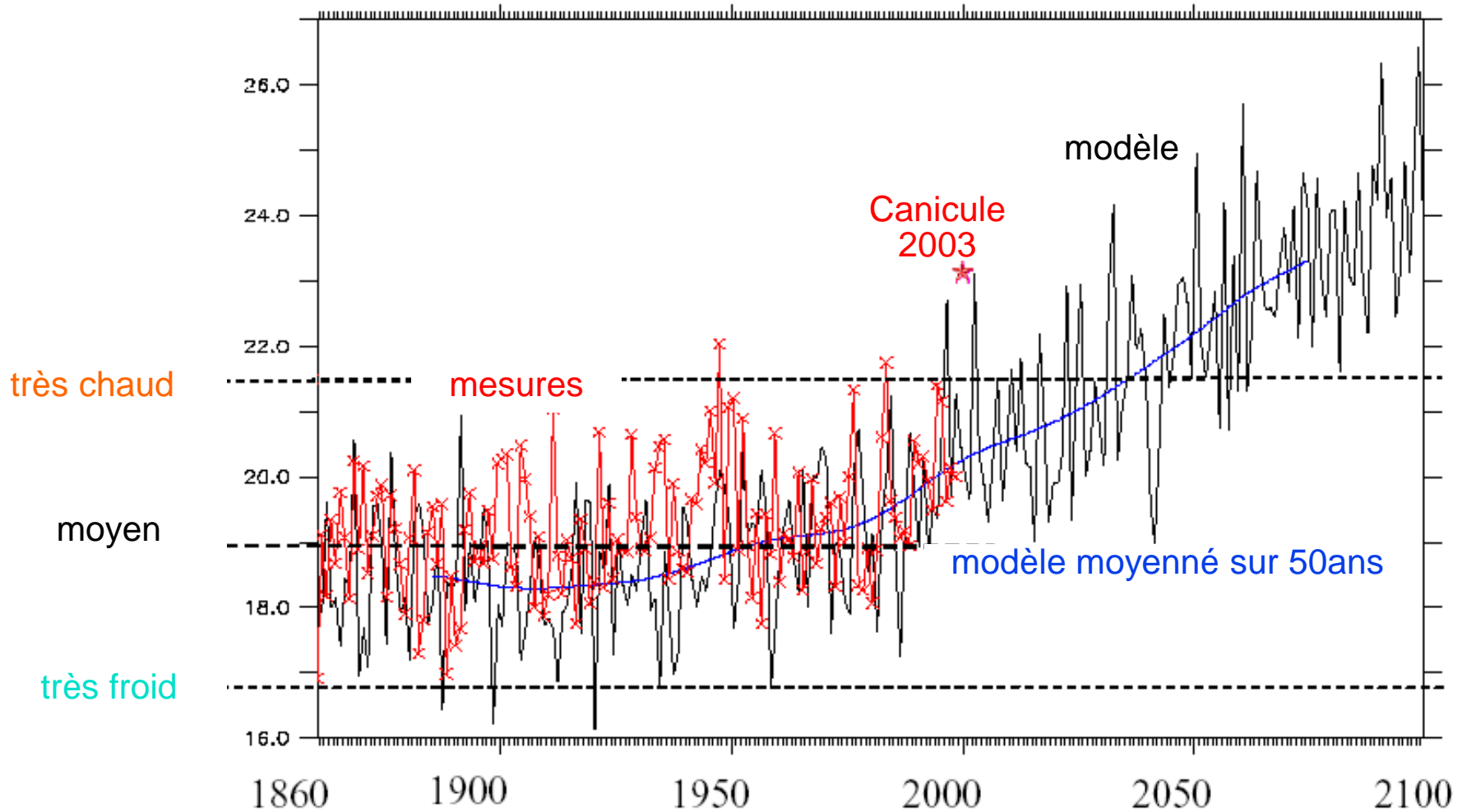
tonnes équivalent pétrole

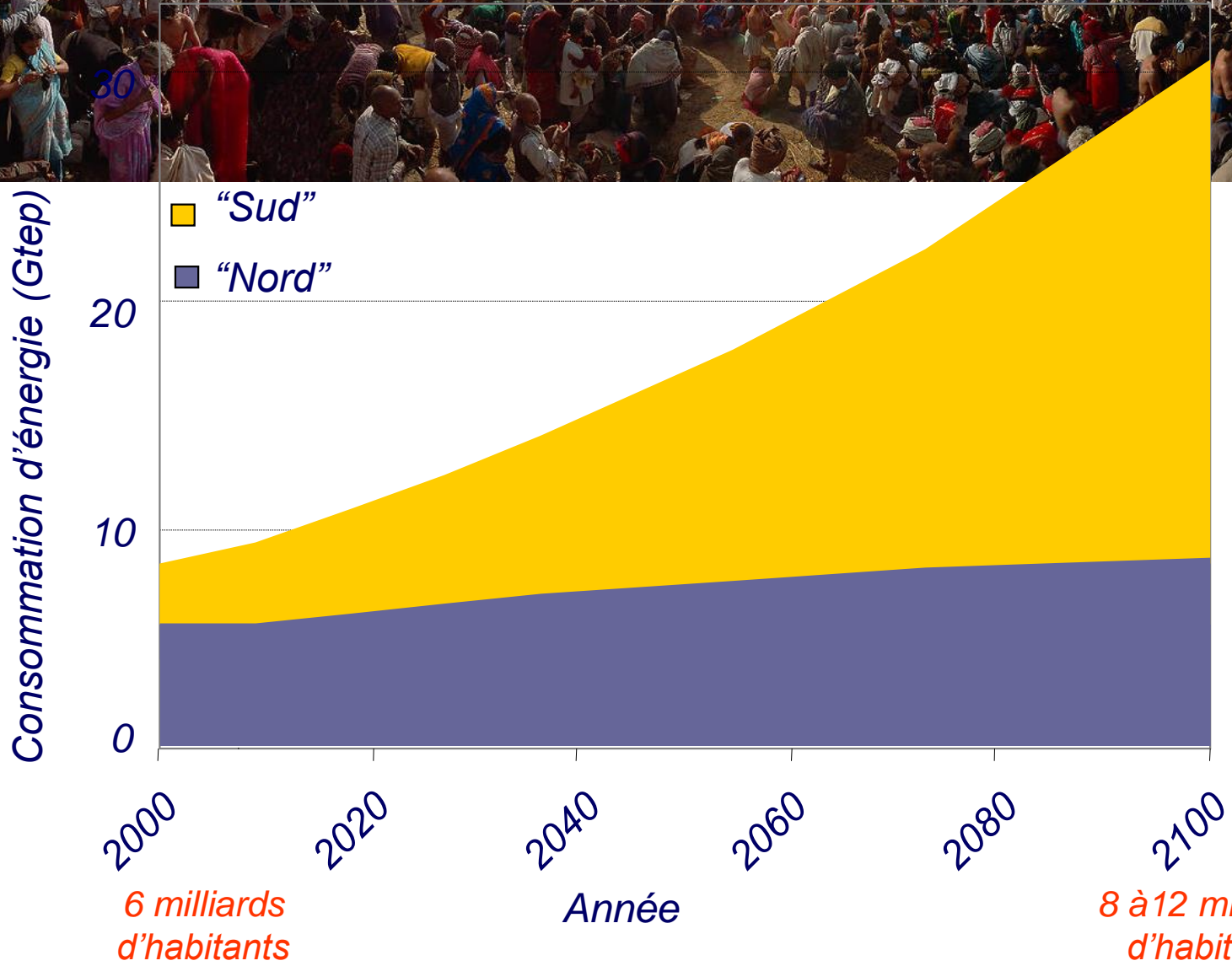


tonnes CO₂



1860 - 2100 Températures moyennes d'été...

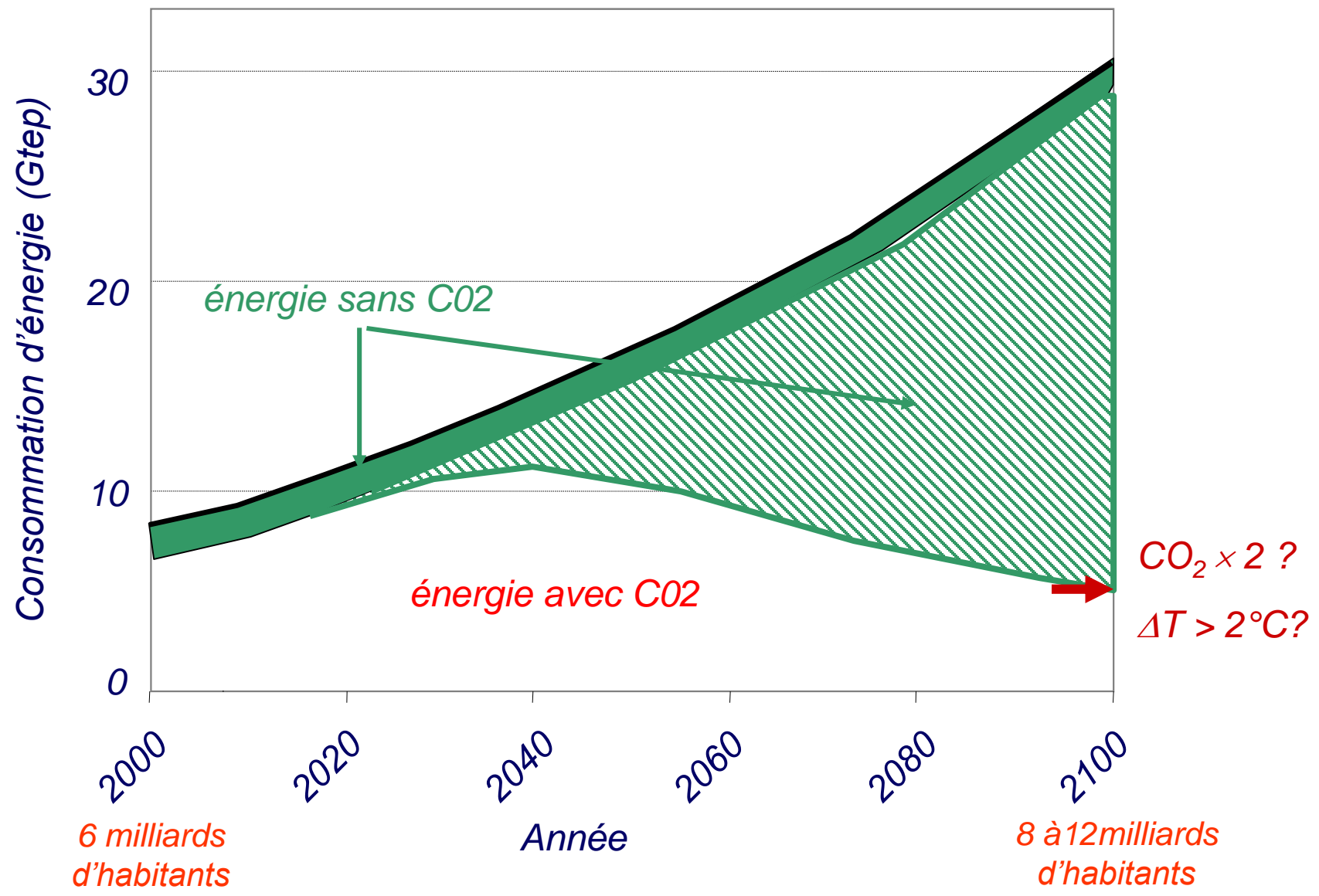








Multiplier par plus de 10 la production d'énergie sans CO2 ?



La fusion, pour dans 50 ans?



"Термоядерная энергия будет получена тогда, когда она станет необходима человечеству"

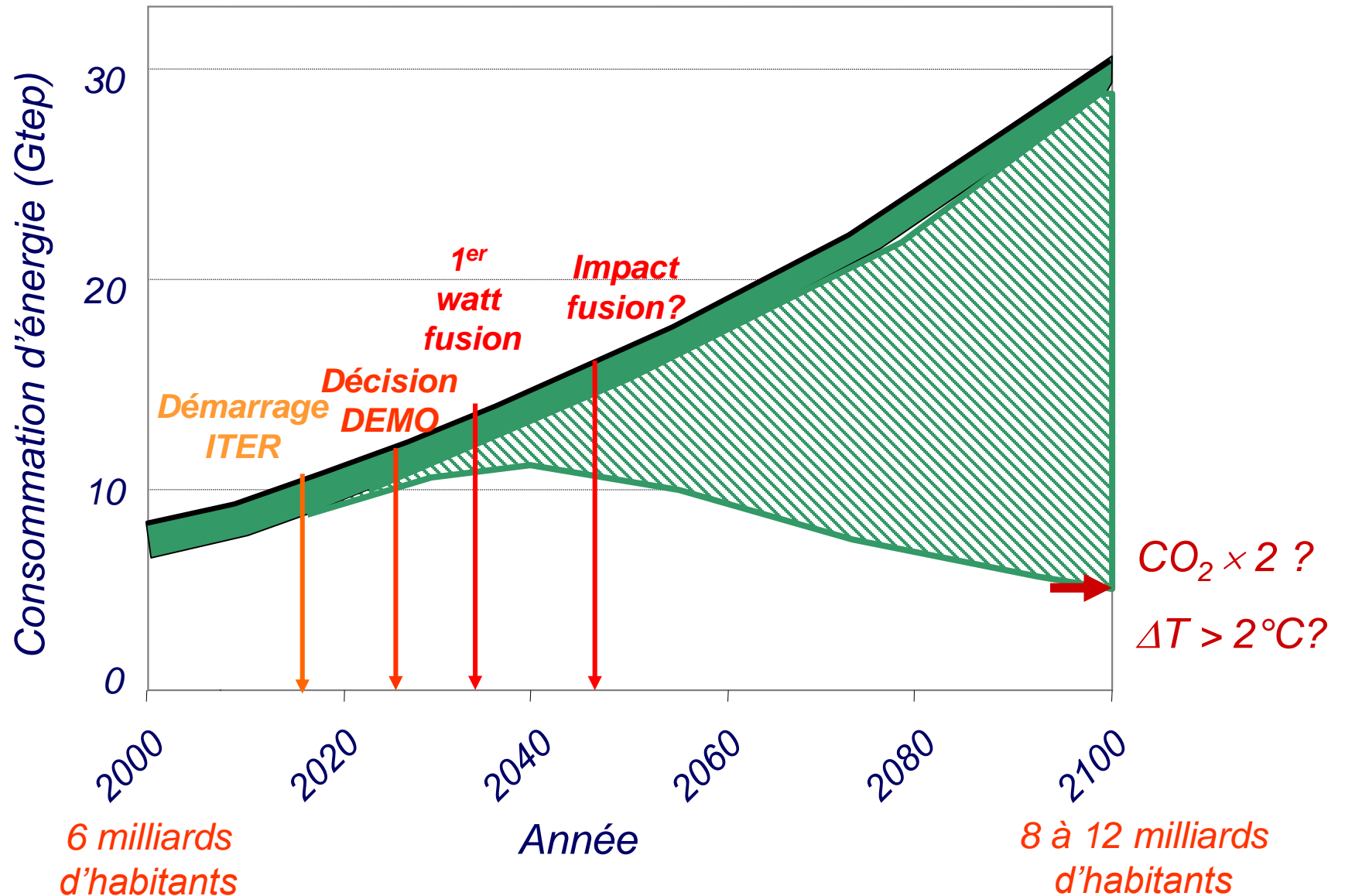
Детская энциклопедия. М., Педагогика, 1973, т.3, с.381.

La fusion sera prête lorsque la société en aura besoin

Lev Artsimovitch

La fusion sera prête lorsque la société aura pris conscience qu'elle en a besoin

La fusion restera-t-elle toujours une énergie d'avenir?



" La maison brûle... "

*PIB mondial ~ 40.000 G€ / an
Marché énergie ~ 4.000 G€ / an (~ 10 % PIB)*

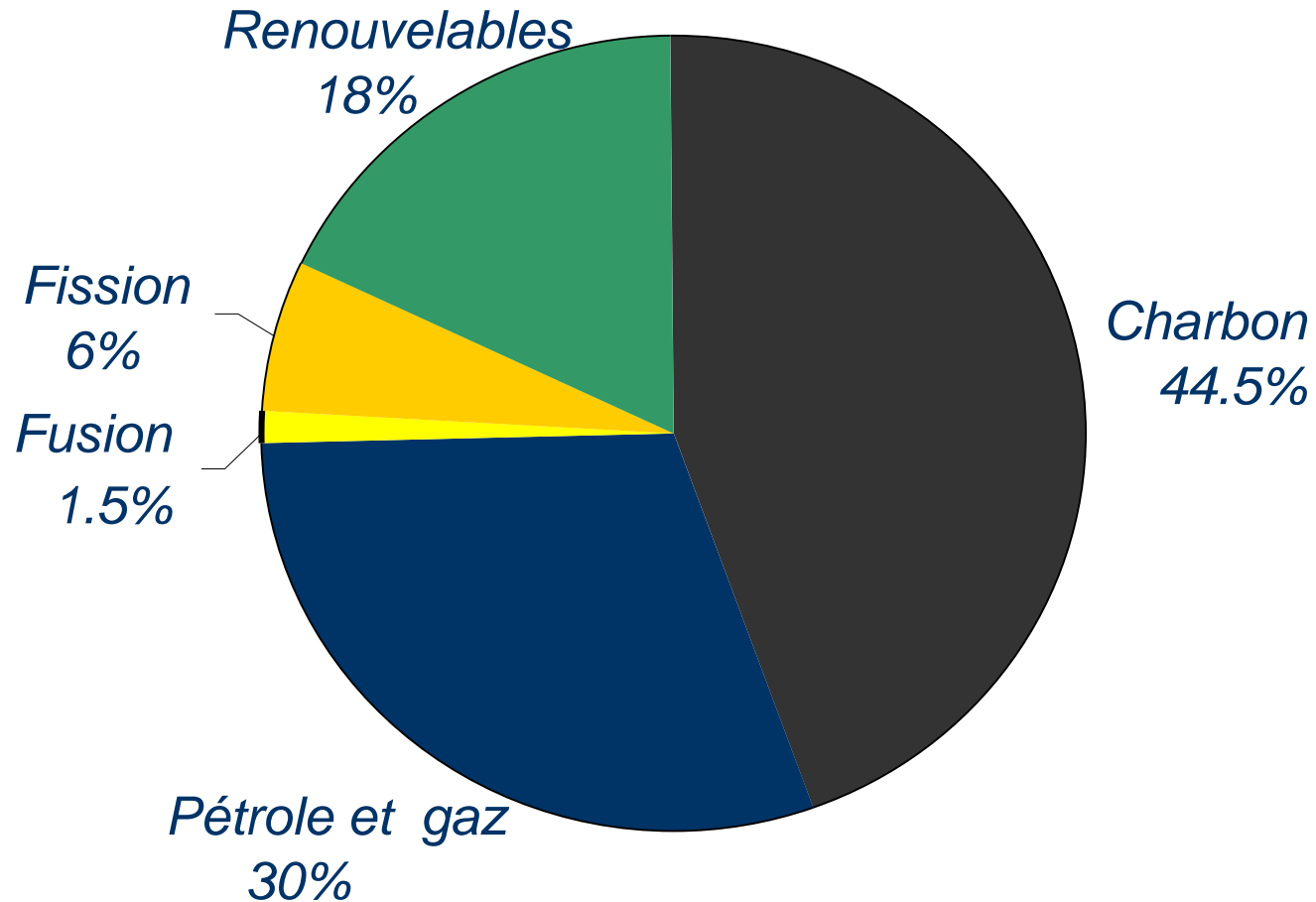
R&D + subventions énergies durables ~ 80 G€ / an (~ 2 % marché énergie)

ITER ~ 0,4 G€ par an (0.01% marché énergie)

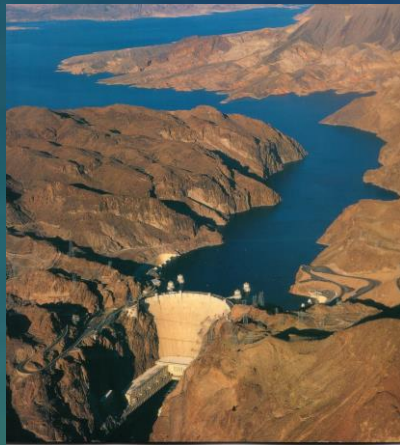
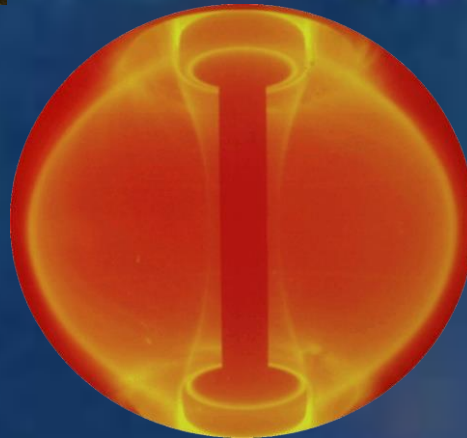
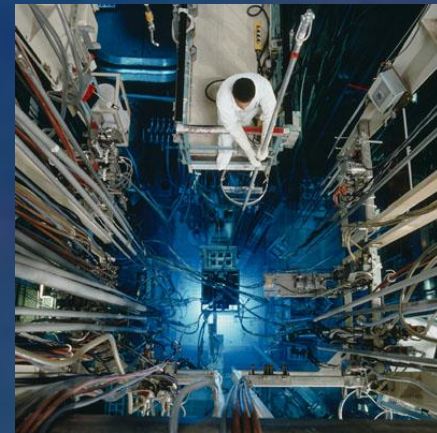


"...et nous regardons ailleurs "

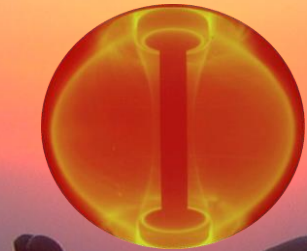
R&D et subventions énergies en Europe ~ 30 milliard €/an



*Faire des recherches sur la fusion aujourd'hui
pour enrichir les choix possibles pour les enfants de nos enfants*



*Fusion
l'énergie des étoiles
en héritage?*





Le monde, la nuit



www.itercad.org

www-fusion-magnetique.cea.fr
jean-marc.ane@cea.fr 04.42.25.46.75

www.iter.org

