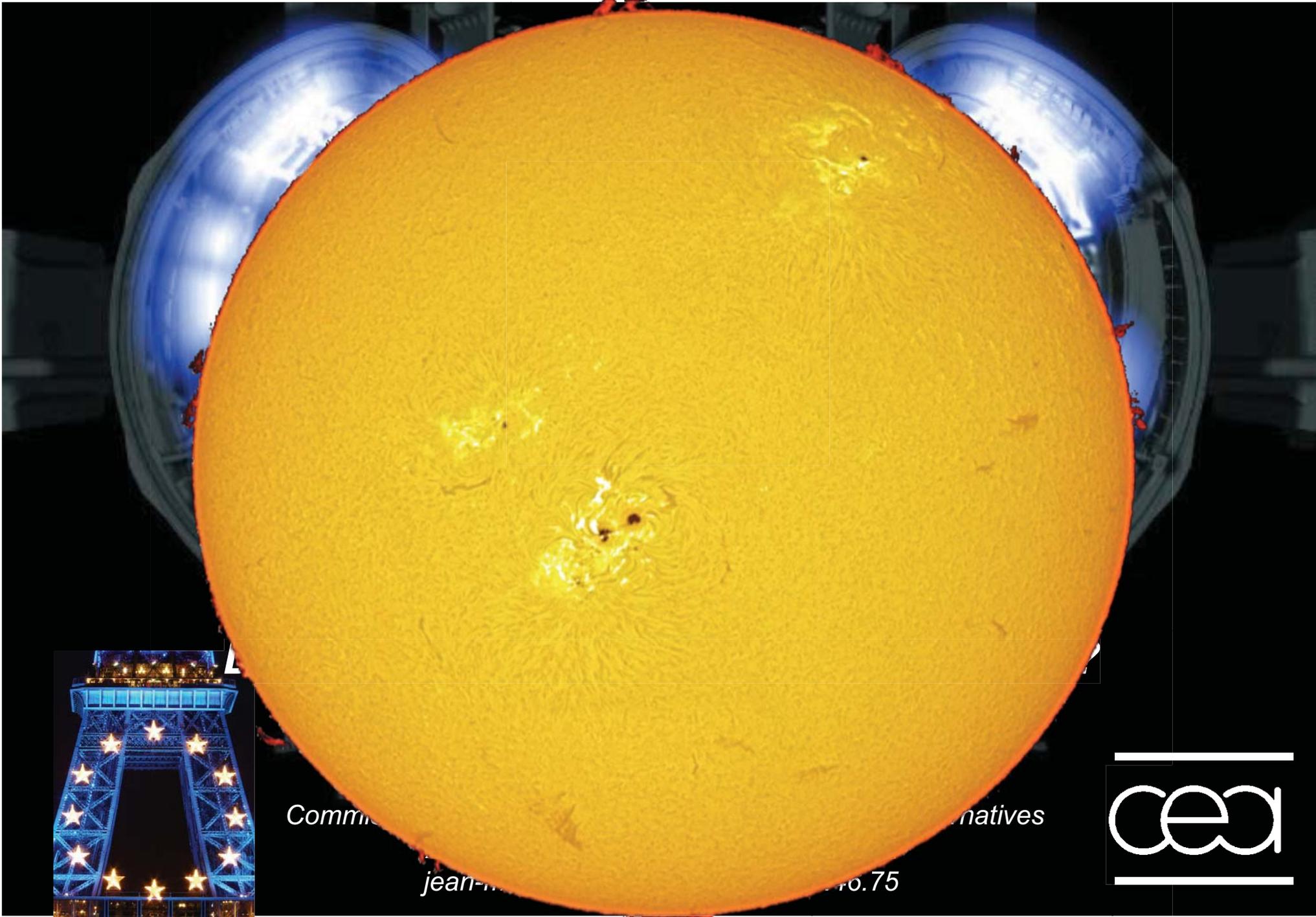


Jacques avait été un colleur terrifiant en hypotaube au Lycée Masséna.
Les jeunes qui sont passés par lui ne l'ont jamais oublié!

Suzie Morgenstern



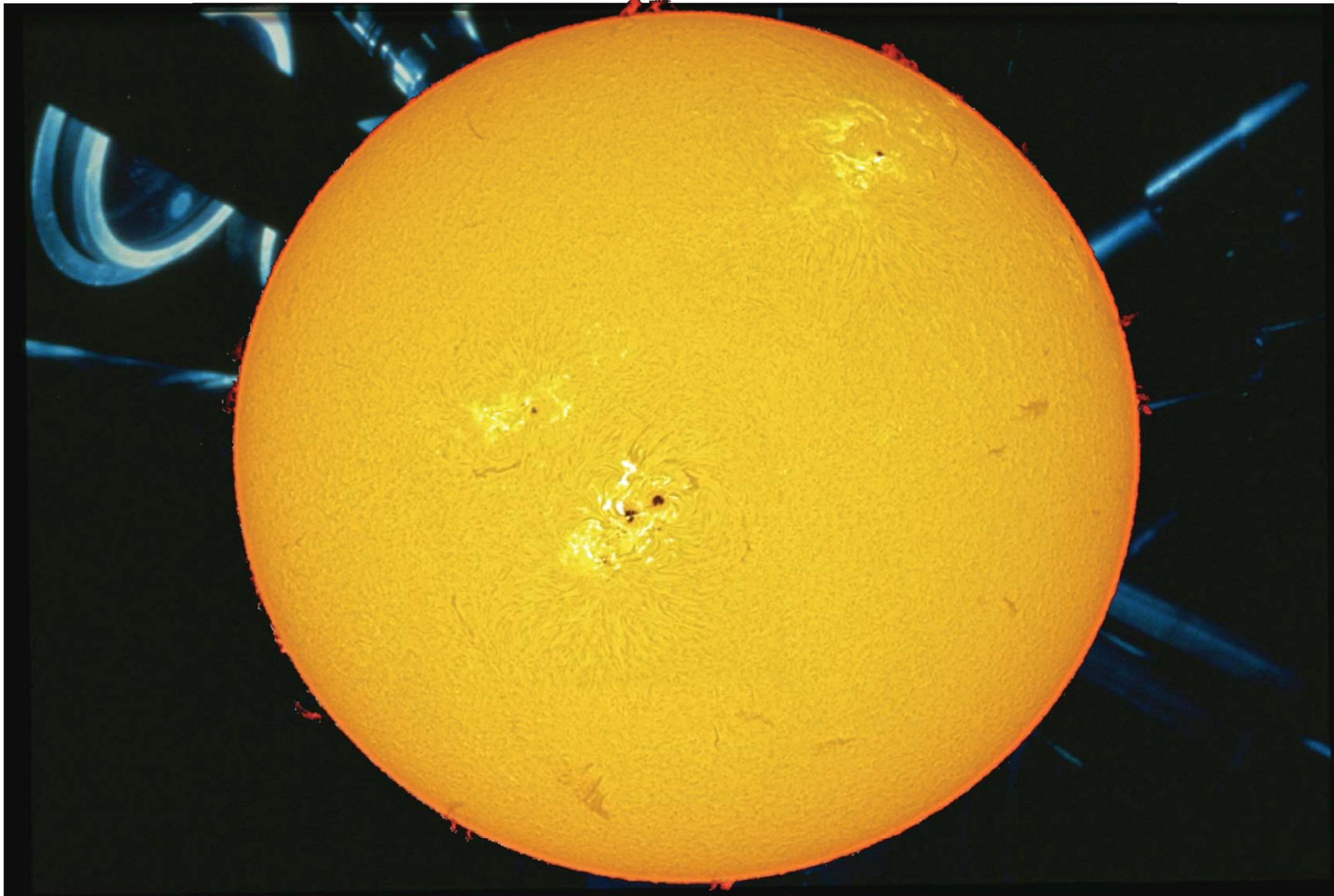
Comm

natives

jean-m

16.75



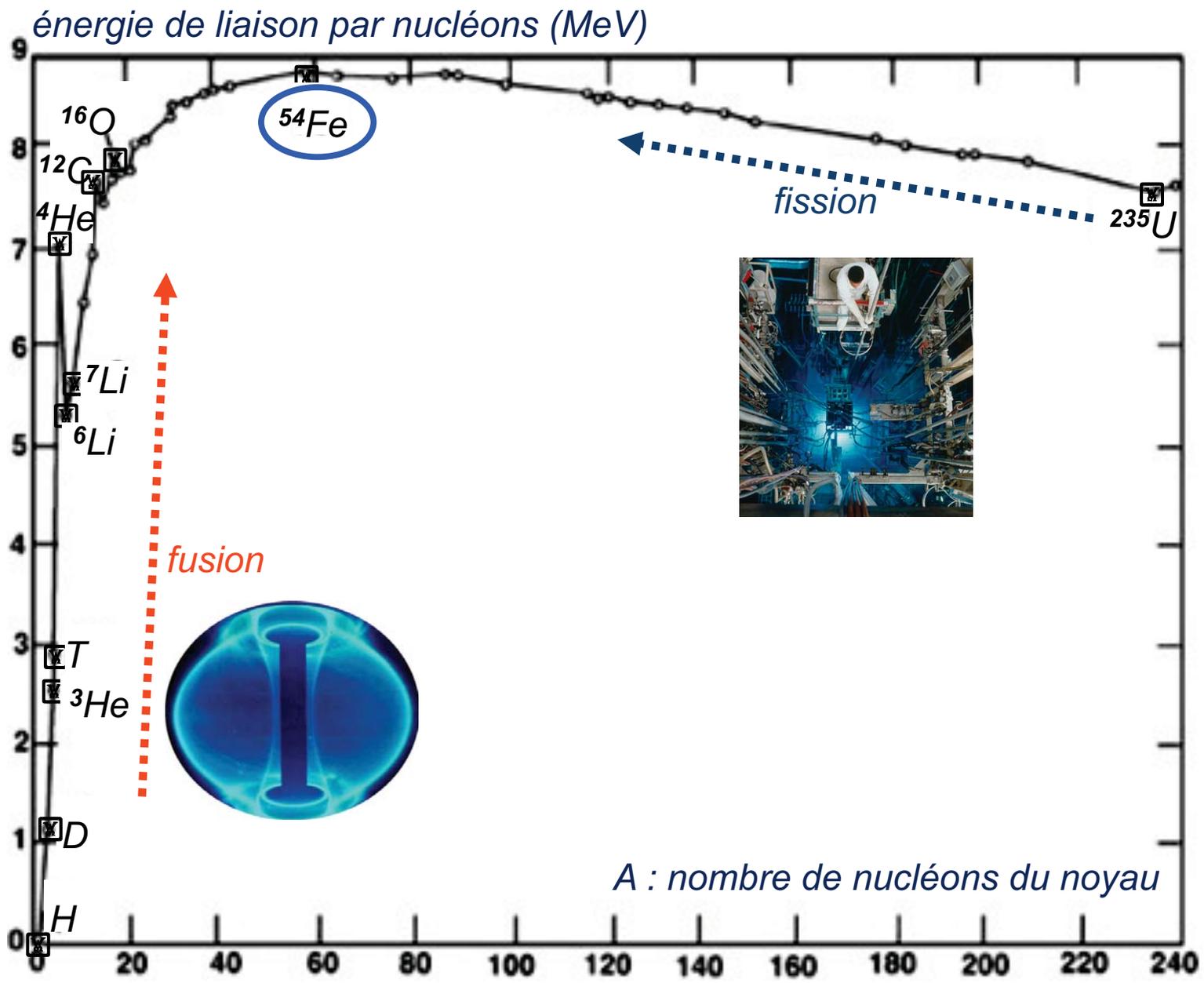




Tore Supra

IRFM

Institut de Recherche sur la Fusion Magnétique



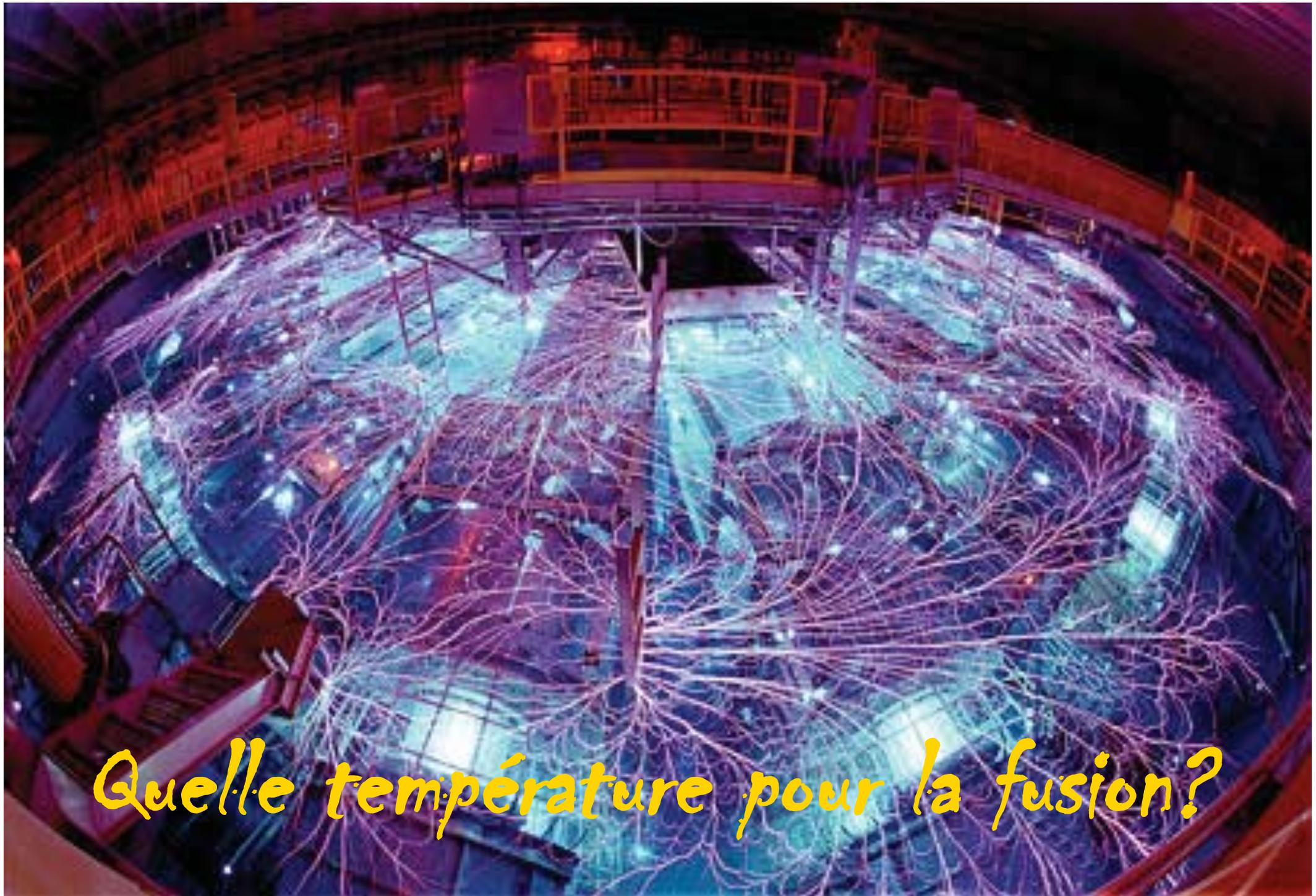
Energie et forces fondamentales de l'univers

"Combustible" nécessaire à la consommation énergétique d'un européen au cours de sa vie:

Gravité barrage: 300 millions de tonnes d'eau

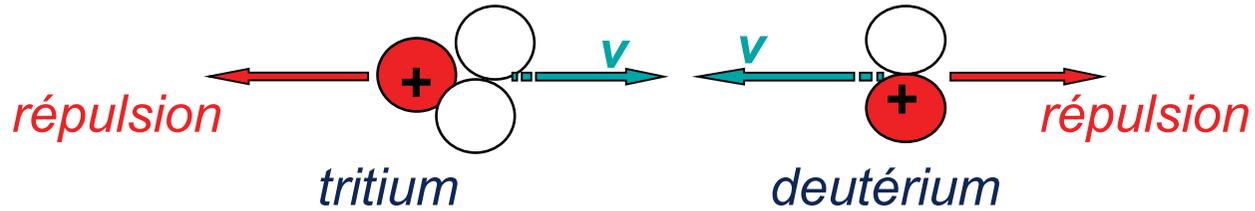
Electromagnétique combustion : 300 tonnes de pétrole

Nucléaire fusion: 30 grammes mélange D-T

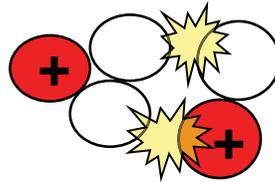


Quelle température pour la fusion?

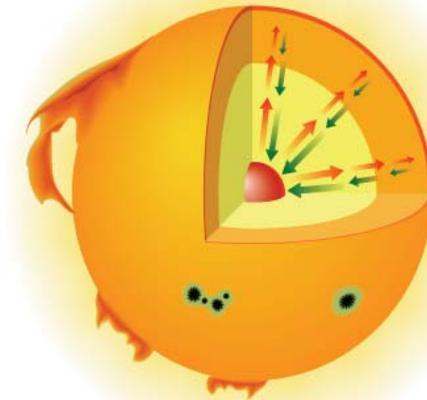
A quelle température peuvent fusionner les noyaux?



force nucléaire



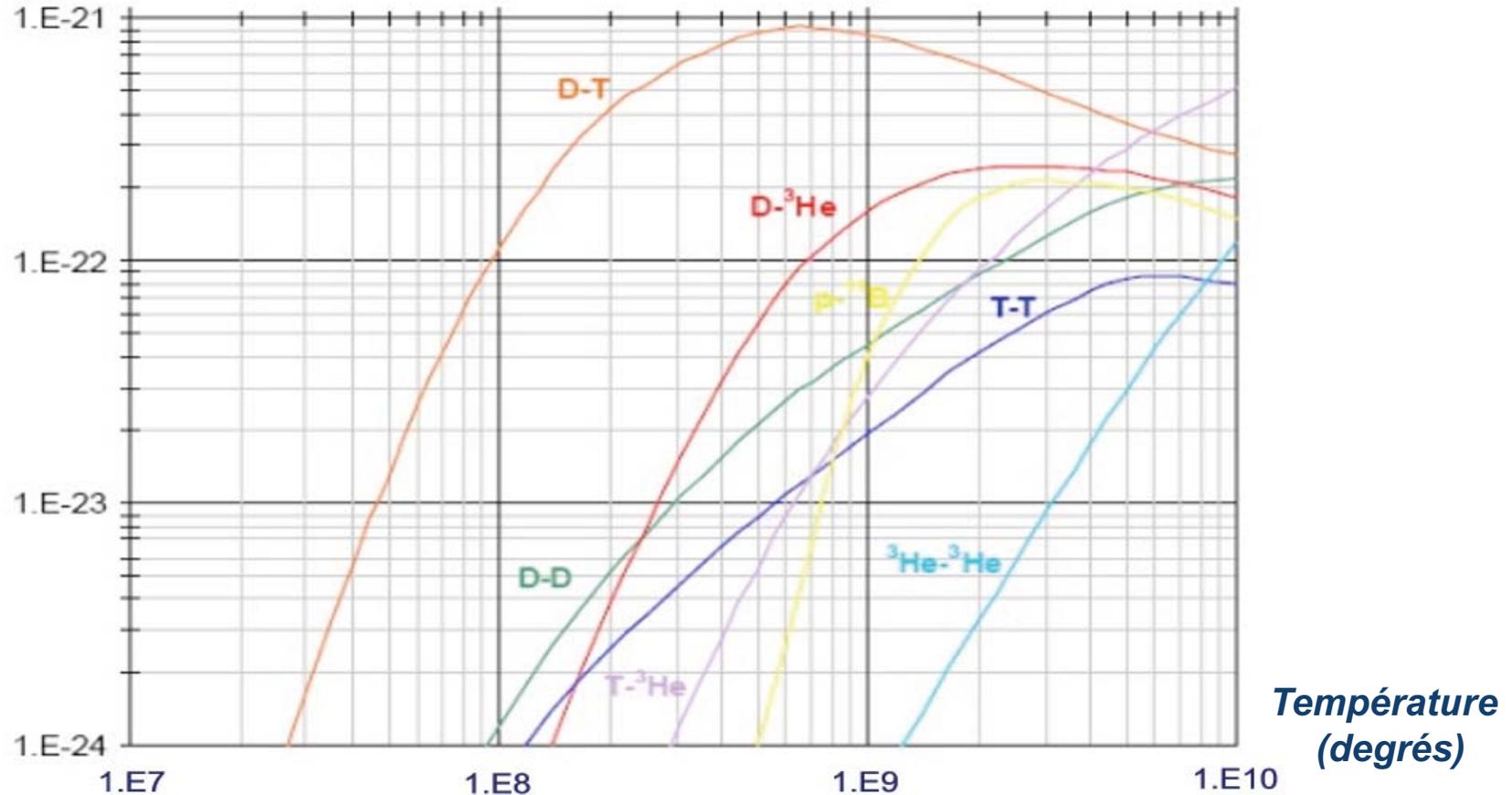
150 millions de degrés



Dix fois la température du centre du soleil...

Densité de puissance fusion

Réactivité (m^3/s)

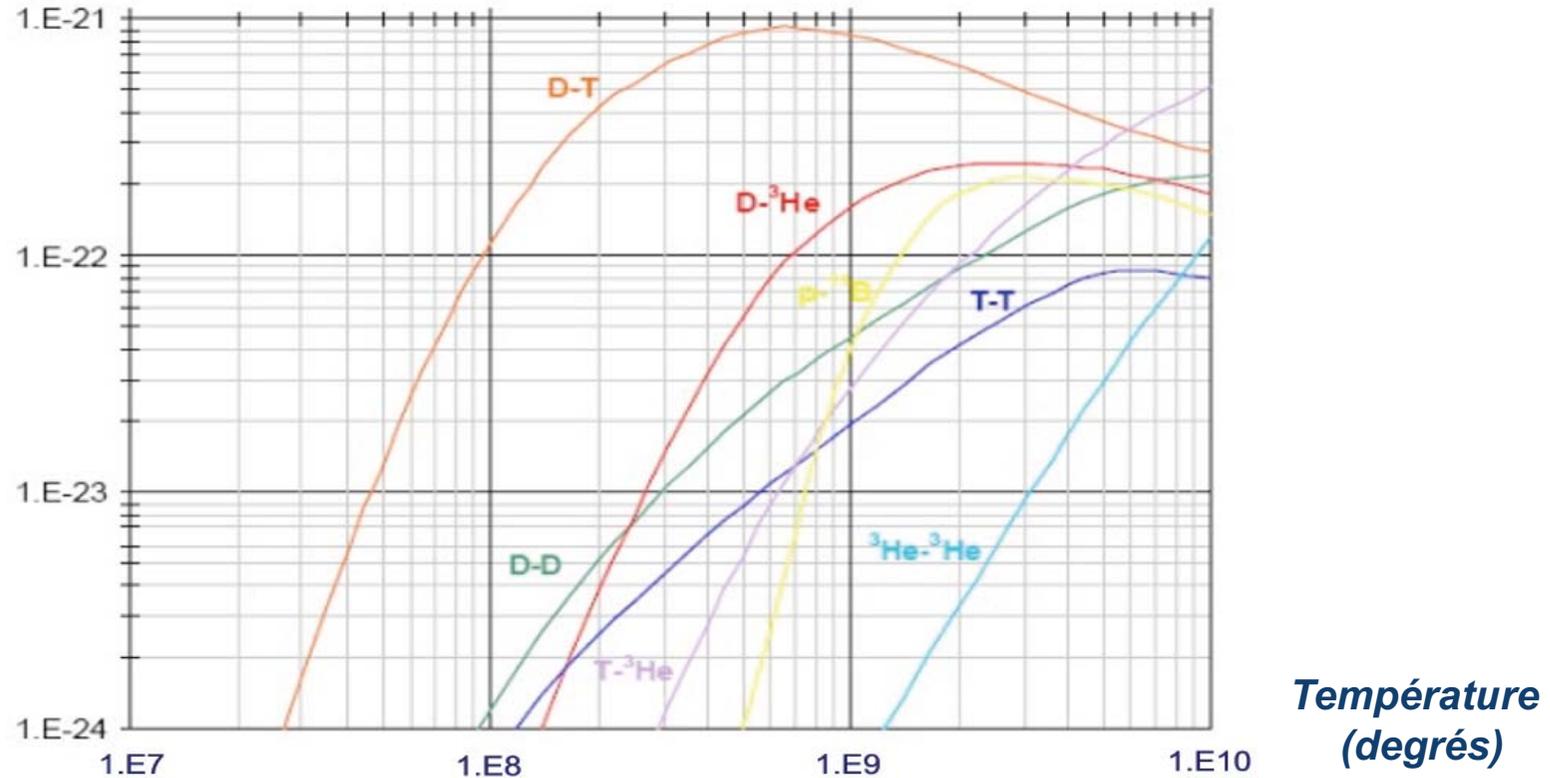


$\text{densité combustible}_1 \times \text{densité combustible}_2 \times \text{réactivité} \times \text{énergie}_{\text{réaction fusion}}$

Densité de puissance fusion (MW/m^3) \sim pression du plasma au carré

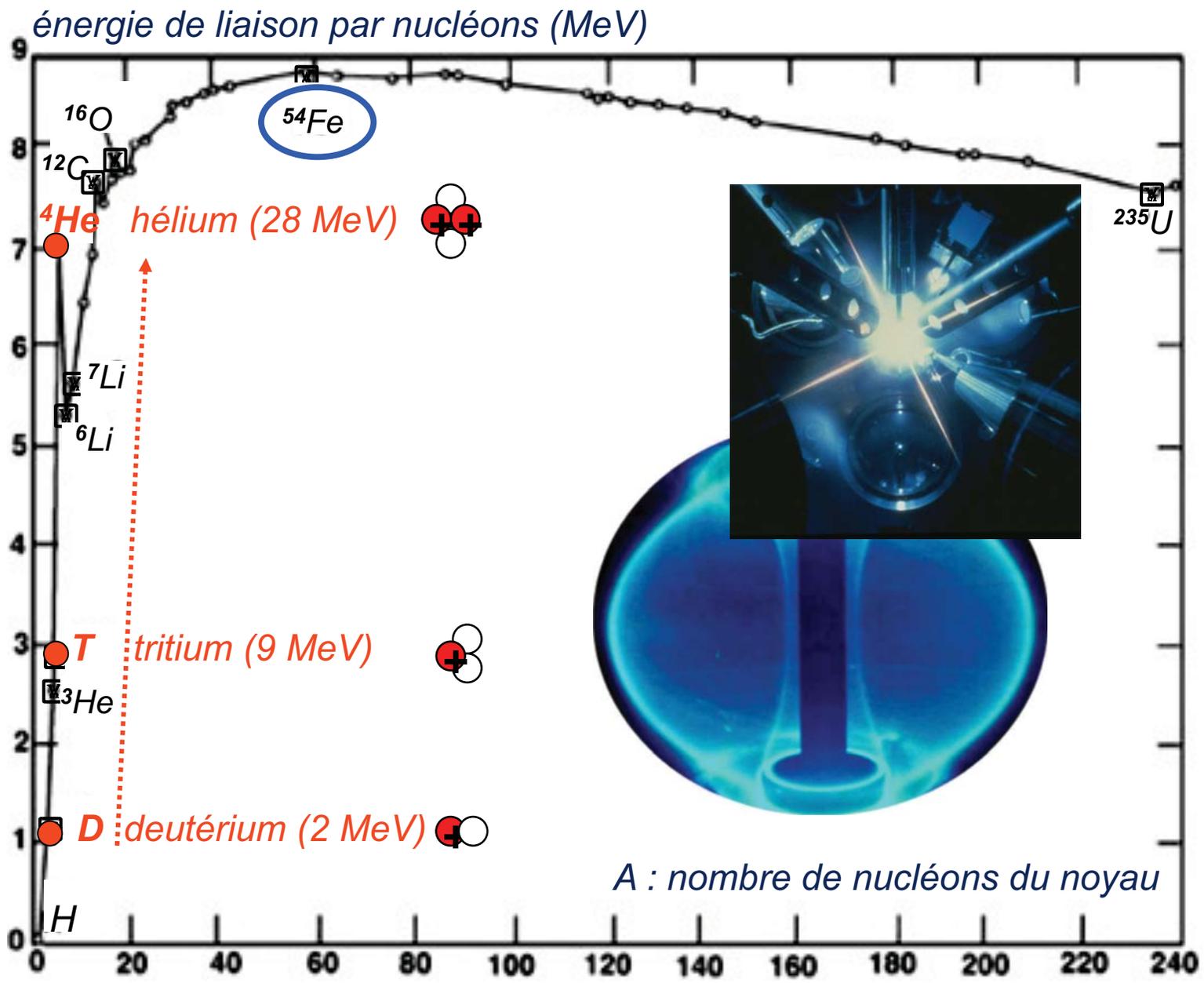
Quelles températures pour la fusion?

Réactivité (m^3/s)

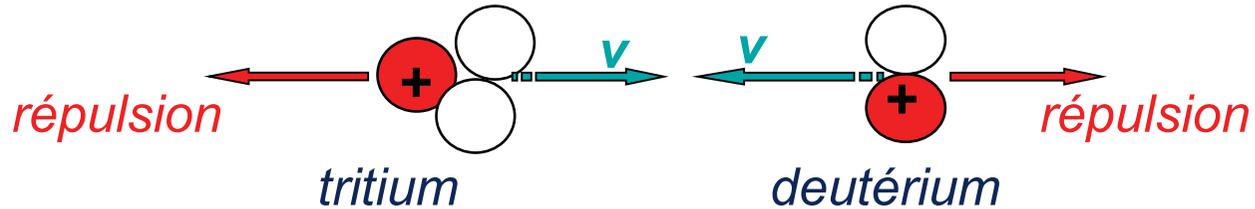


deutérium / tritium
 $T_{DT} \approx 150$ millions de degrés

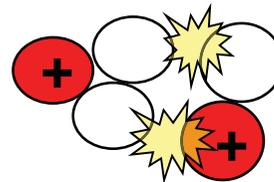
deutérium / deutérium ou hélium3
 $T_{DD} \approx 500$ millions de degrés



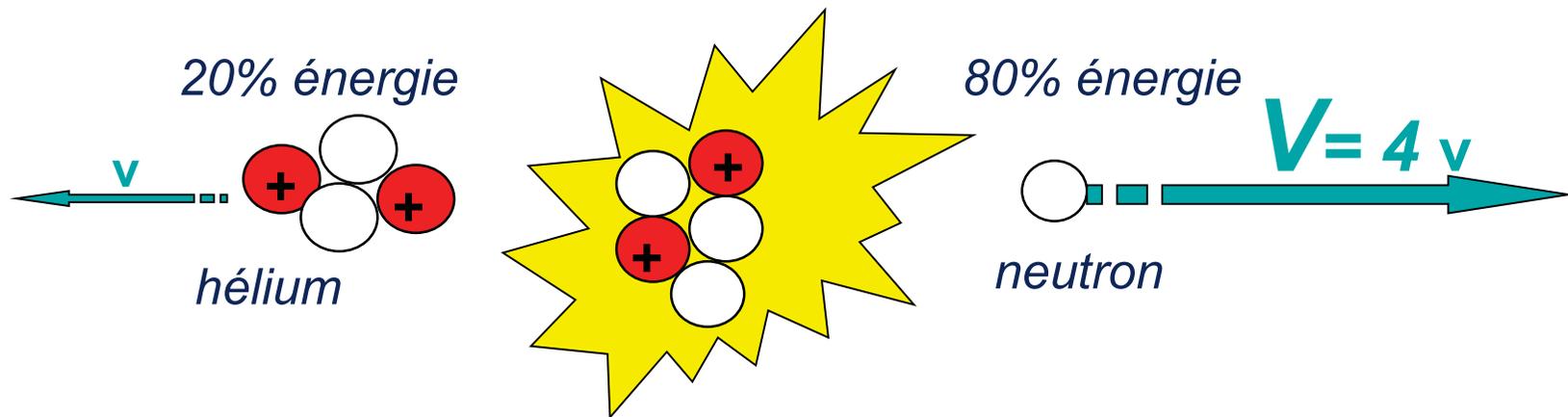
Sous quelle forme est produite l'énergie de fusion?

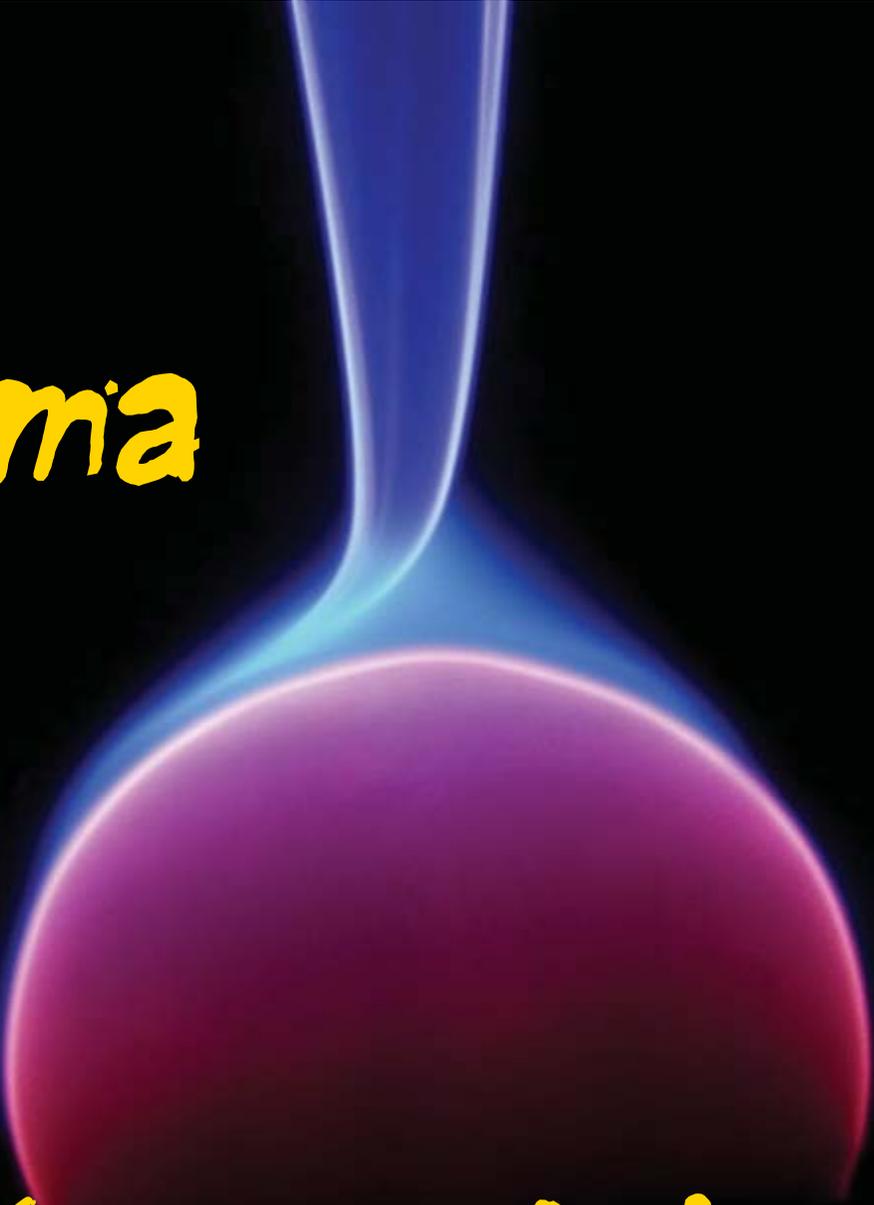


150 millions de degrés



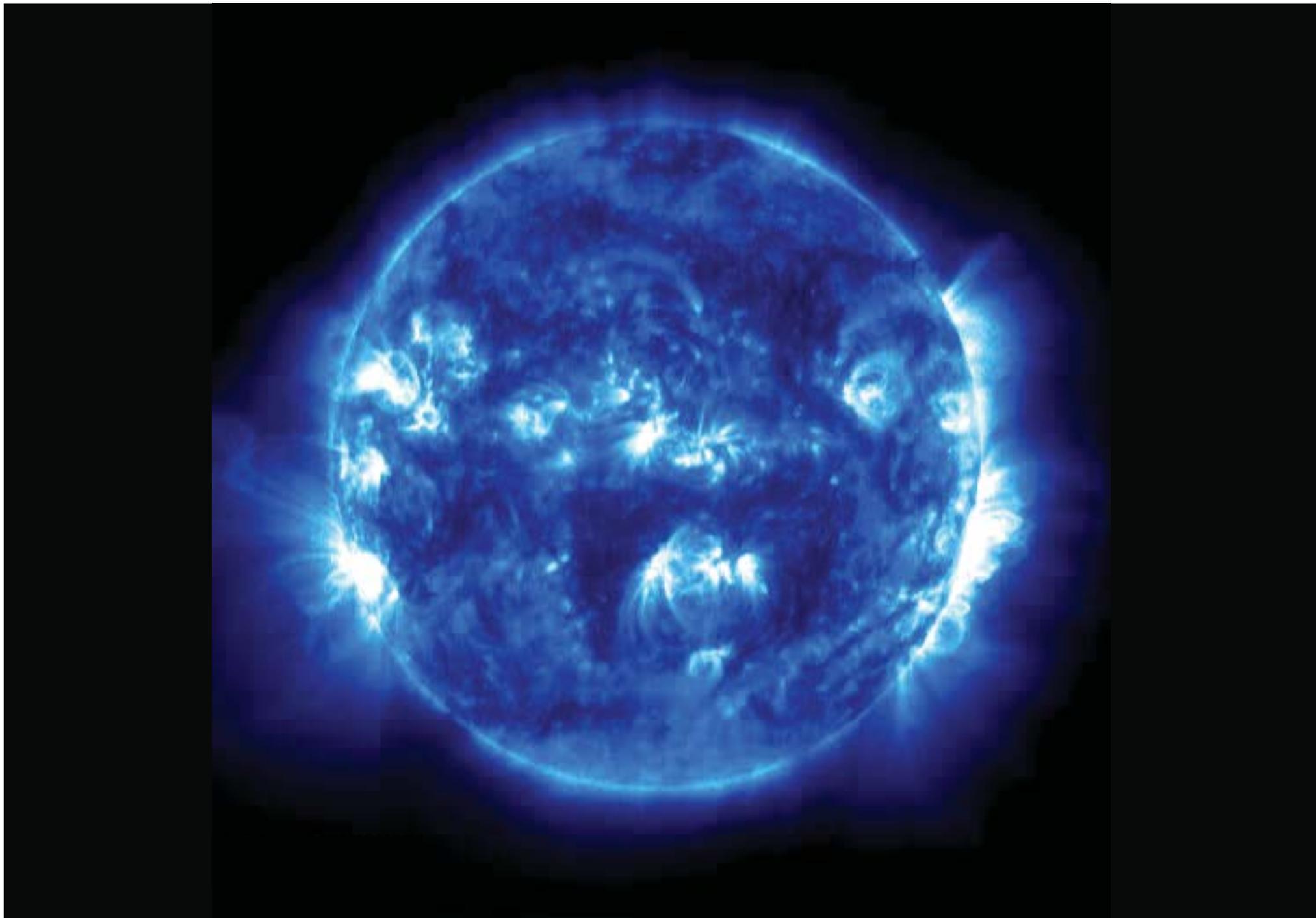
Force nucléaire



A glowing purple sphere with a blue plasma tail against a black background. The sphere is the lower part of a teardrop shape, with a blue, ethereal tail extending upwards from its top. The colors transition from a deep purple at the bottom of the sphere to a bright blue at the top of the tail.

Plasma

le 4^{ème} état de la matière





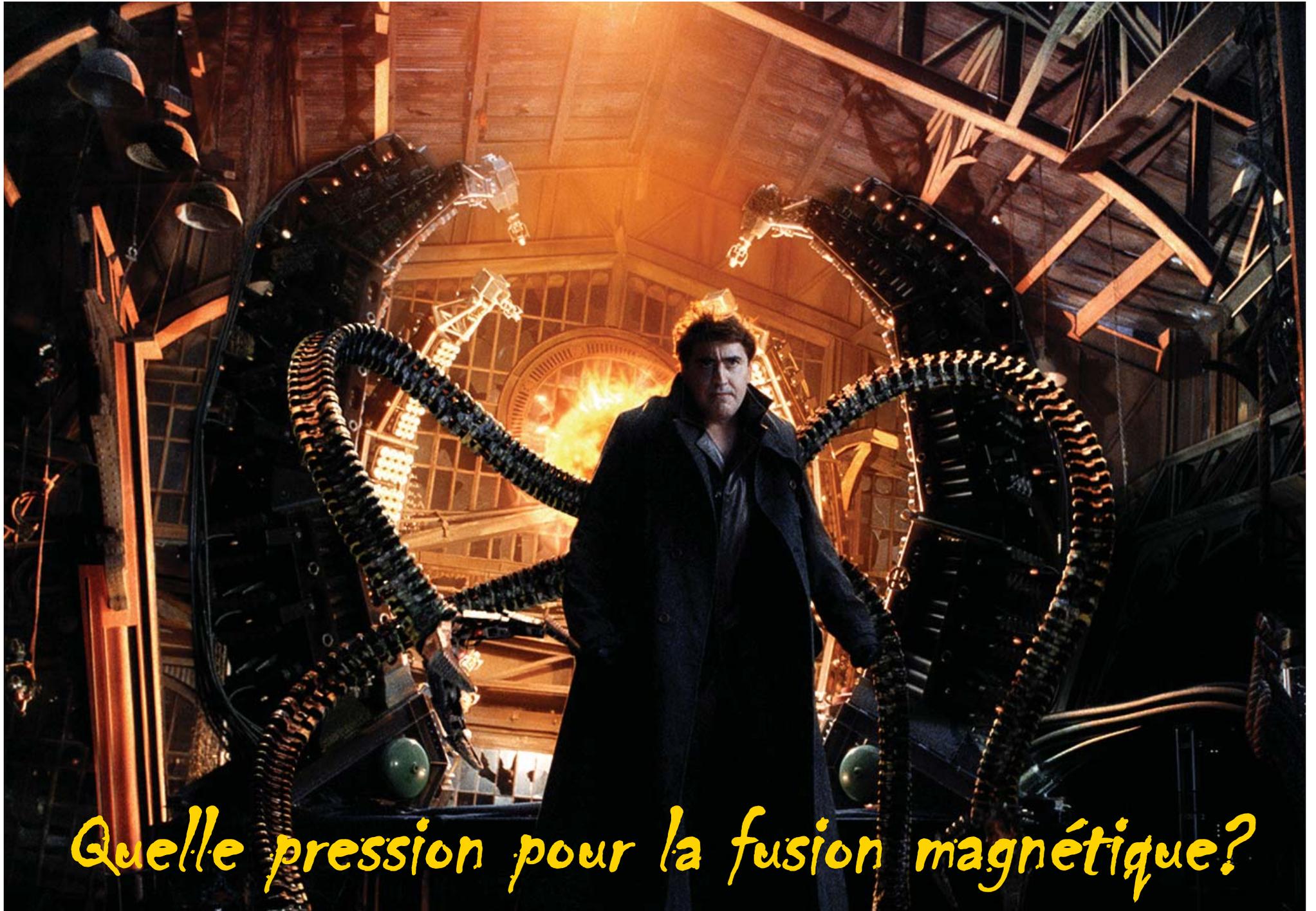
| 3 |

Nihil novi sub sole



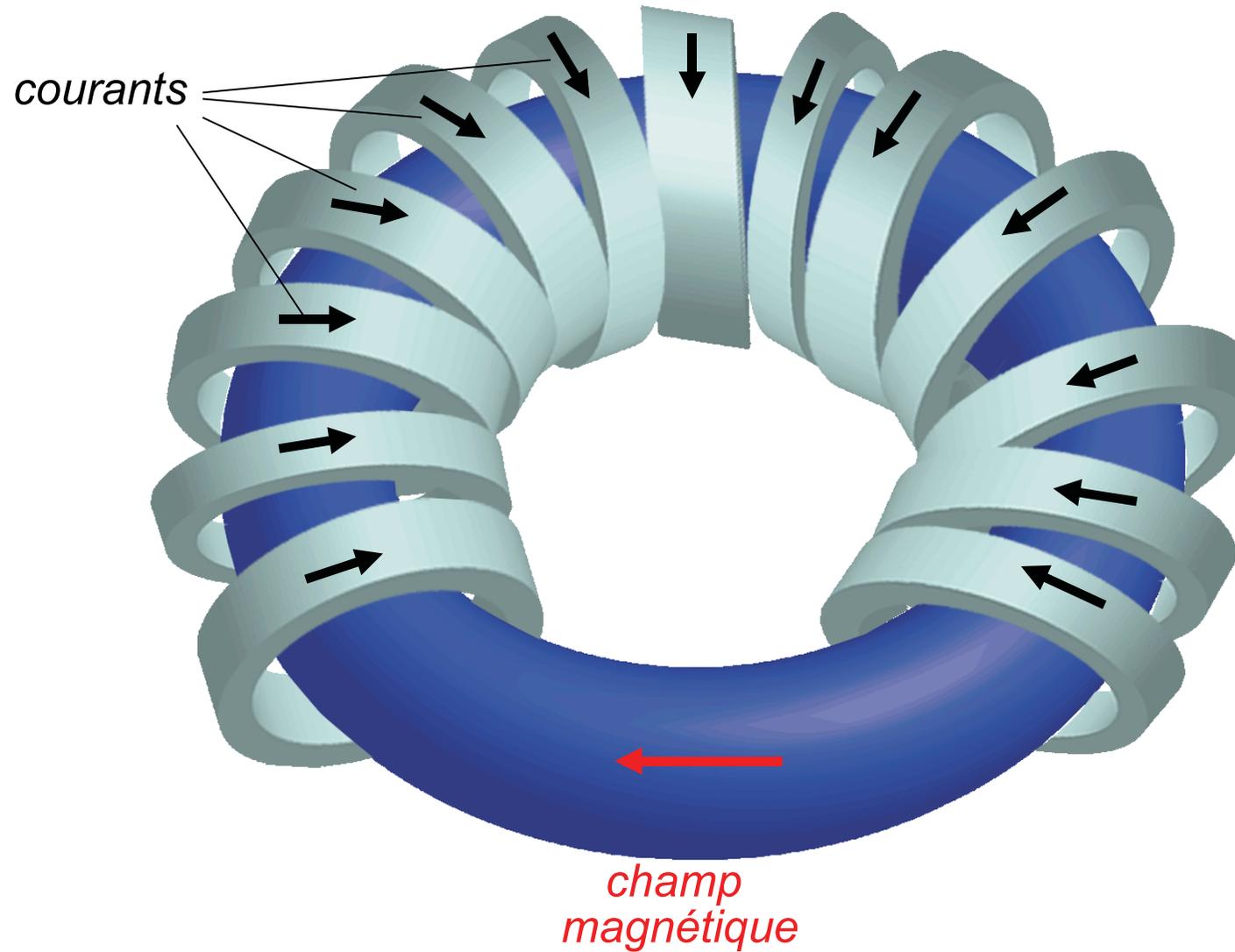
Fusion magnétique



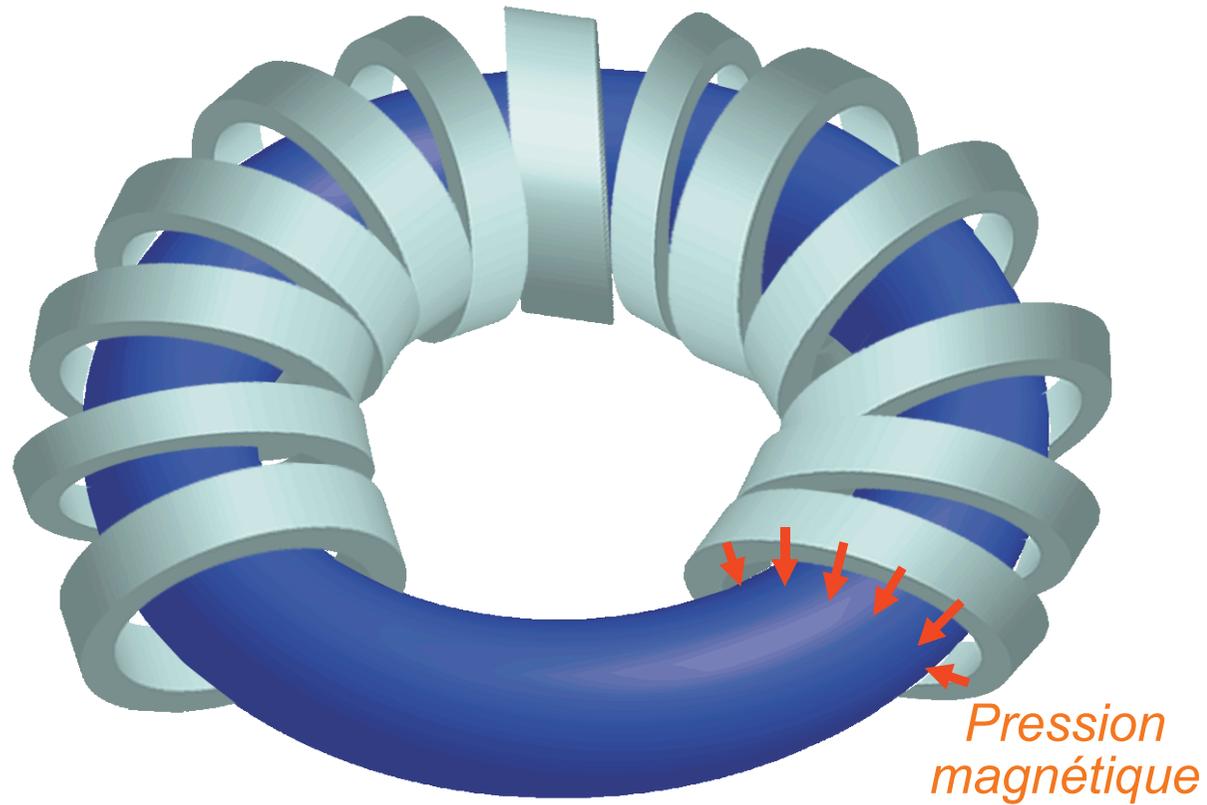


Quelle pression pour la fusion magnétique?

Un anneau de plasma confiné par un champ magnétique...



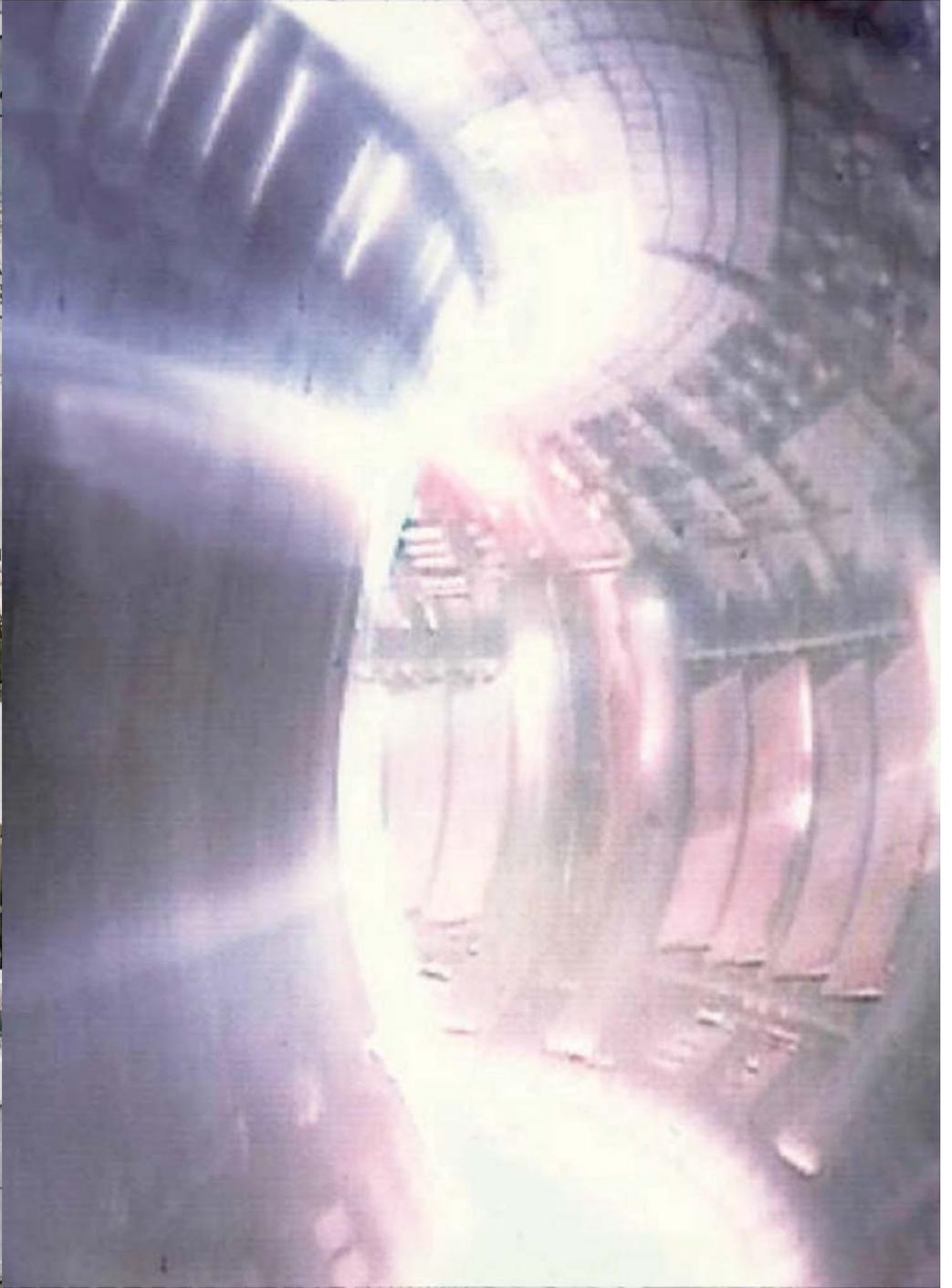
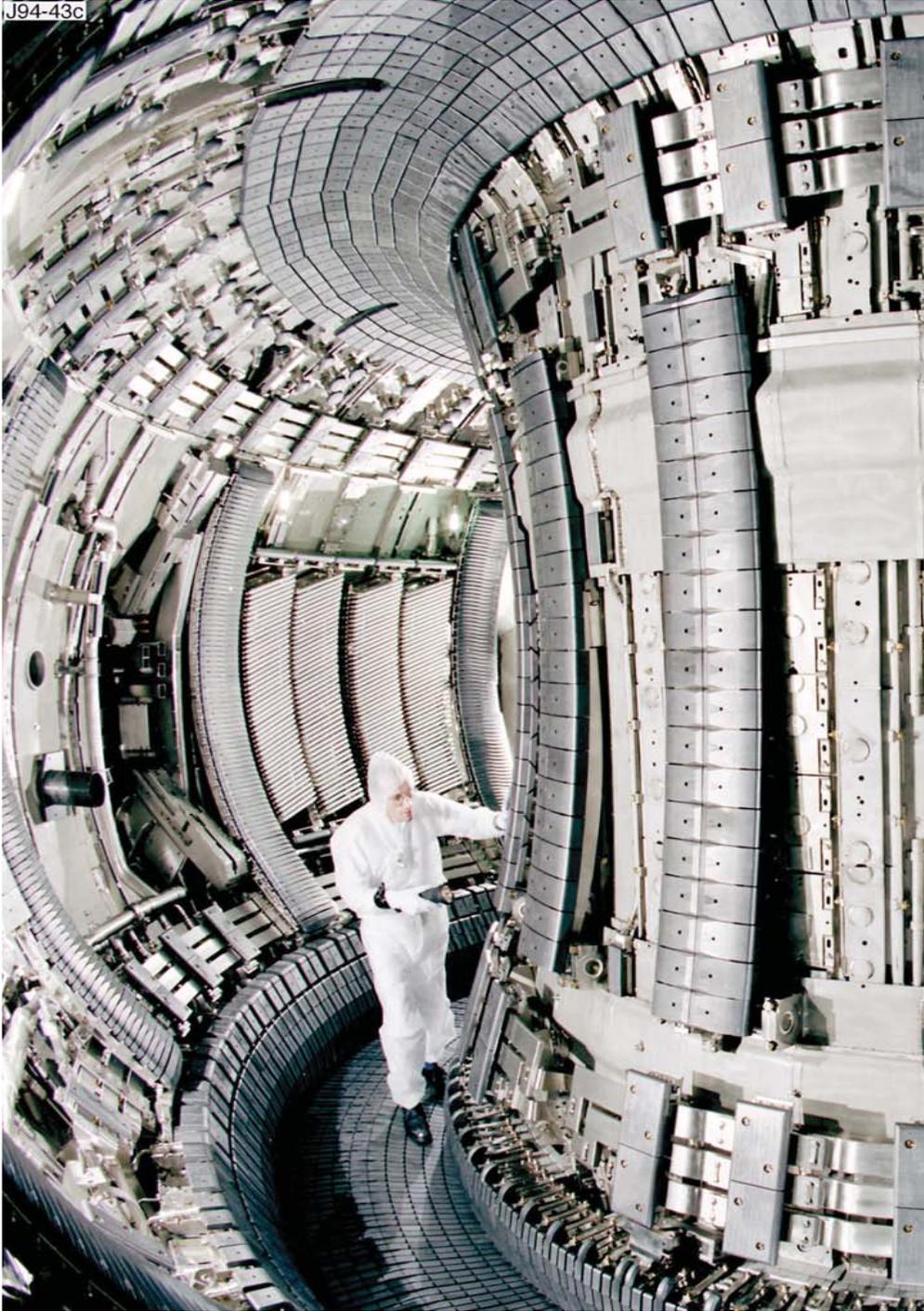
Pression d'un plasma de fusion magnétique



pression magnétique maximum $\sim B^2/2\mu_0 \sim 100$ atmosphères ($B \sim 5T$)

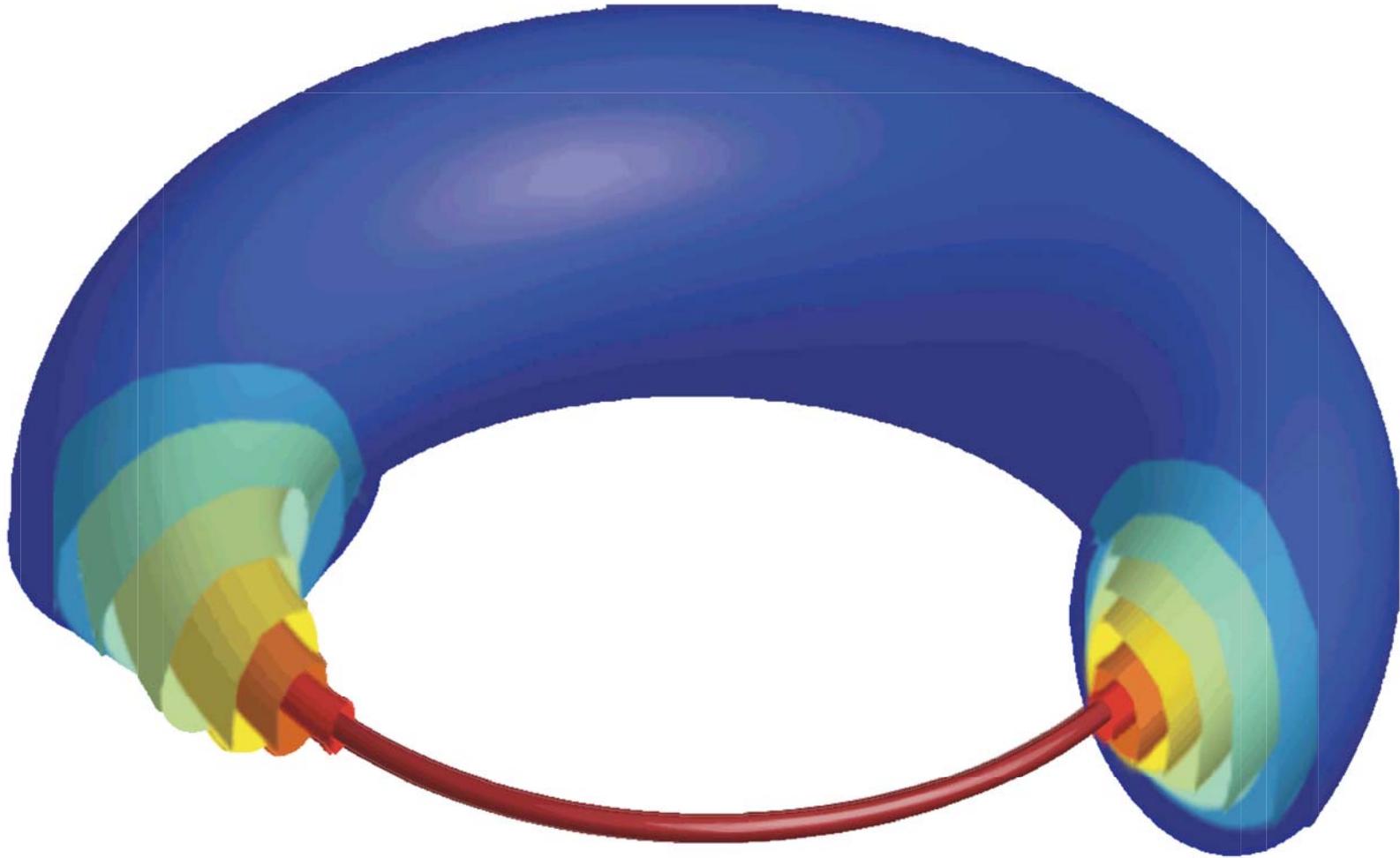
pression plasma \sim quelques atmosphères

J94-43C



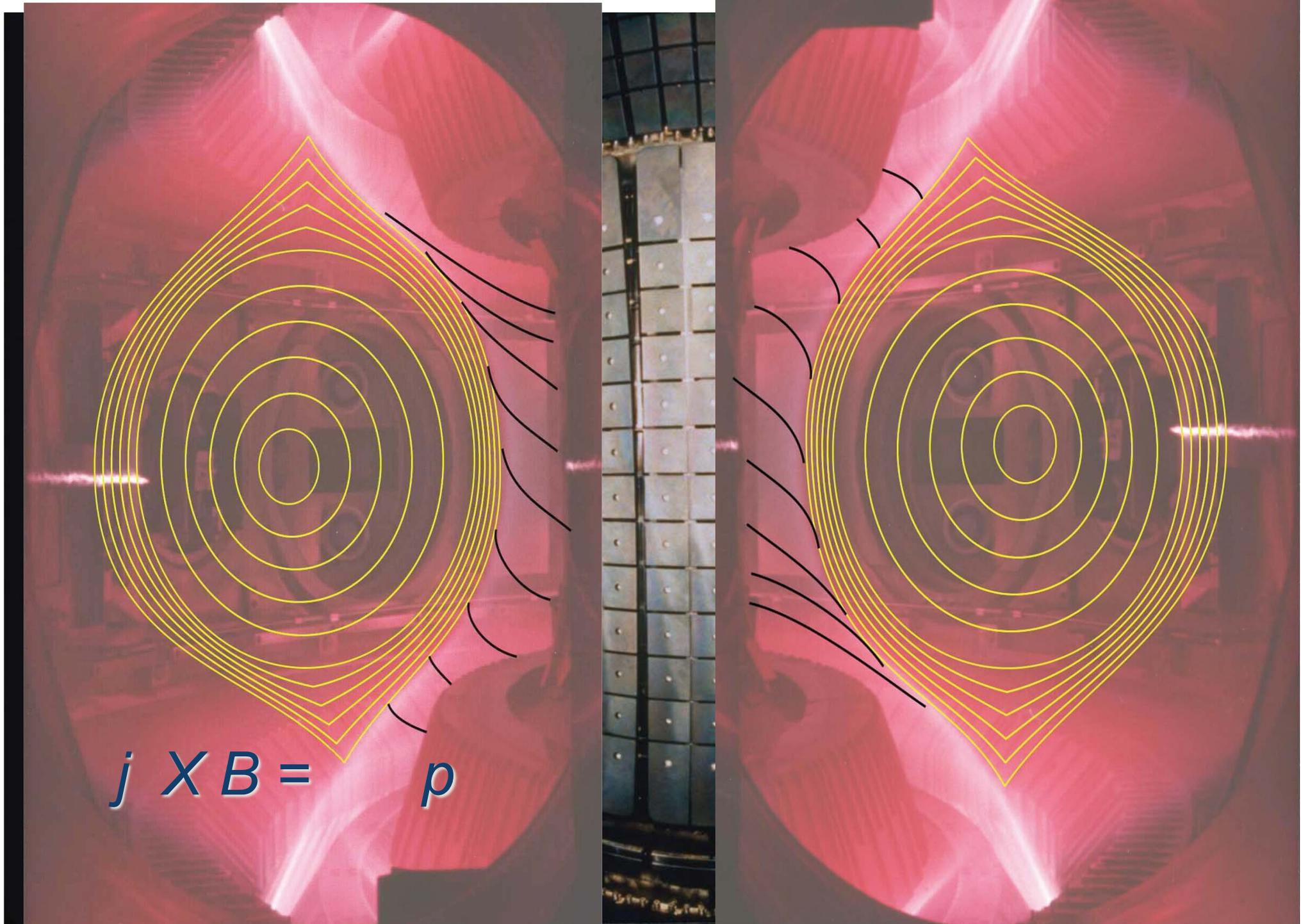


Quelle taille pour un réacteur de fusion magnétique?



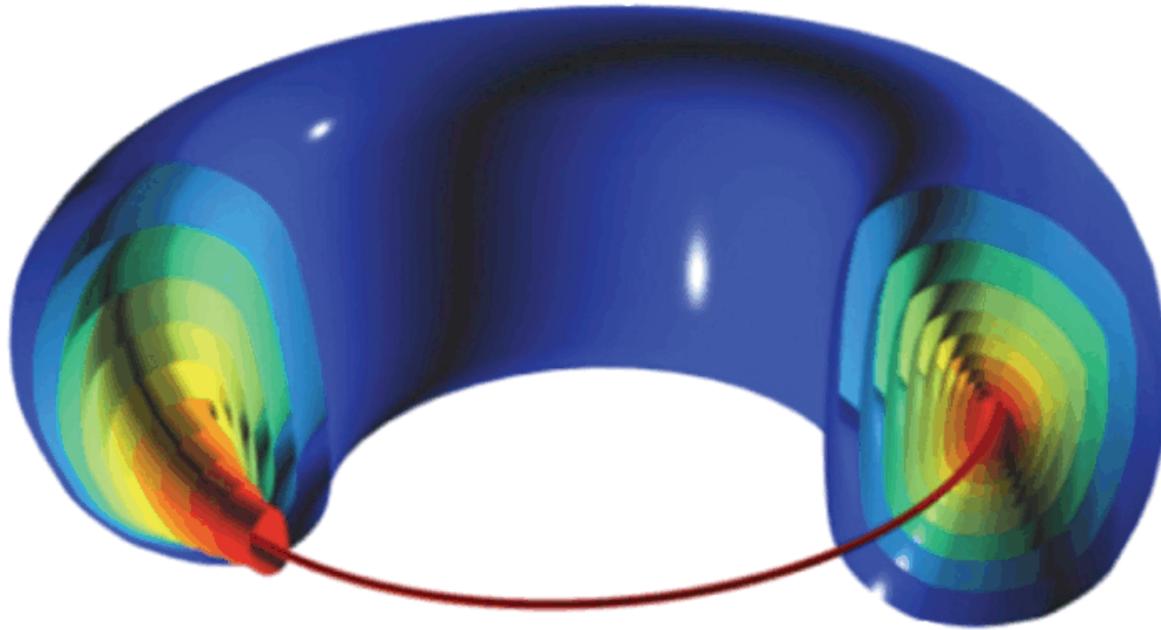
Température ~ 150 millions de degrés
Pression ~ atmosphérique
Masse ~ dixième de gramme
Densité puissance ~ 10 Megawatt par mètre cube







Contrainte d'auto entretien de la température du cœur du plasma



La température du cœur du plasma doit être maintenue par puissance de chauffage déposée dans le cœur par l'hélium

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

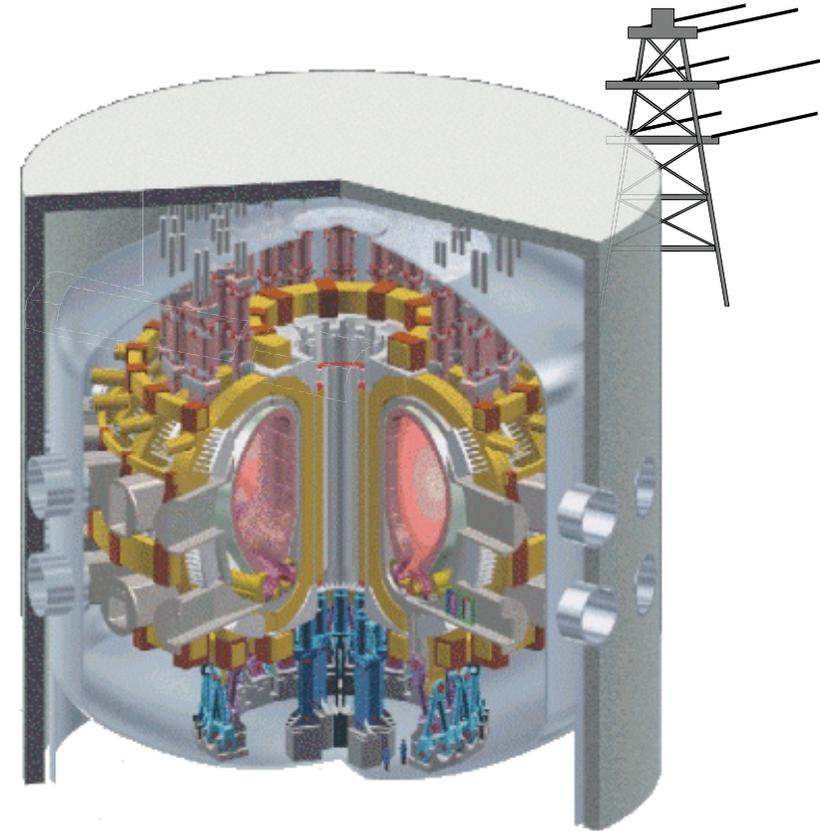
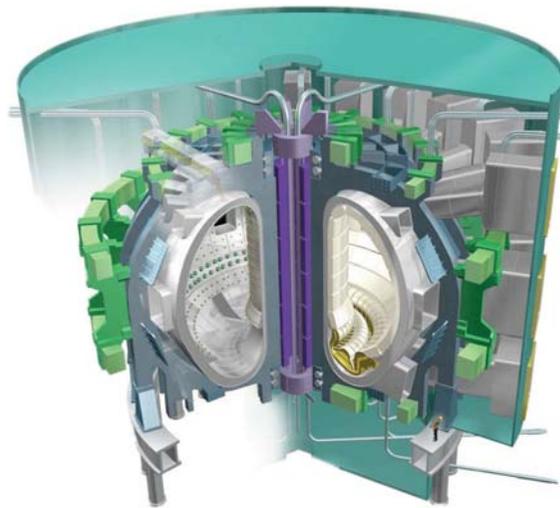
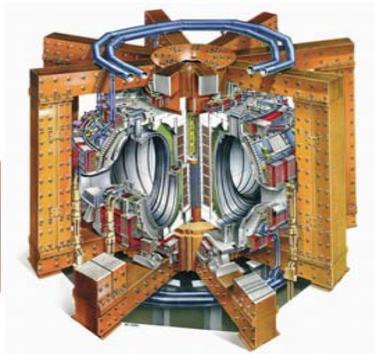
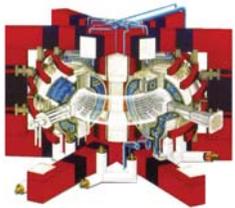
Pertes = énergie stockée dans le plasma / temps de refroidissement

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



temps de refroidissement du plasma \sim seconde

Des plasmas de plus en plus auto-chauffés...



Tore Supra

25 m³

~ 0 MW_{th}

Auto-chauffage

0%

JET

80 m³

~16 MW_{th}

Auto-chauffage

10%

ITER

830 m³

~ 500 MW_{th}

Auto-chauffage

70%

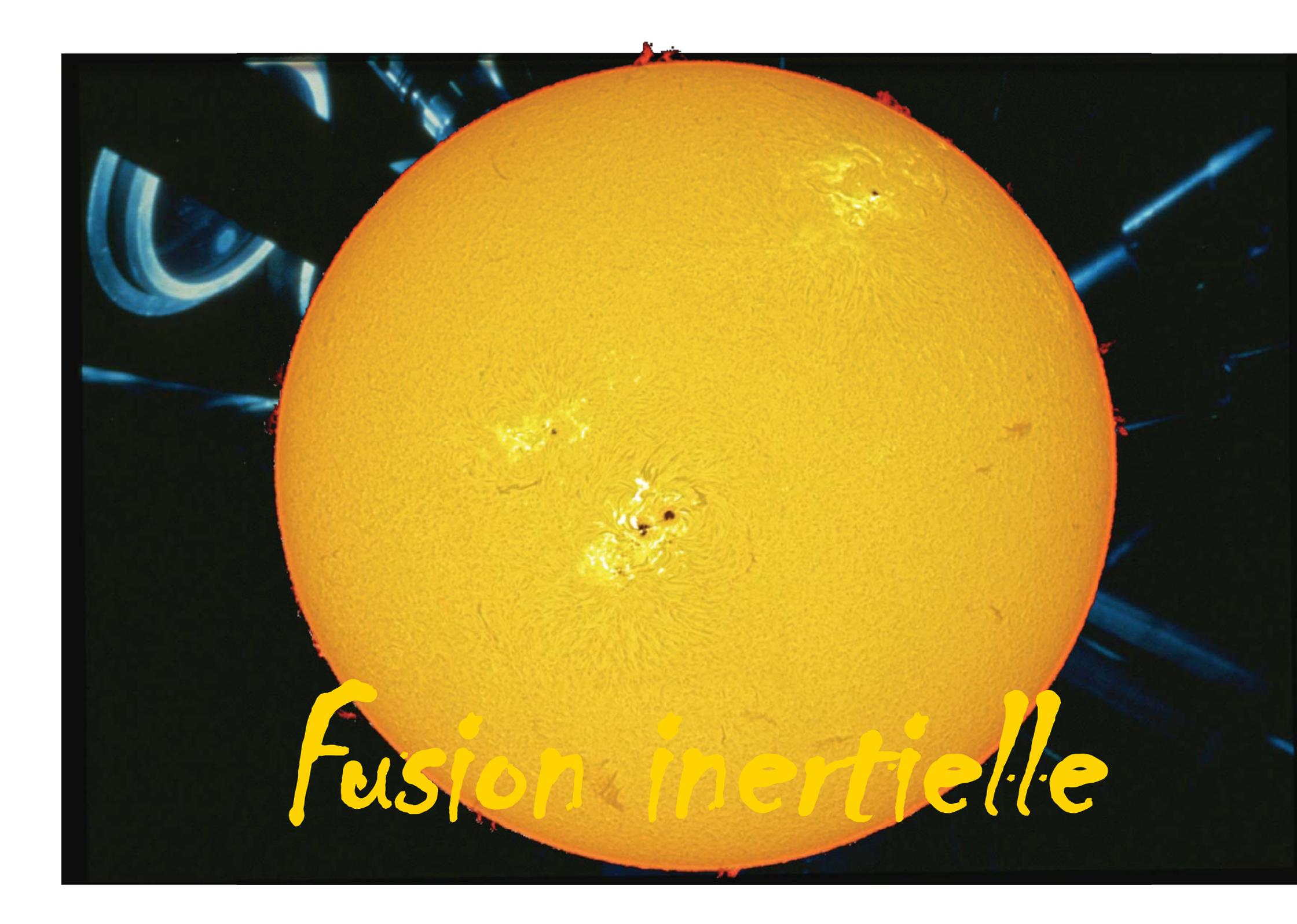
Réacteur

~ 1000 - 3500 m³

~ 3000 - 5000 MW_{th}

Auto-chauffage

80-90%



Fusion inertielle

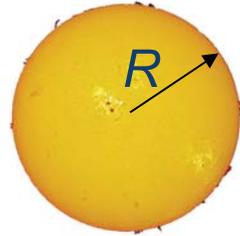
Principe de la fusion inertielle



*Chauffer très rapidement une sphère de combustible deutérium-tritium
à 150 millions de degrés*

*Compter sur l'inertie pour que le nombre de réactions soit suffisant avant dispersion
-pour bruler une fraction importante du combustible
-pour produire plus d'énergie que ce qui a été investi pour le chauffage*

Bruler une fraction importante du combustible...



Le nombre de réactions de fusion varie comme le carré de la densité

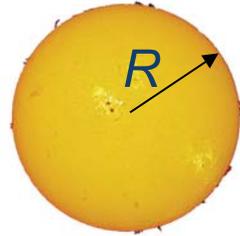
La quantité de combustible varie comme la densité

Le nombre de réaction est proportionnel au temps pendant lequel le combustible reste confiné avant de se disperser après amorce des réactions de fusion

$$\text{fraction brulée (\%)} \sim (r^2 / r) (R / C_s) \sim r R$$

$$\text{fraction brulée (\%)} \sim 30\% \quad r R \sim 3 \text{ g / cm}^2$$

...en limitant les dégâts



$$\text{fraction brulée (\%)} \sim (r^2 / r) (R / C_s) \sim r R$$

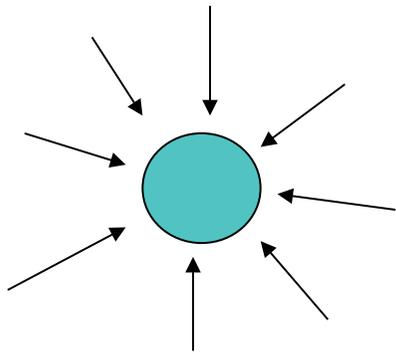
$$\text{fraction brulée (\%)} \sim 30\% \quad \boxed{W} \quad r R \sim 3 \text{ g / cm}^2$$

Energie produite

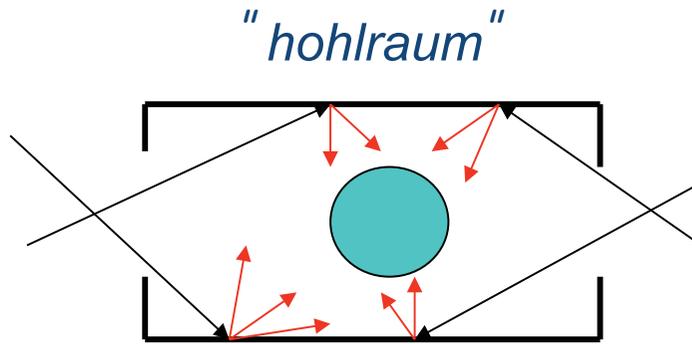
DT solide $r \sim 0.25 \text{ g / cm}^3$ $R \sim 12 \text{ cm}$ (1.8 kg D-T) $E \sim 50 \text{ kilotonne TNT}$
~ 3 Little Boy (Hiroshima)

DT comprimé $r \sim 300 \text{ g / cm}^3$ $R \sim 0.1 \text{ mm}$ (1 mg D-T) $E \sim 100 \text{ MJ} \sim 25 \text{ kg TNT}$
Mille fois la densité du solide....

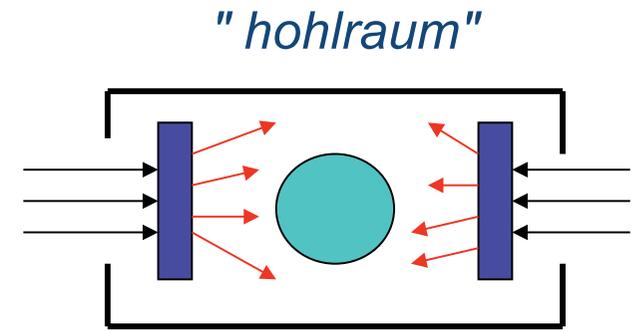
Fusion inertielle laser / ions lourds



*Attaque directe
(par laser)*

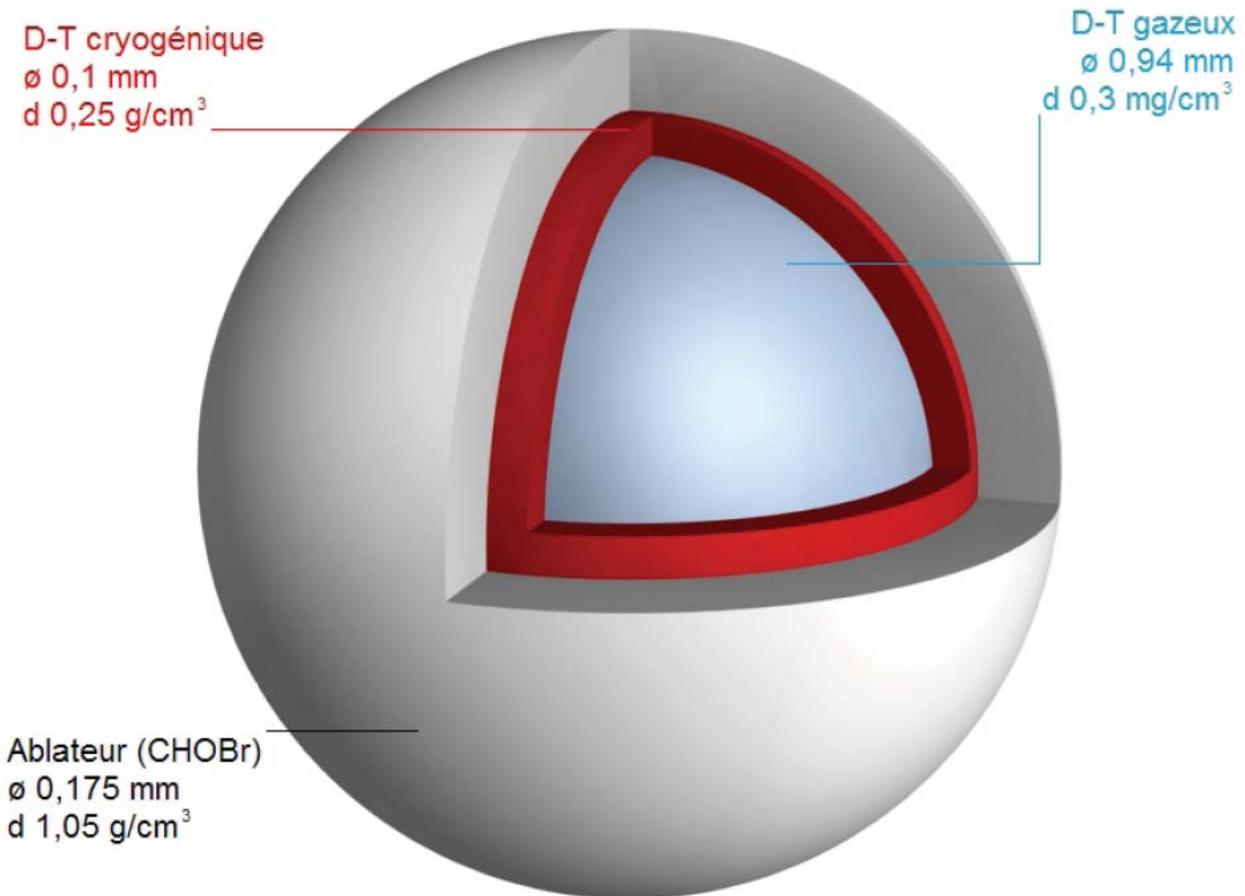


*Attaque indirecte
(par laser)
Conversion X*

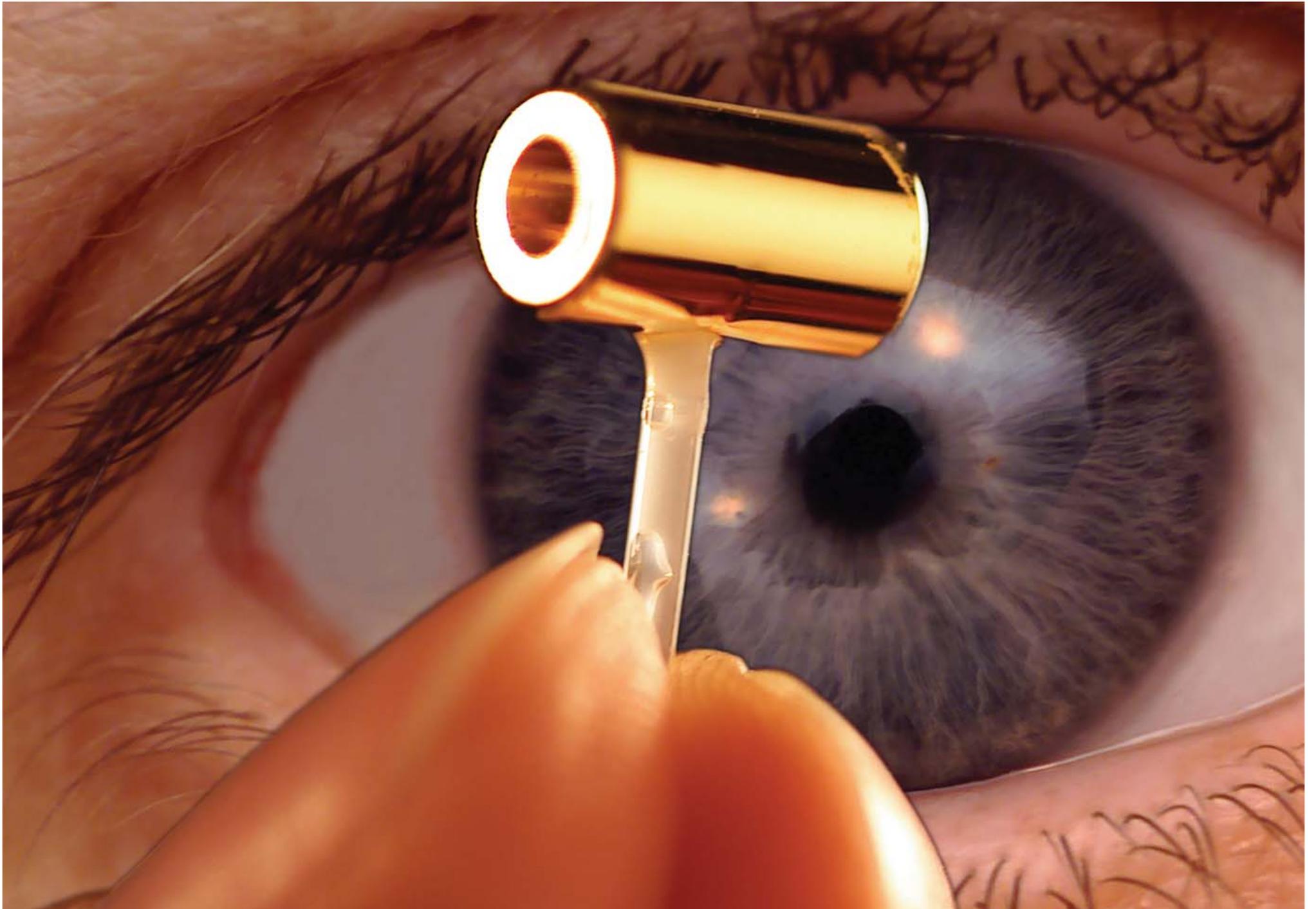


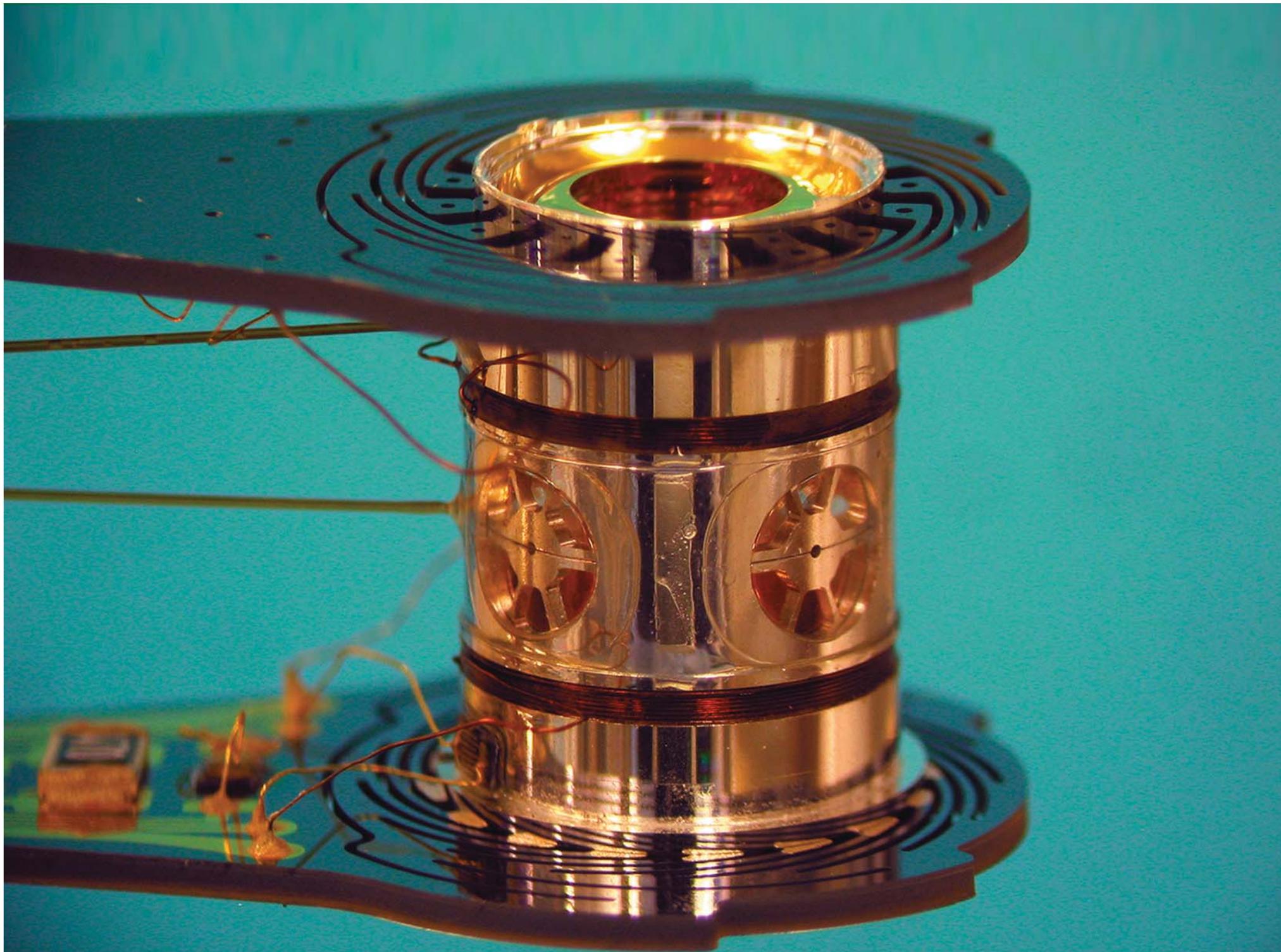
*Attaque indirecte
(par ions lourds)*

Cible fusion inertielle

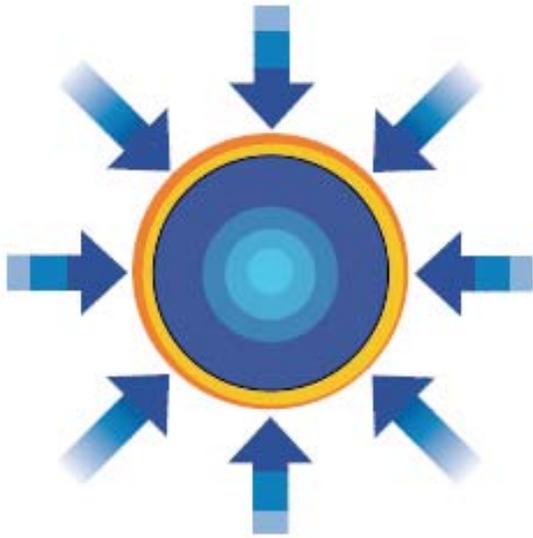


Ø 1 mm D-T solide : 17 K 0.25 g/cm³



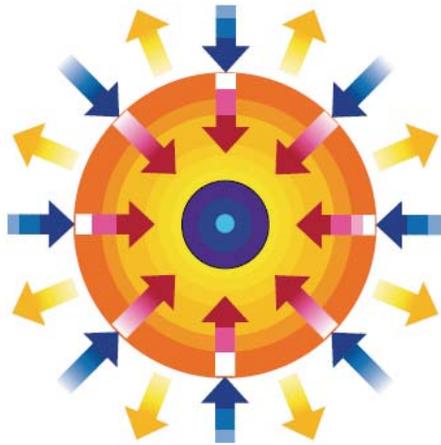


Expansion de l'ablateur & compression DT



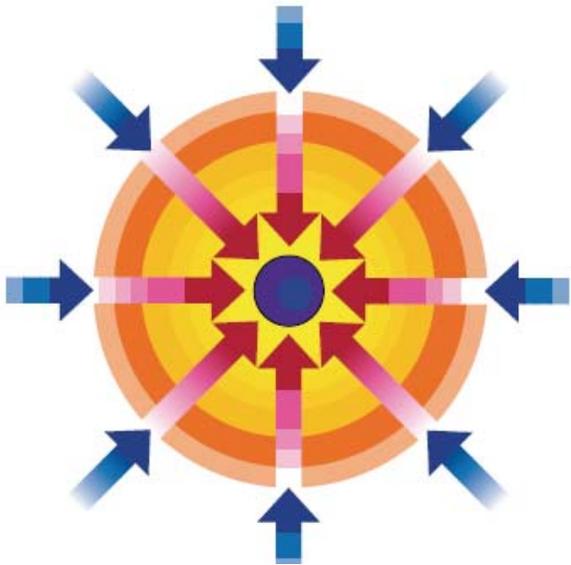
L'ablateur irradié par laser/rayons X est sublimé en plasma

Il est accéléré vers l'extérieur, effet " fusée "



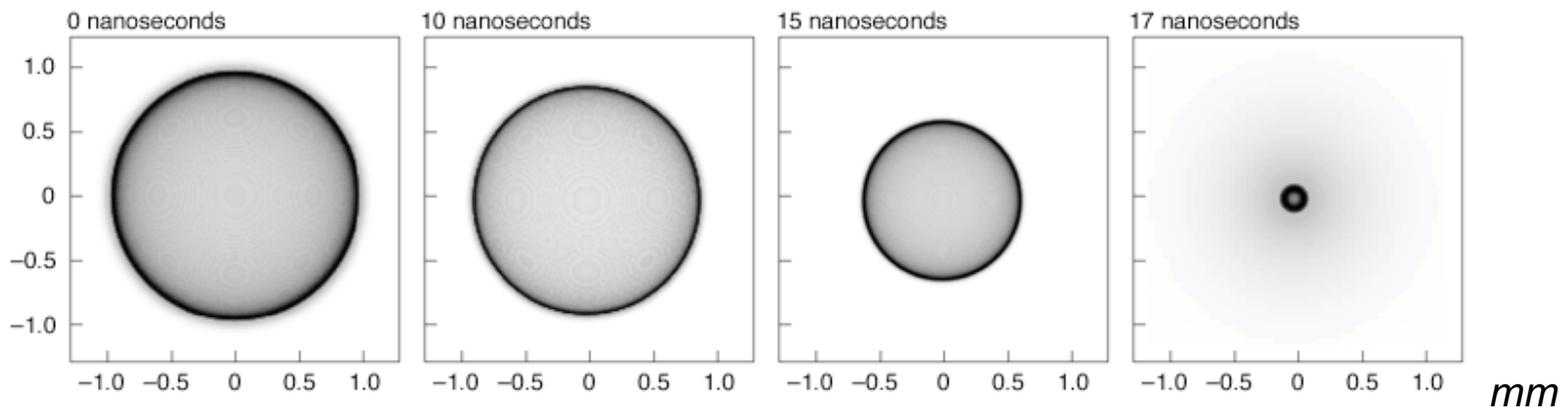
Par réaction le combustible DT est accélérée vers l'intérieur ($v_{finale} \sim 300$ km/s)

Compression DT



Le combustible DT reste relativement " froid " lorsqu'il est compressée jusqu'à une densité ~ 1000 fois supérieure à sa densité initiale (20 fois la densité du plomb)

Le plasma formé par l'ablateur pousse le mélange D-T plus dense, risque instabilité Rayleigh-Taylor, minimisé par accroissement vitesse de compression. Importance faible rugosité ablateur



Ignition par point chaud

La succession d'ondes de choc est modulée de manière à créer un point chaud au centre de la sphère

Les réactions de fusion s'enclenchent lorsque la température du point chaud atteint $T_{fusion} \sim$ centaine de millions de degrés



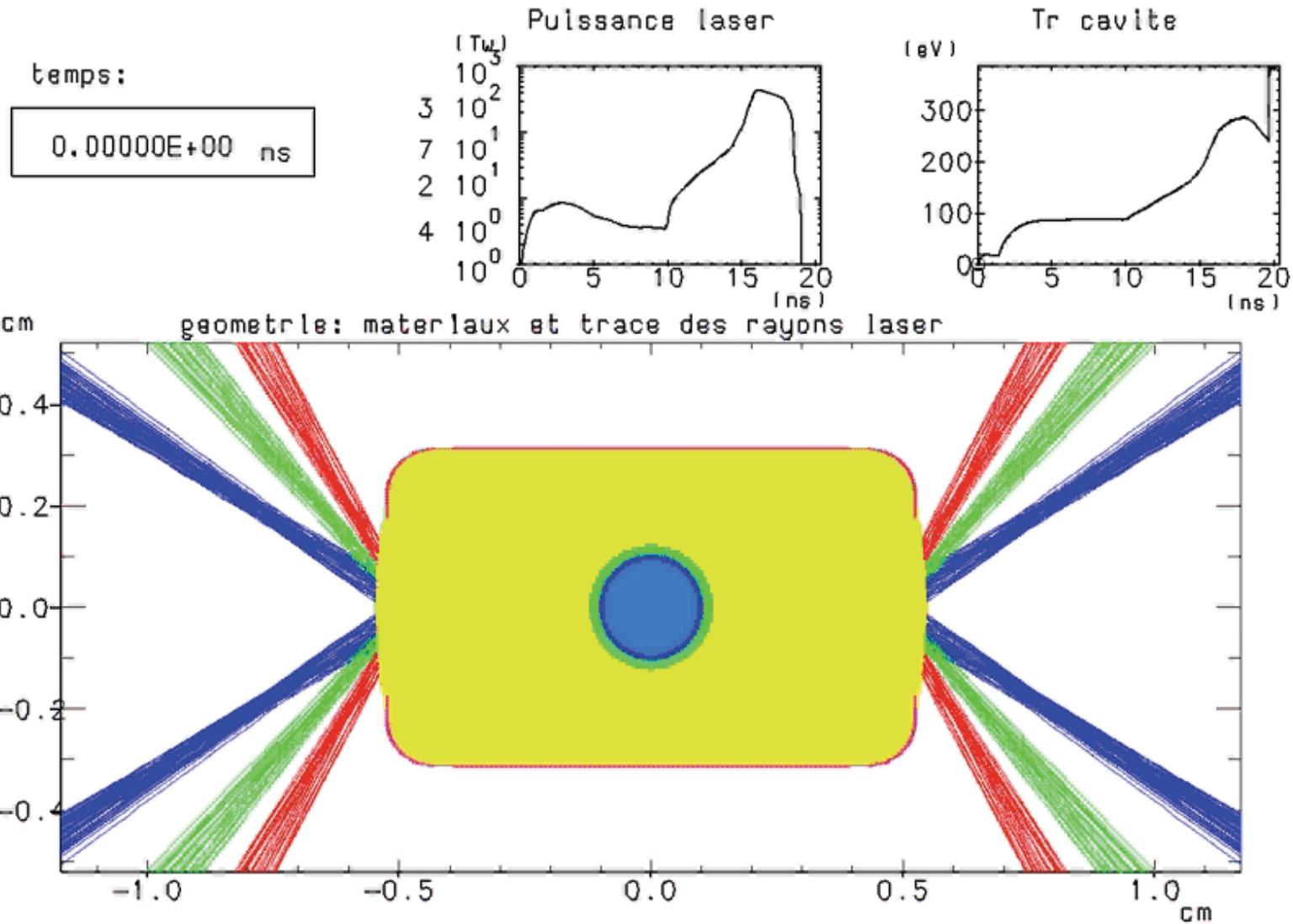
*La densité de la zone de point chaud doit rester faible
Ainsi seulement $\sim 1\%$ de la masse totale est chauffée à T_{fusion}*

*En évitant de chauffer tout le combustible, on augmente le gain
(puissance fusion/ puissance de chauffage)*

Les particules alphas produites au point chaud chauffent la couche dense et relativement froide qui entoure le point chaud

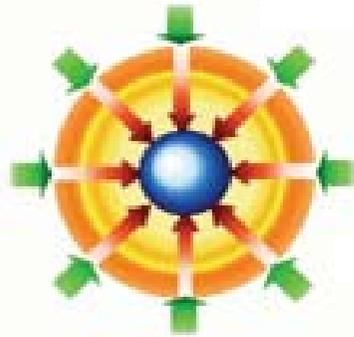
La combustion se propage par couches successives

Attaque indirecte LMJ



Fusion inertielle par allumage rapide

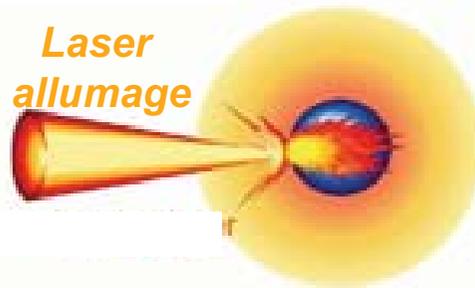
Laser compression



Compression



Laser allumage



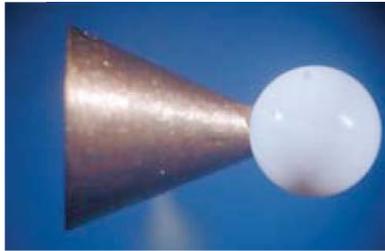
Allumage



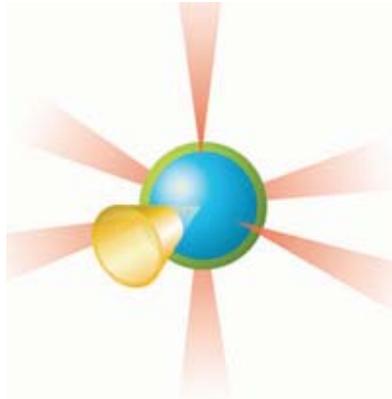
Self burning

Combustion





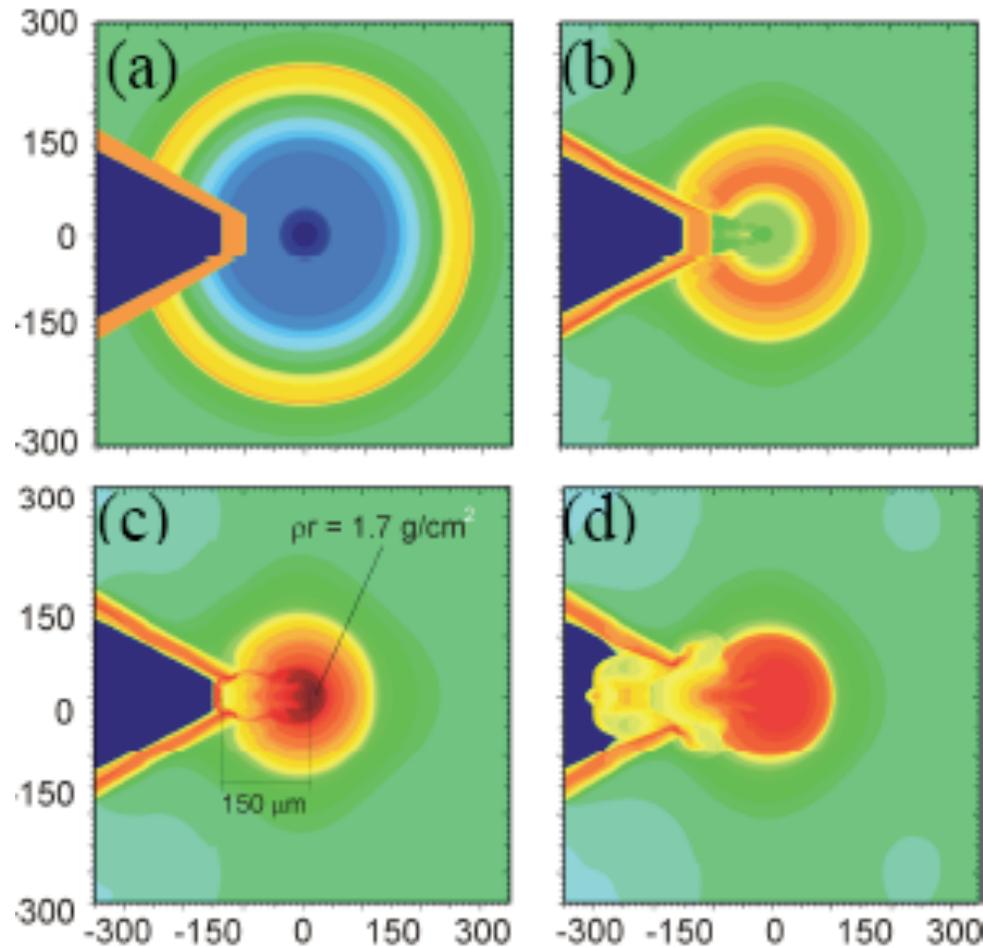
Fusion inertielle par ignition rapide



Compression
(qq ns)



Propagation d'une
impulsion ultra-intense
dans le canal
création d'électrons
~1 MeV
(10 ps)

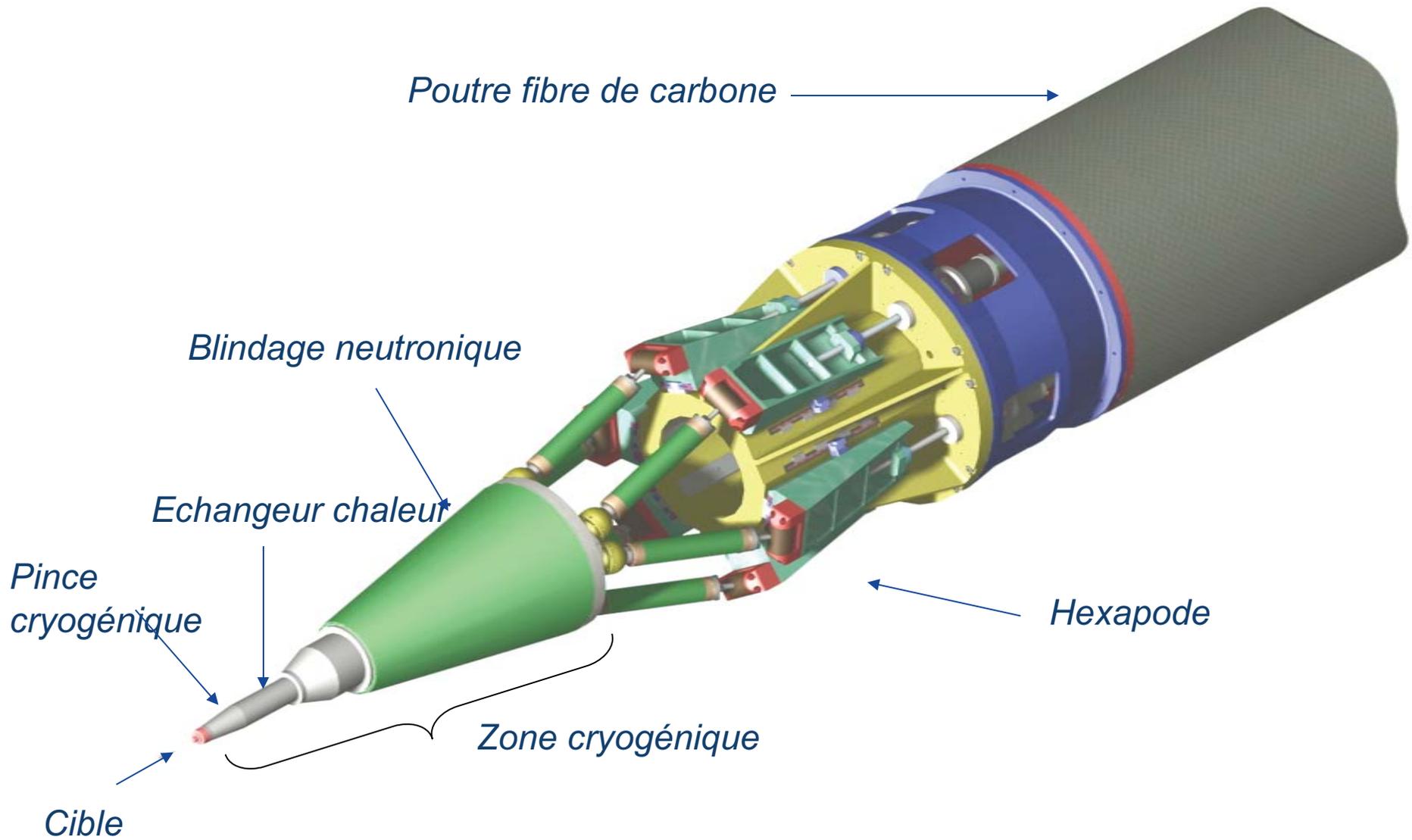


Création d'un
canal à l'aide
d'une impulsion
intense
(100 ps)

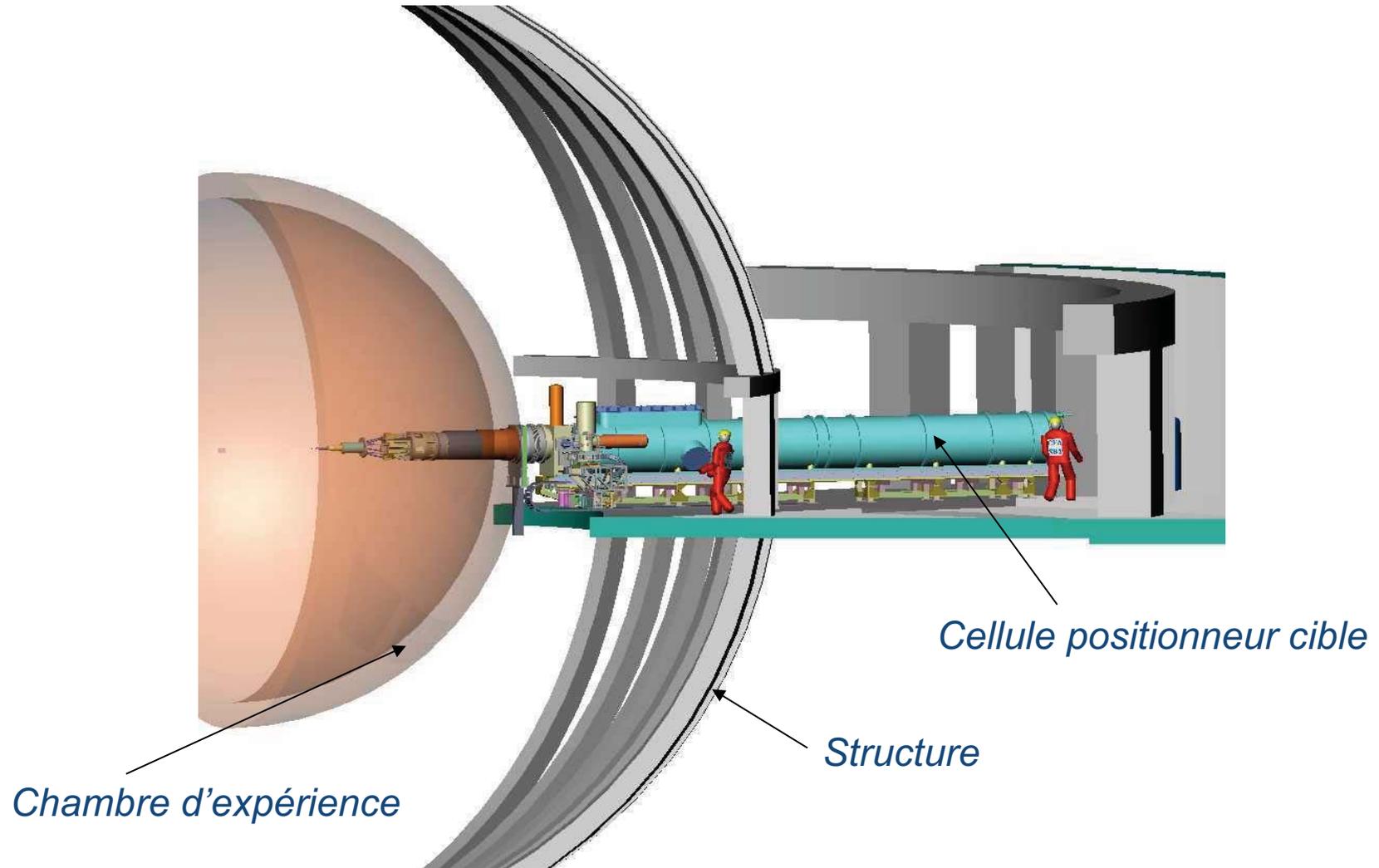


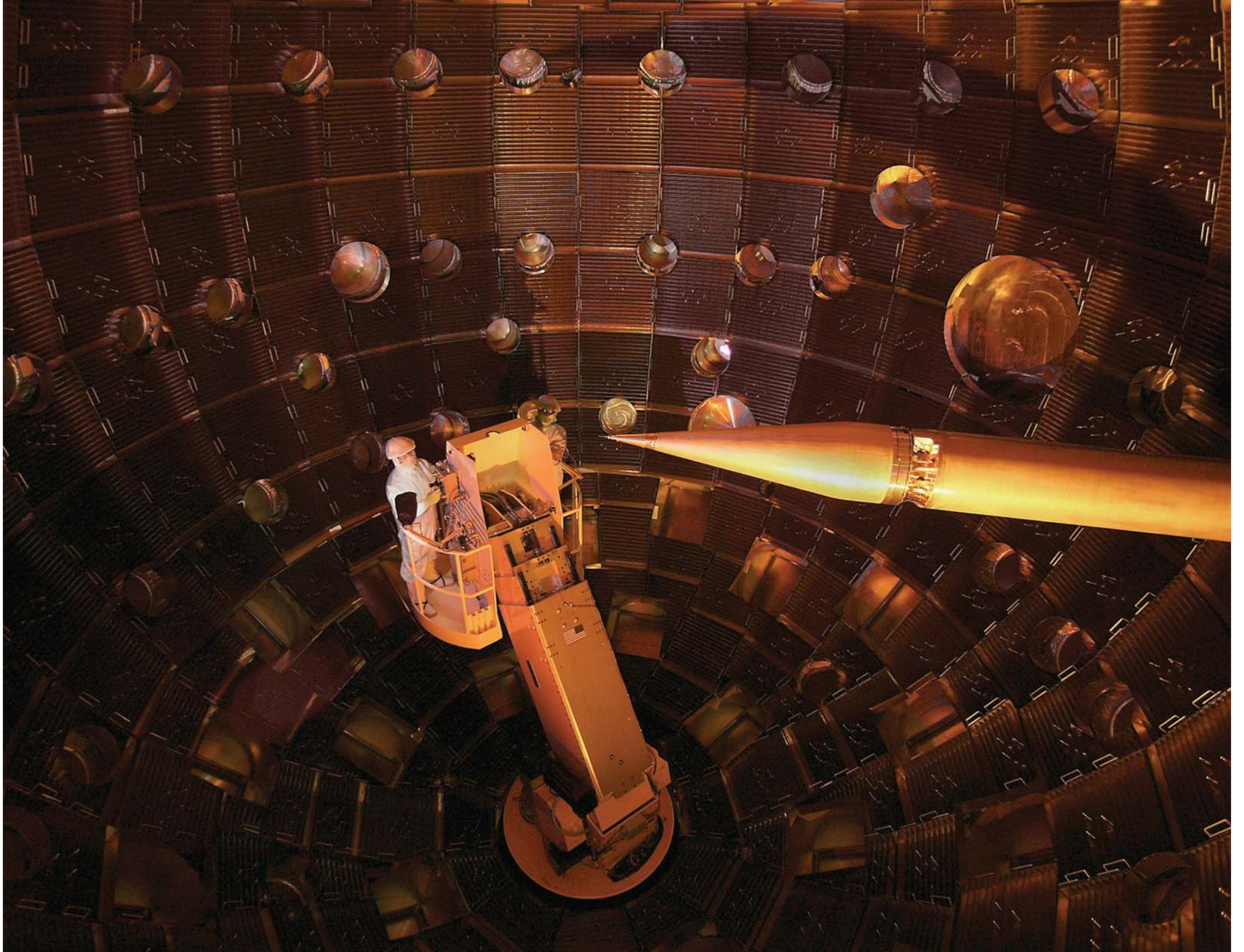
Allumage et
propagation de
la combustion
thermonucléaire
(15 ps)

Support cible LMJ

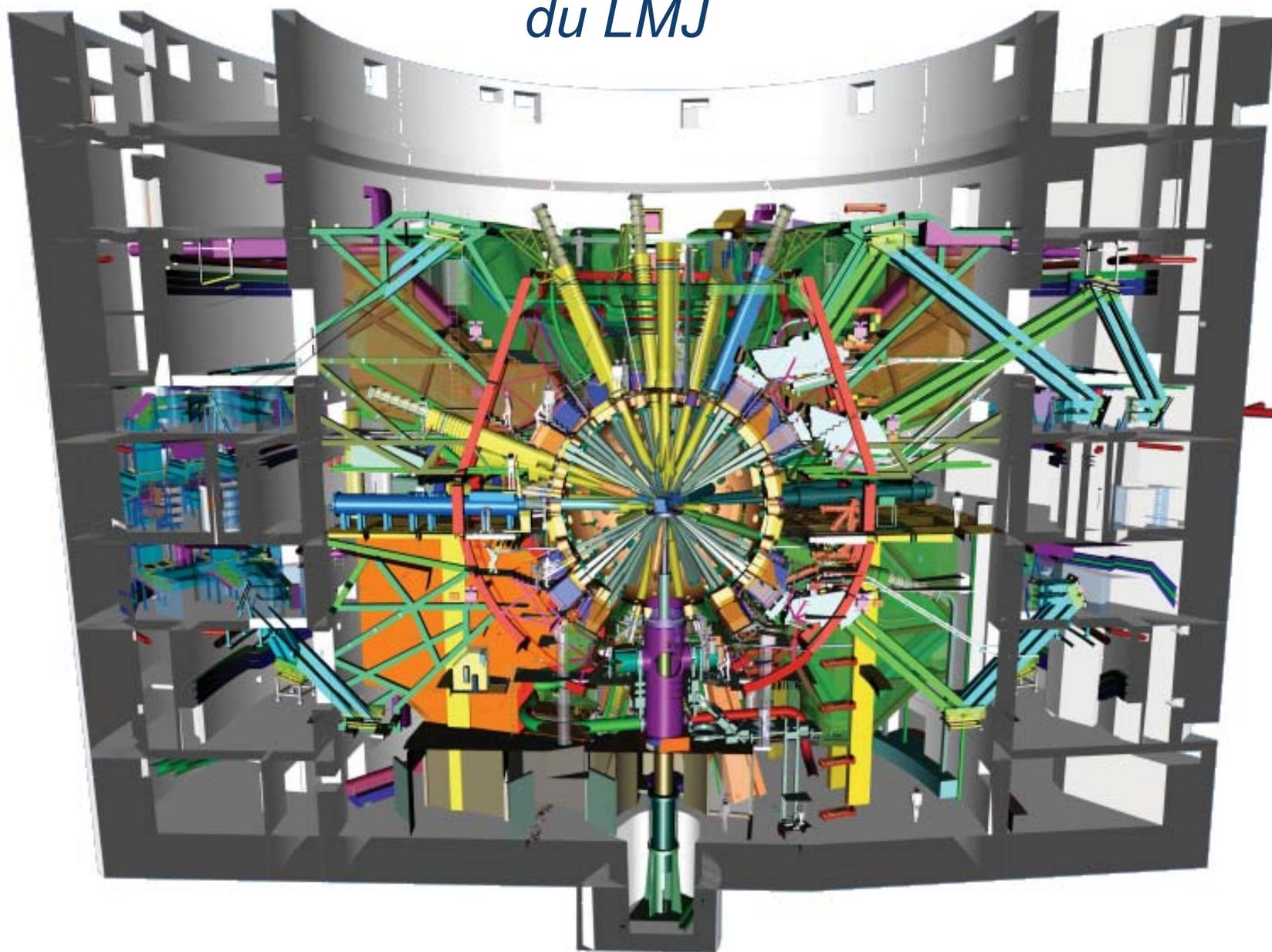


Positionneur cible LMJ

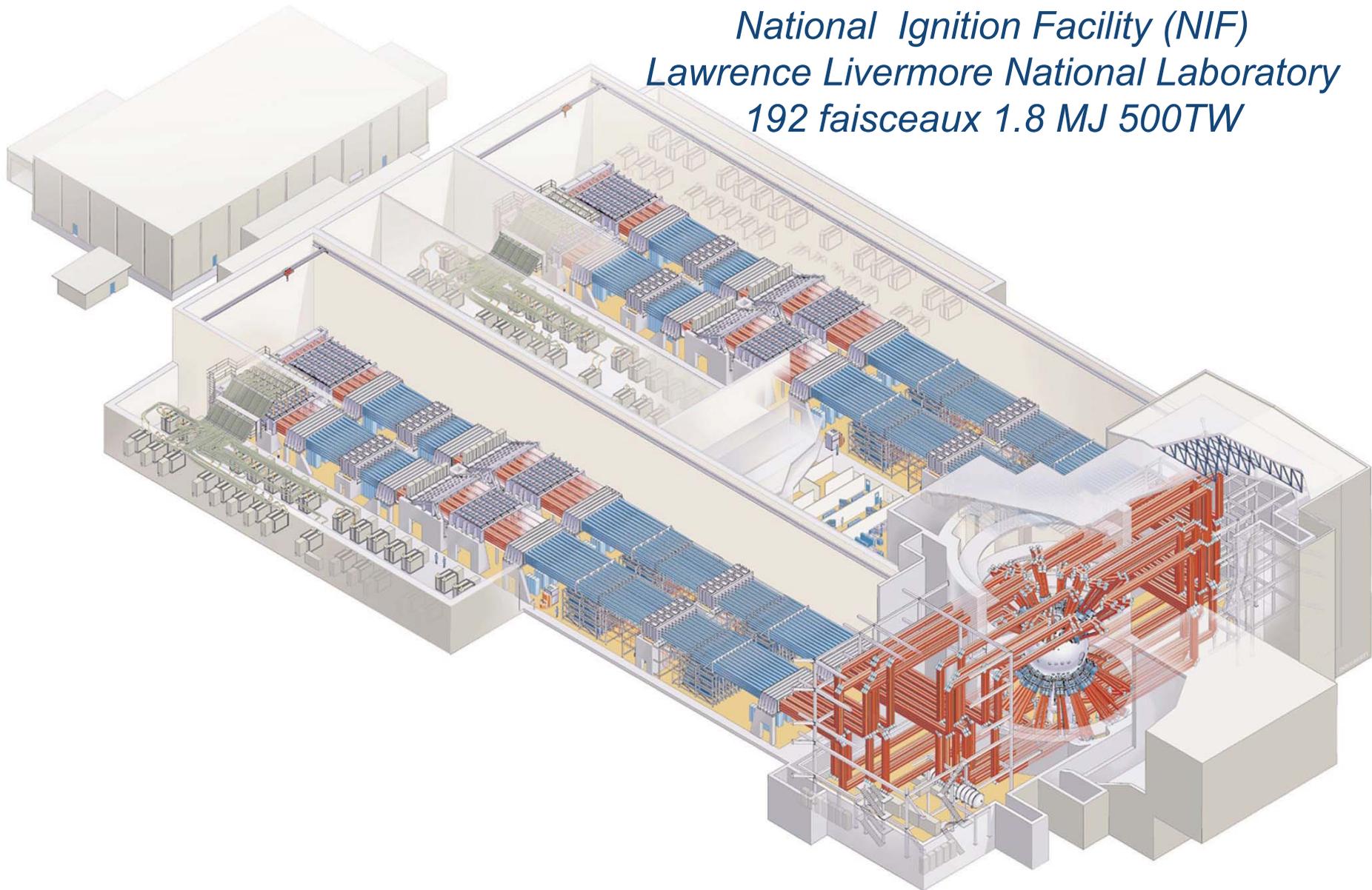




*Le hall d'expérience
du LMJ*



*National Ignition Facility (NIF)
Lawrence Livermore National Laboratory
192 faisceaux 1.8 MJ 500TW*

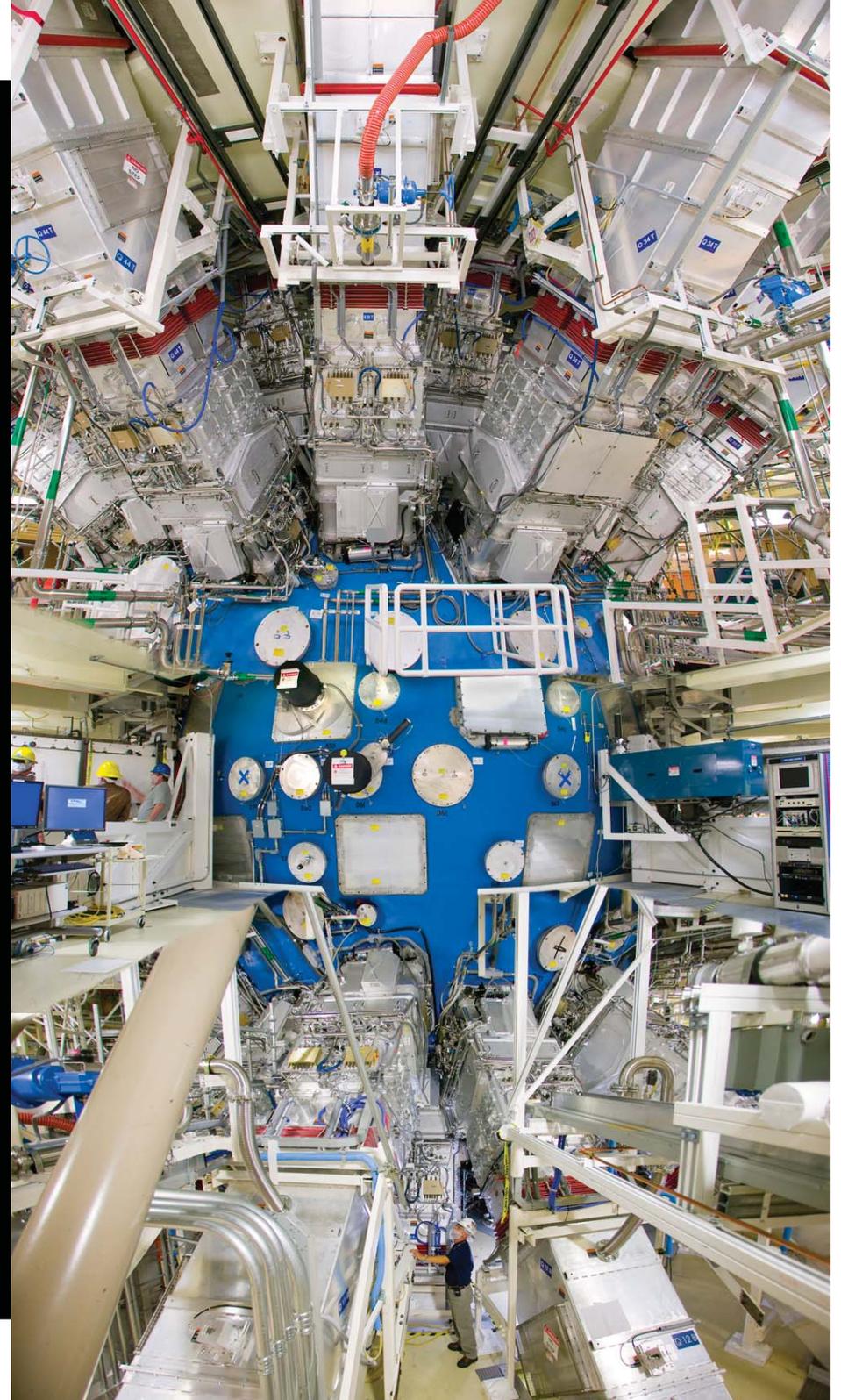




LLNL NIF Schwarzenegger

*NIF
1^{er} tir
192 faisceaux
26 février 2009*

*Janvier 2010
1MJ irradiation uniforme
Limité à 1.3 MJ
dommages optiques ?
Arrêt de 4 mois*

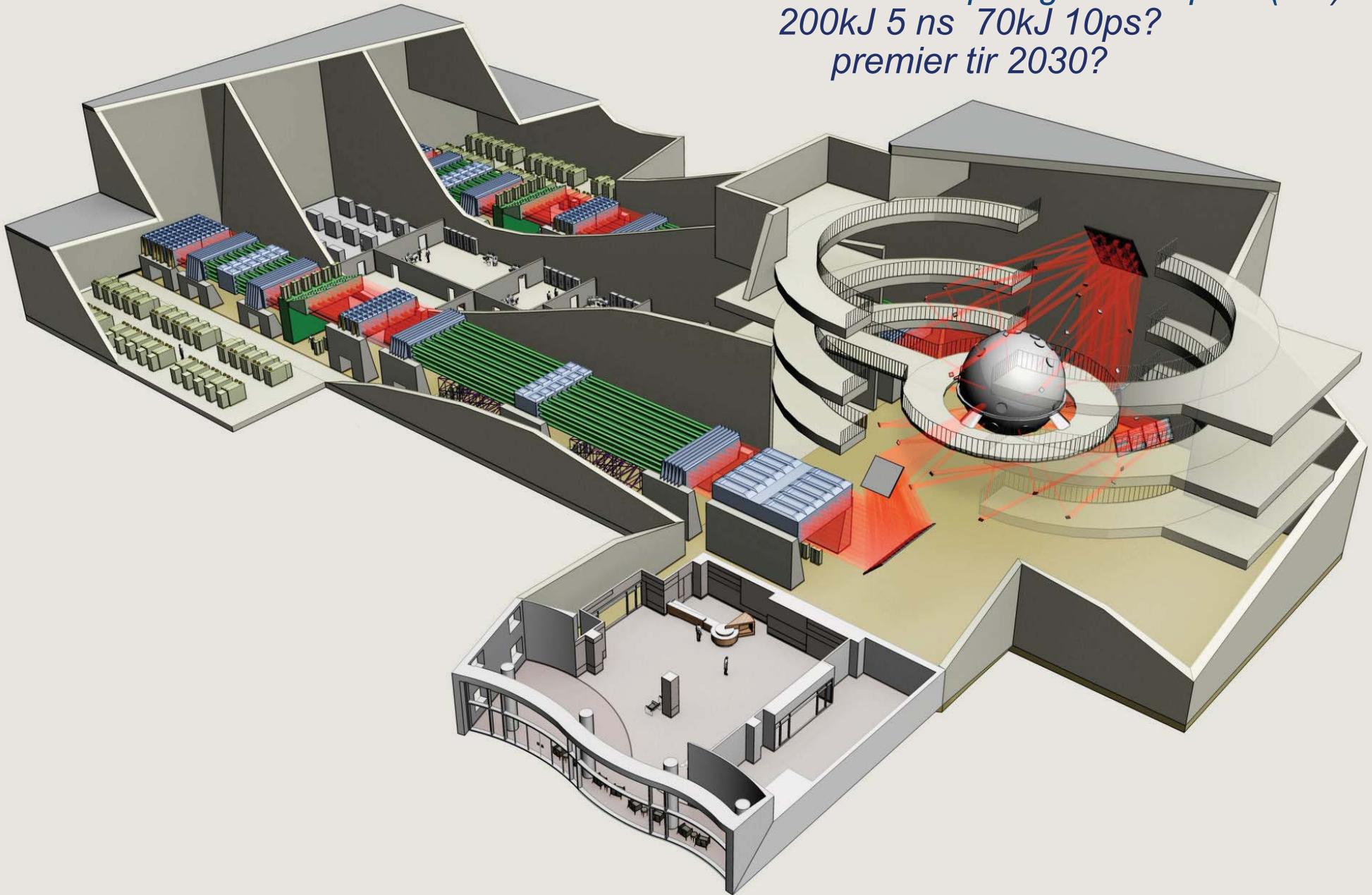


LMJ Mai 2007

1^{er} tir 2014?



*HiPER fusion inertielle par ignition rapide (UE)
200kJ 5 ns 70kJ 10ps?
premier tir 2030?*



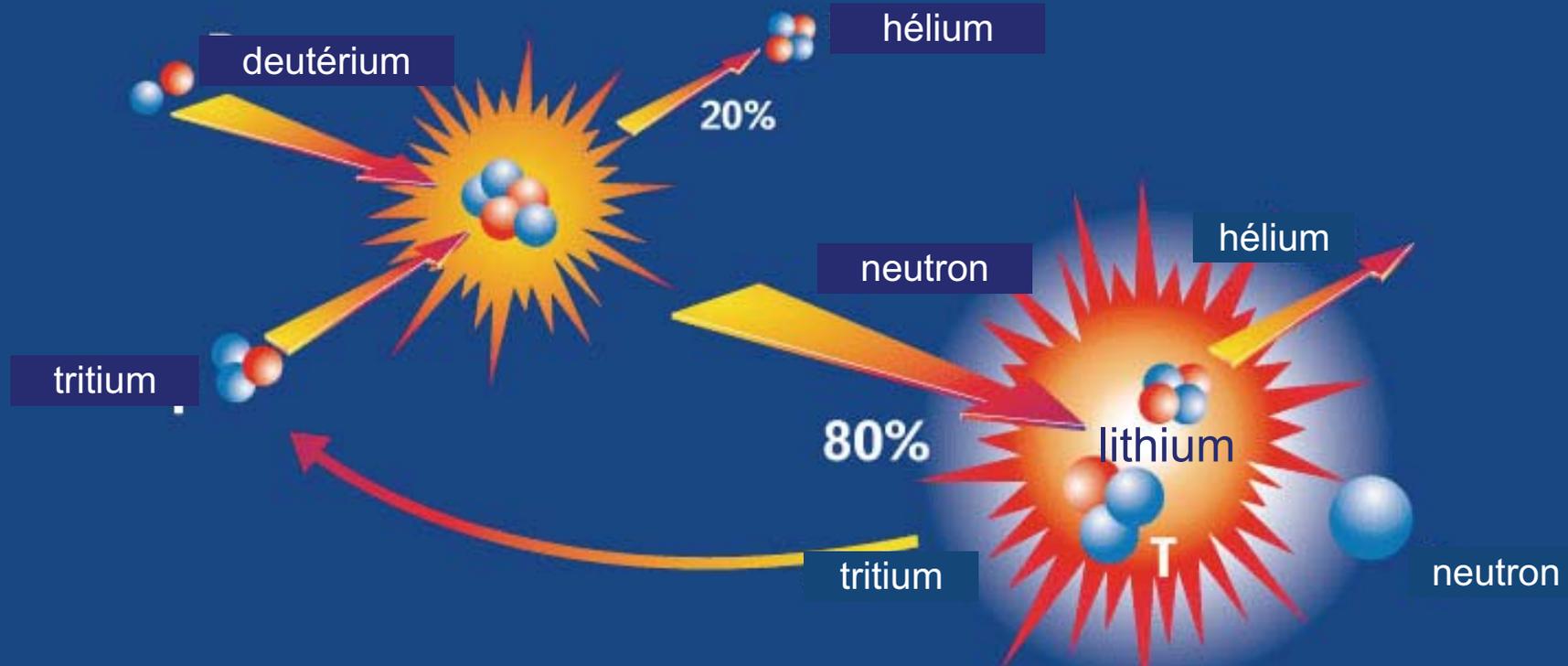


Les combustibles de la fusion



deutérium + tritium → hélium + neutron

Produire du tritium à partir de lithium



deutérium + tritium → hélium + neutron

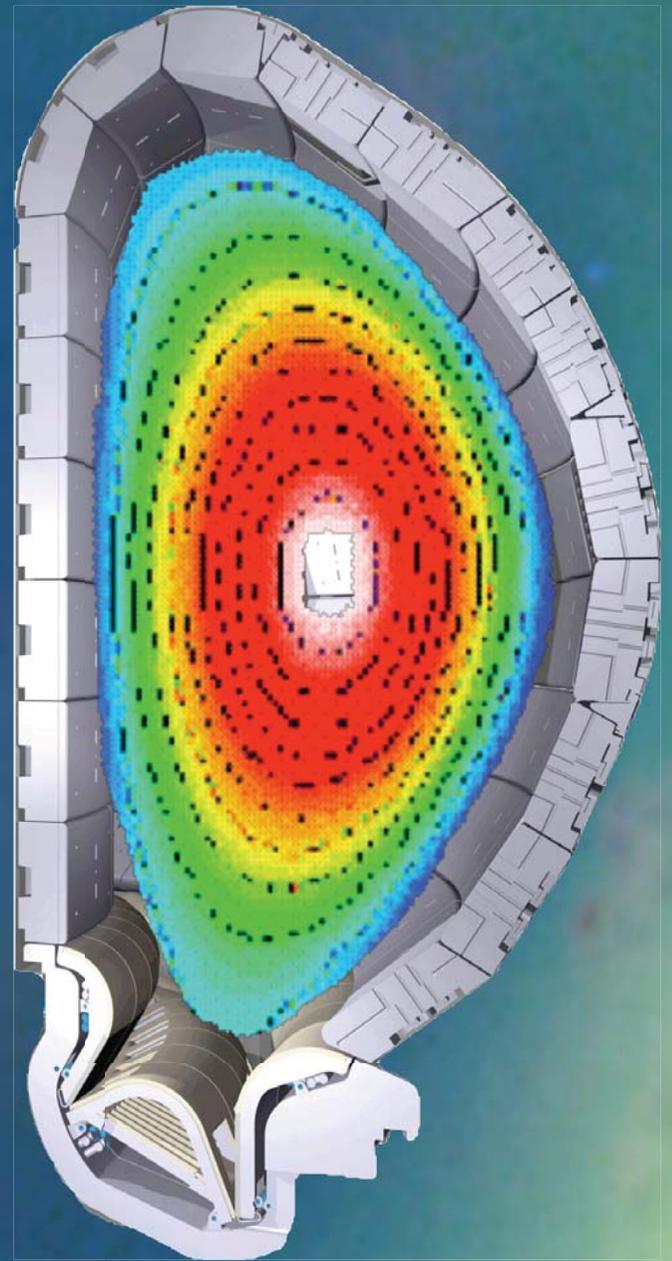
neutron + lithium → hélium + tritium



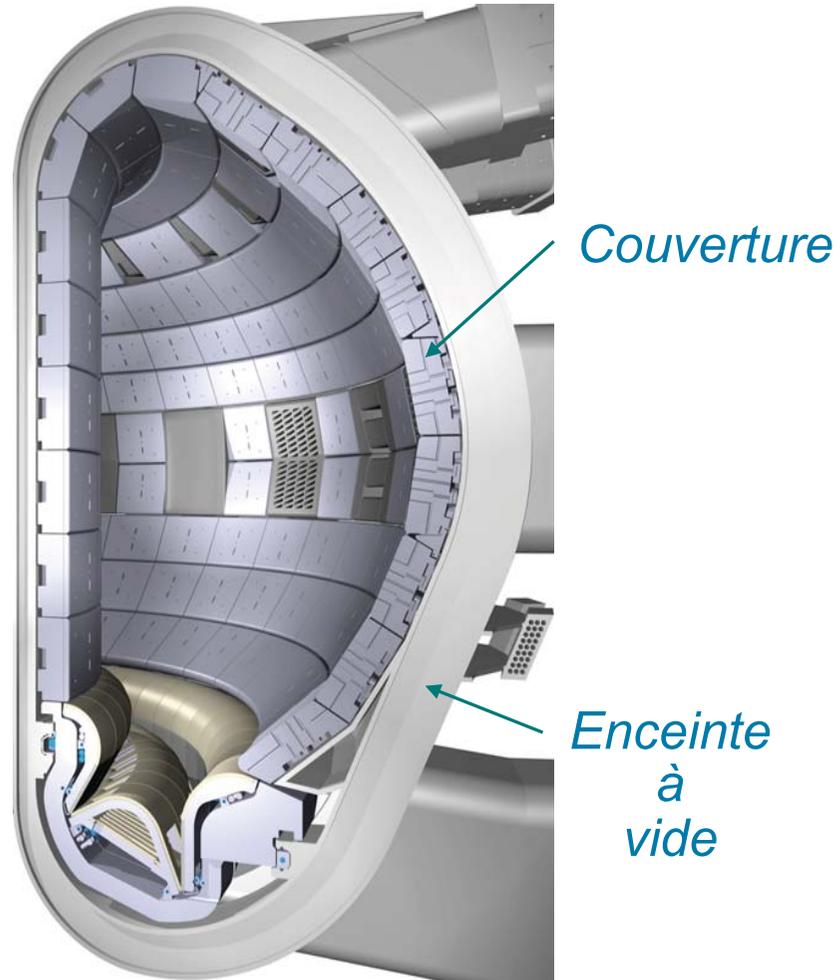
deutérium + lithium → hélium



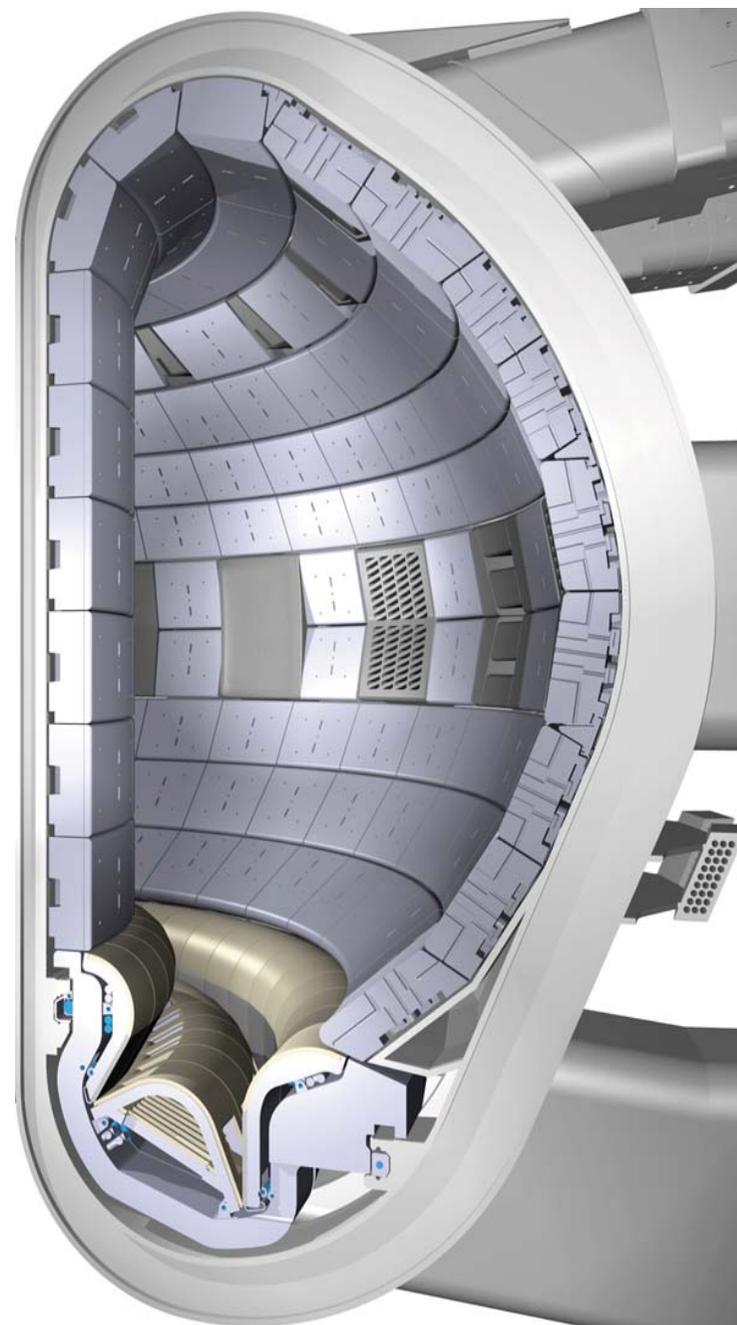
Couverture



Couverture



Couverture



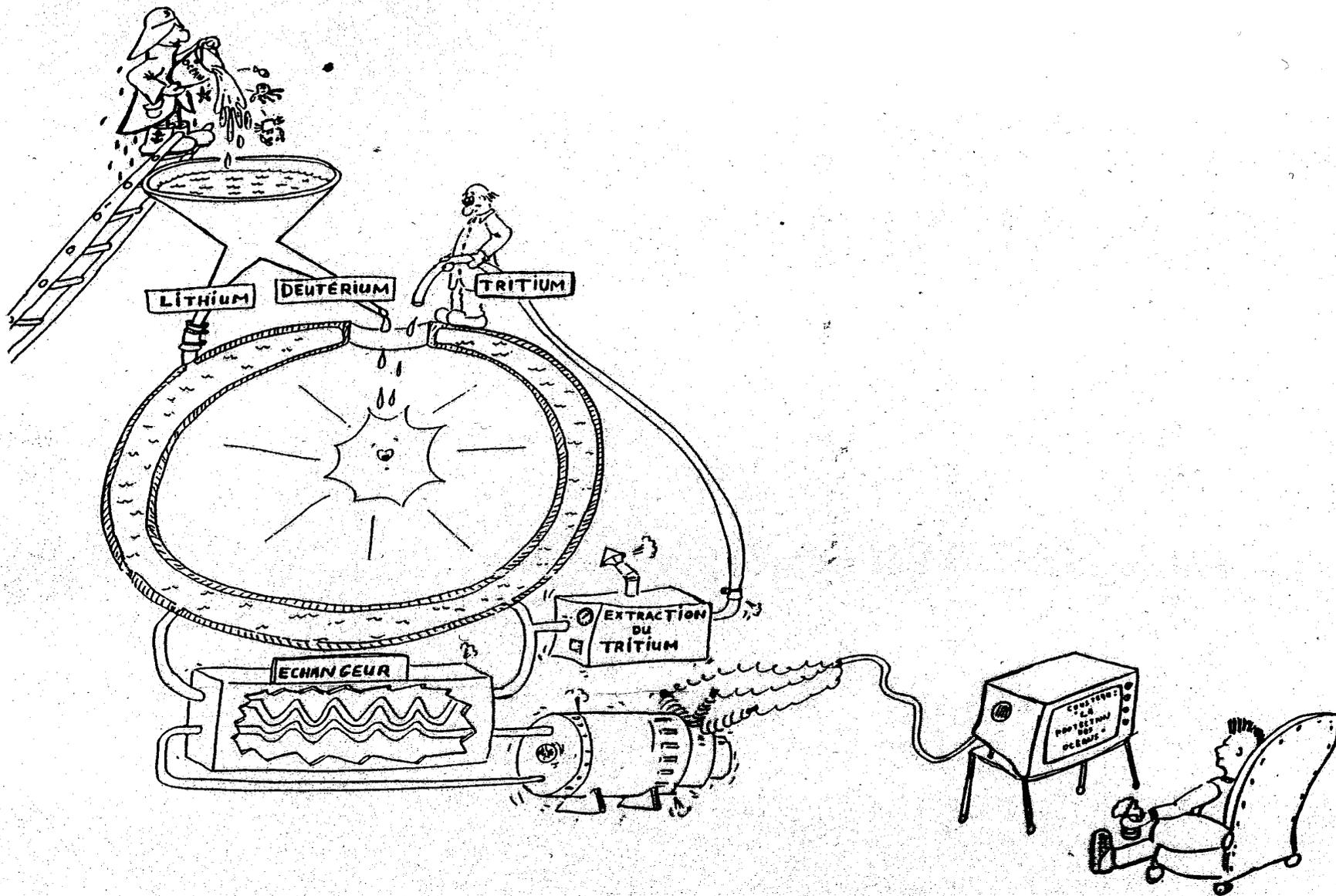
*Contient
du lithium*

*L'impact
des
neutrons
sur le lithium
produit le
tritium*

*Transforme
en chaleur
l'énergie
des neutrons*

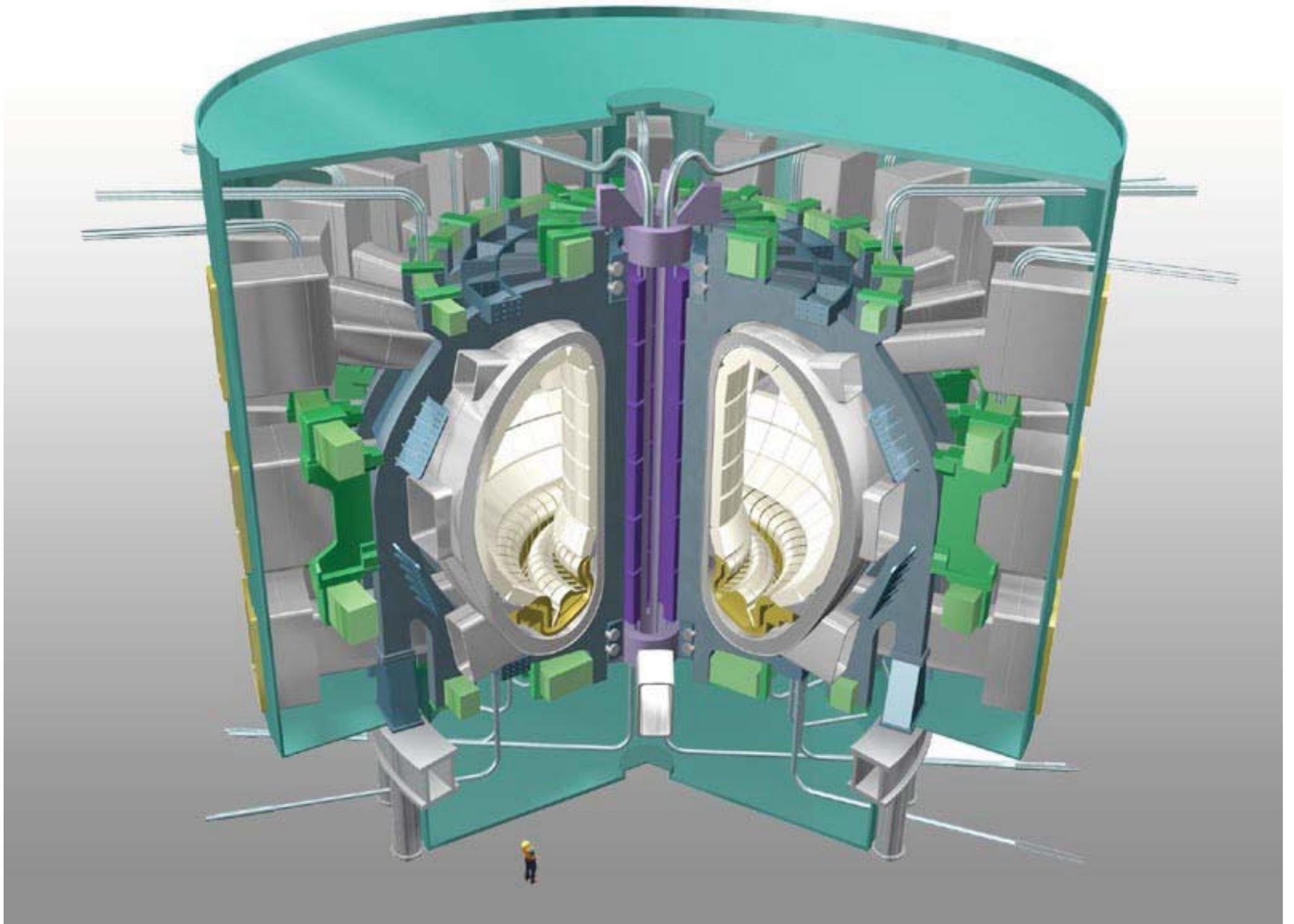
*Protège
l'enceinte
des neutrons*

Schéma d'un réacteur de fusion D-T



Comment se fait un tokamak?





La fusion une énergie sûre propre et non proliférante?

MANIFESTATION
SAMEDI 26 MARS
PERTUIS



DÉPART 14H30 STADE DU FARIGOULIER

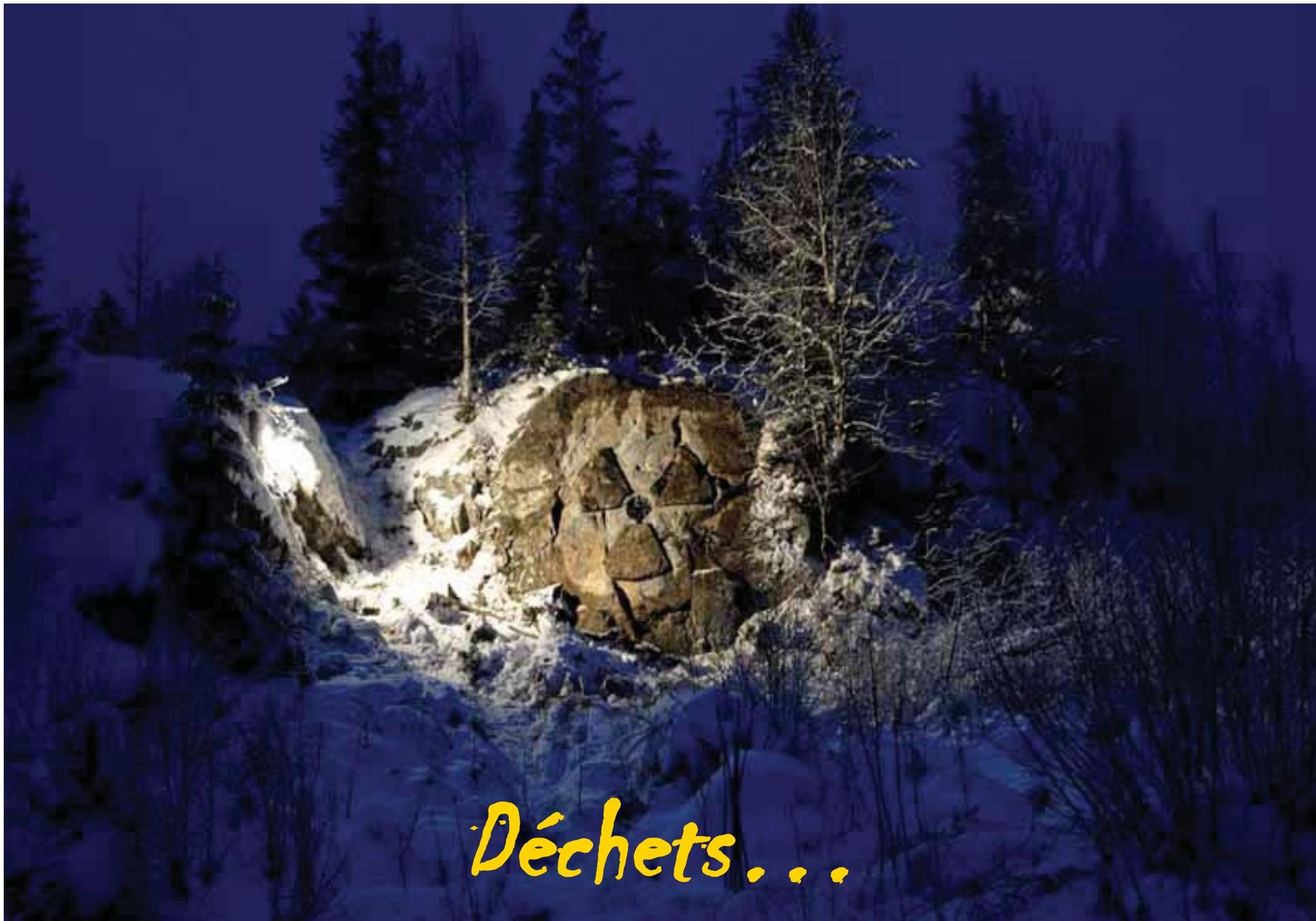
ITER
tue

 Réseau
Sortir du
nucléaire

 Les Verts

 LCR

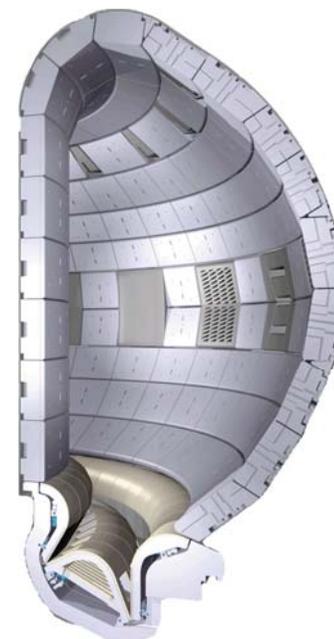
 MEDIANE



Déchets...

Une énergie propre?

neutron + lithium → hélium (inerte) + tritium (recyclé)

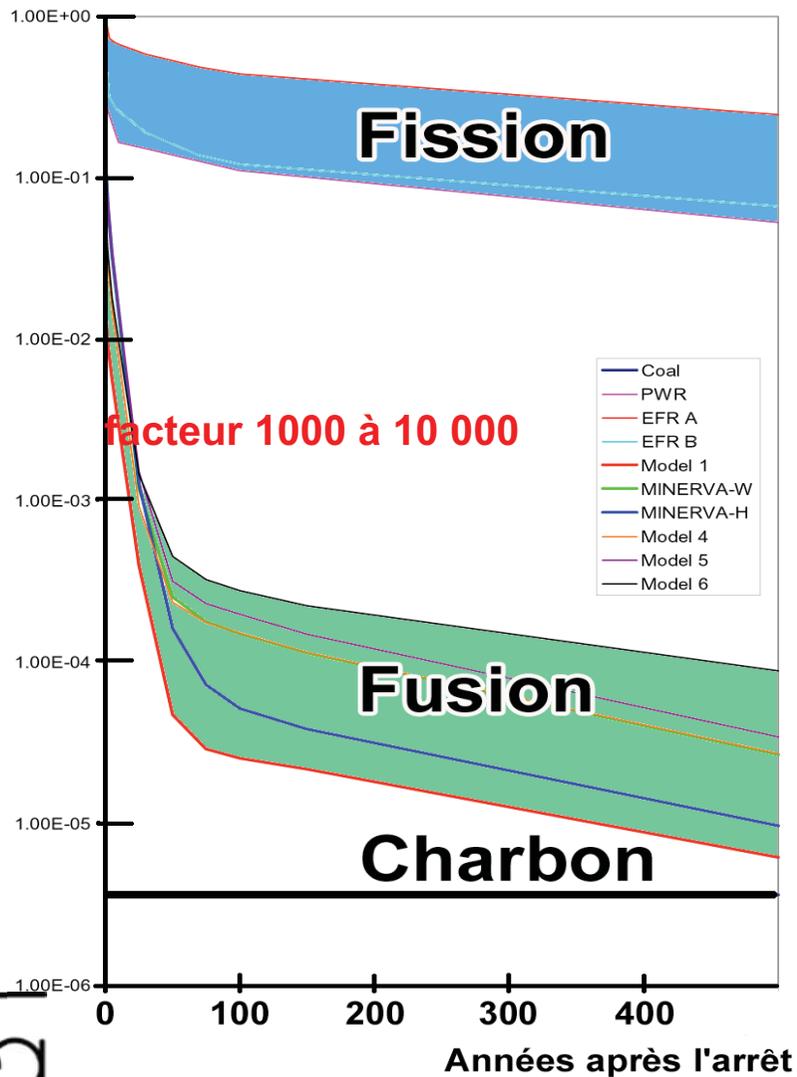


*Réacteur **idéal**
Couverture en lithium liquide*

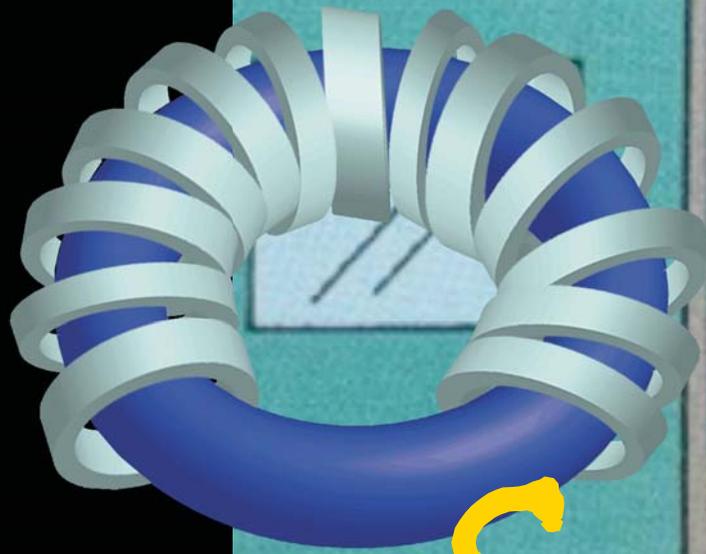
Aucun déchet nucléaire...

Une énergie propre?

Radioactivité relative
(ingestion)



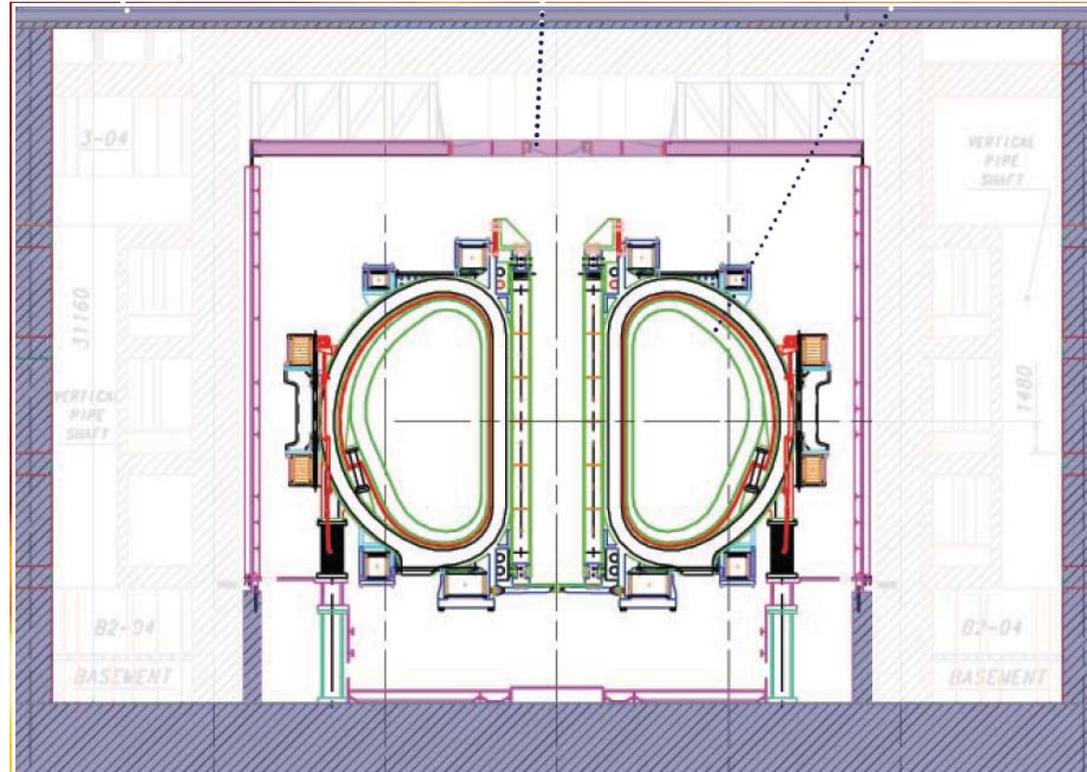
*Recyclage des matériaux activés
de la couverture après une période
de refroidissement d'une centaine
d'années?*



Sureté



Une énergie sûre?



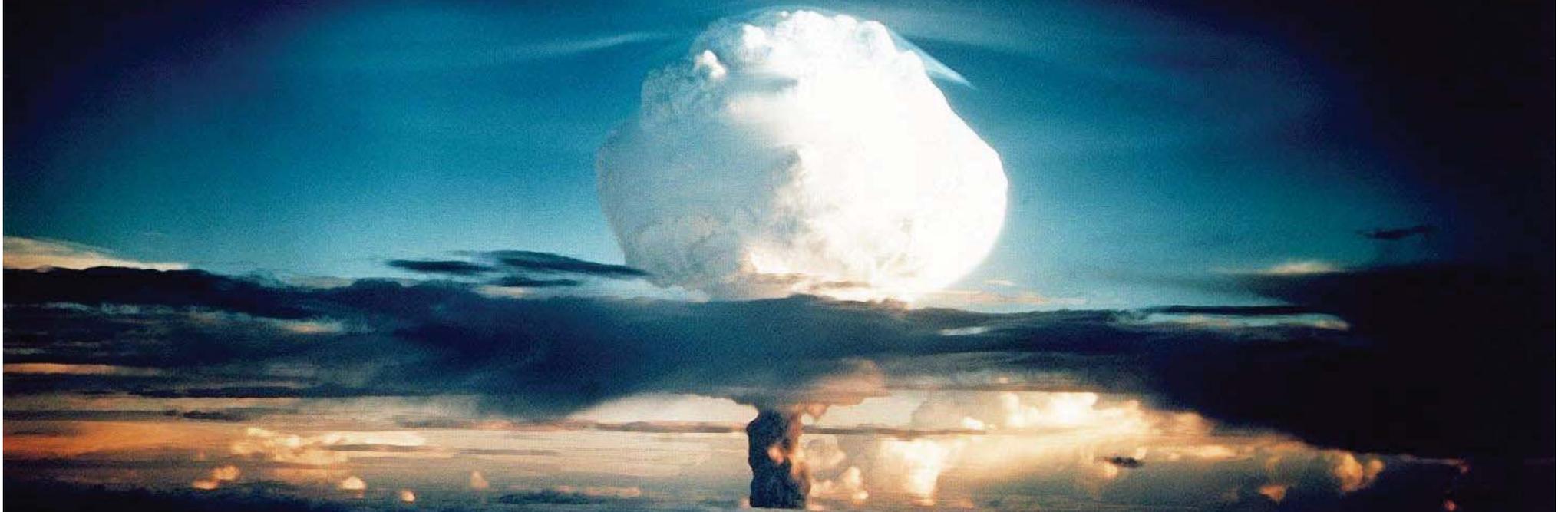
Accident majeur

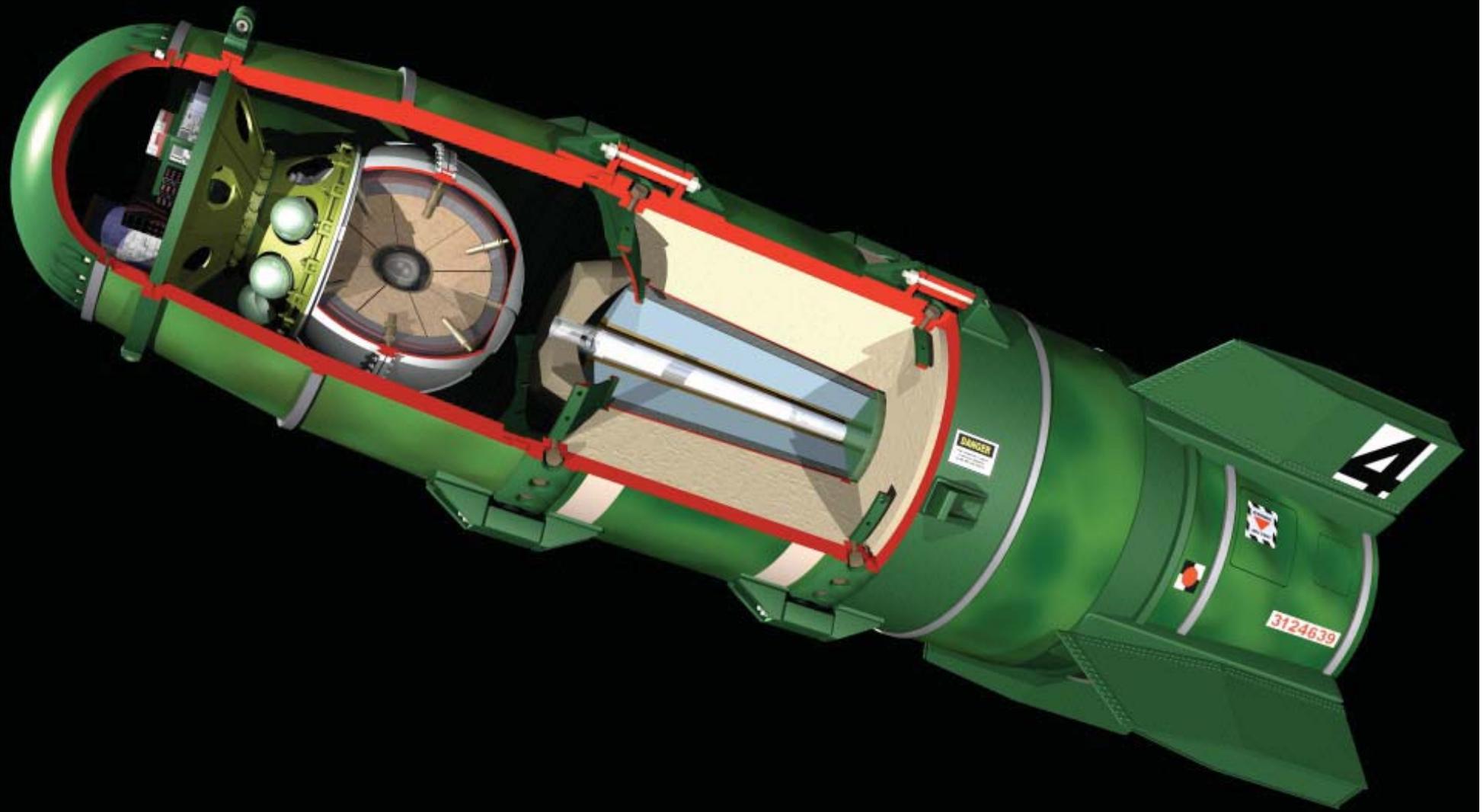
**ITER
tue?**

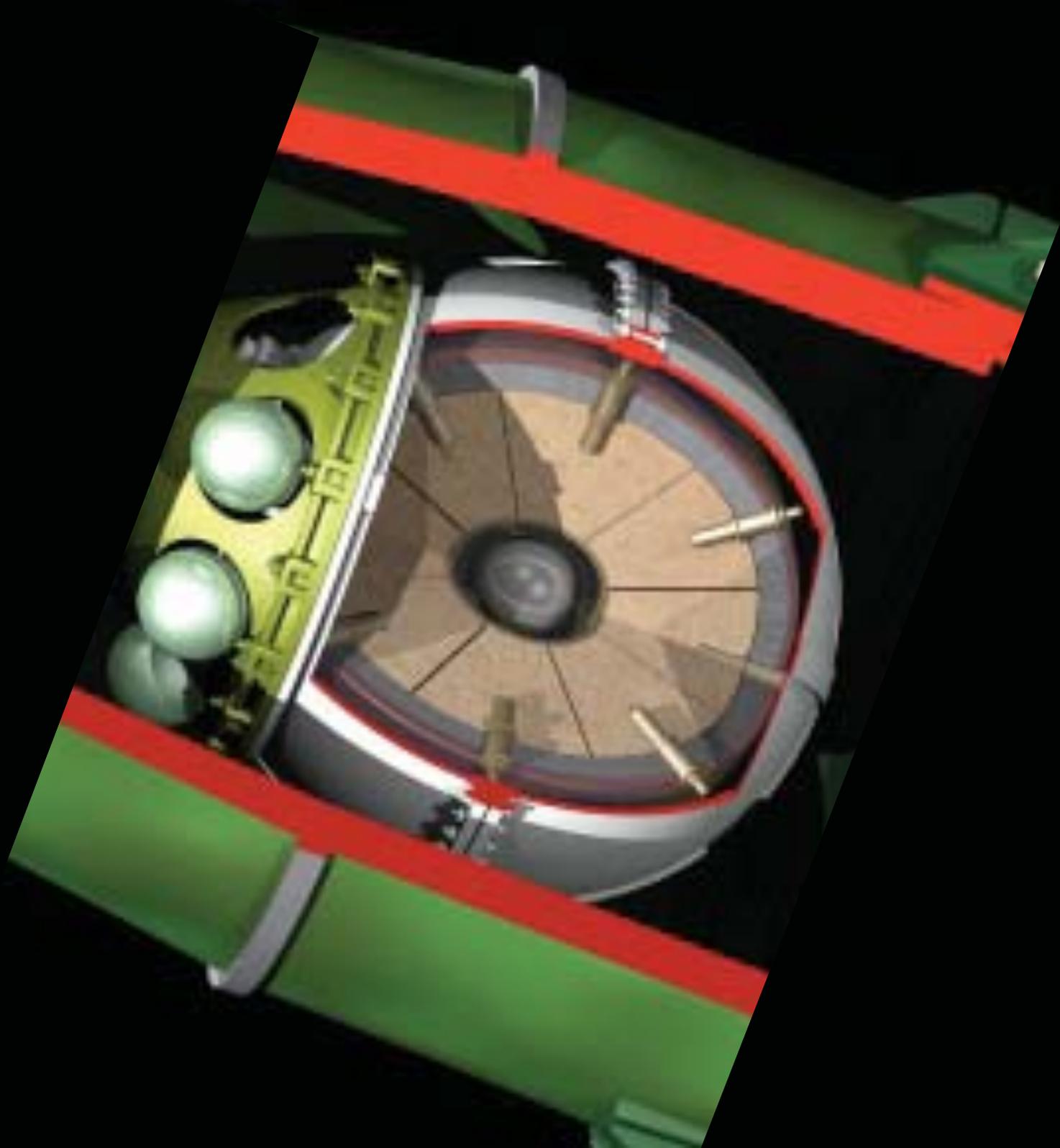
grammes de tritium



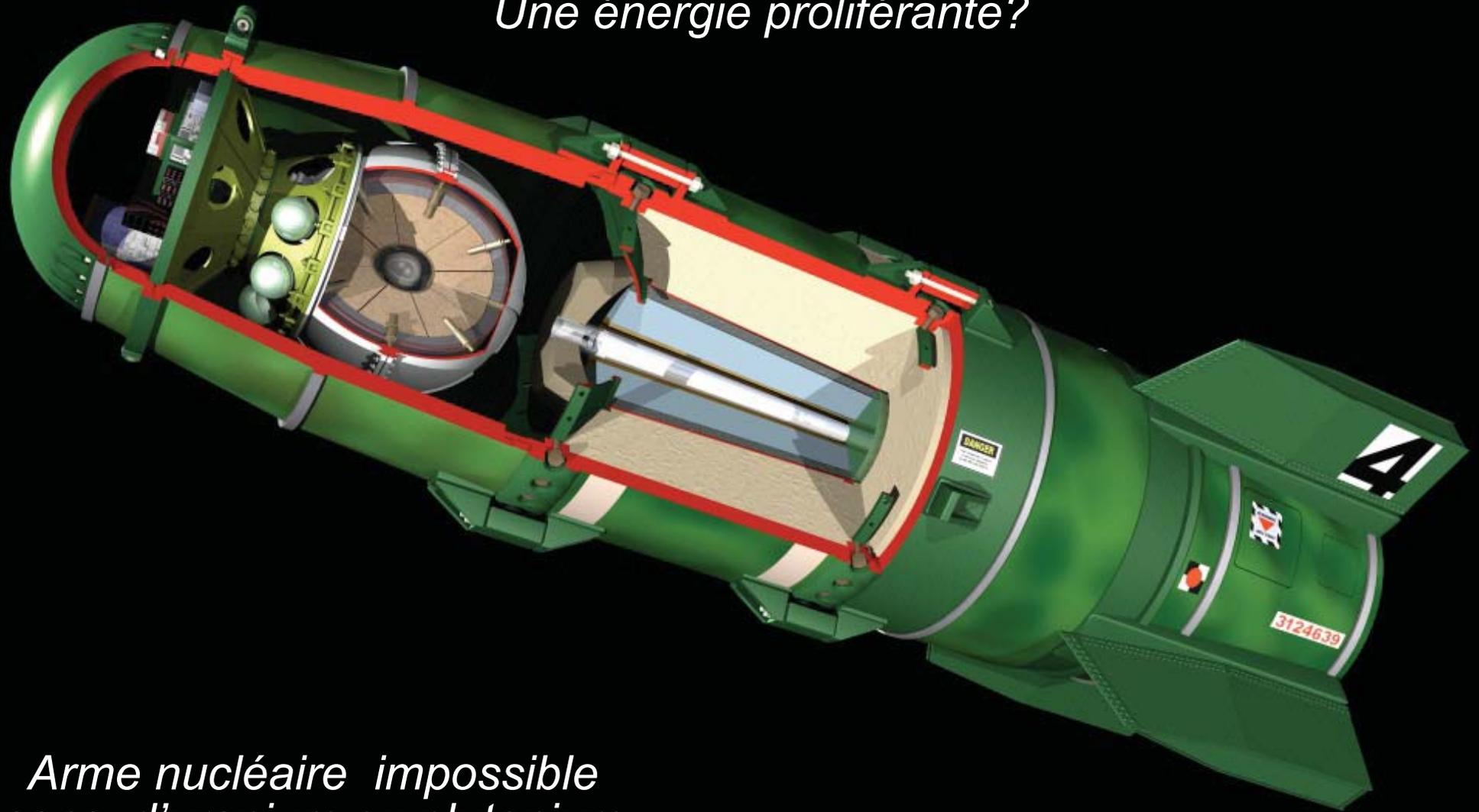
Prolifération?





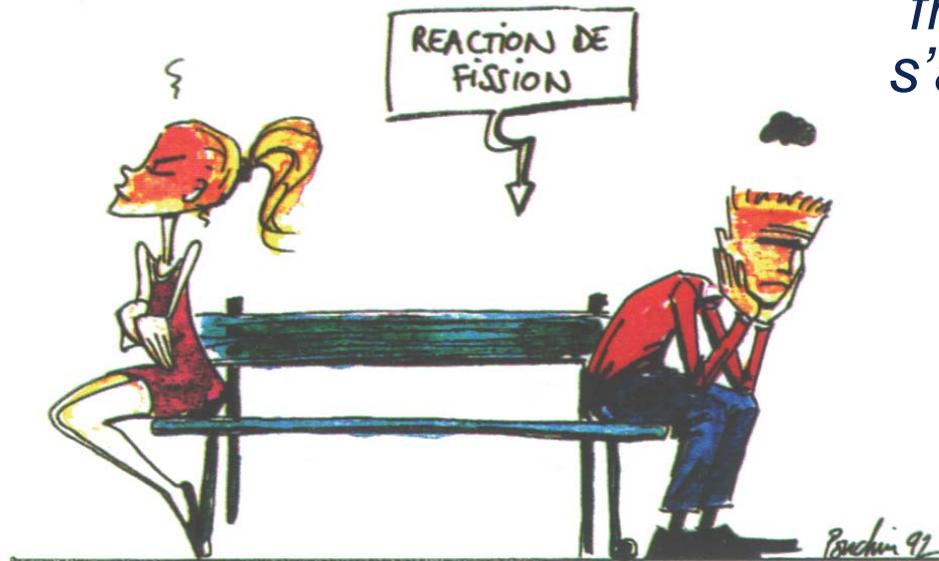


Une énergie proliférante?



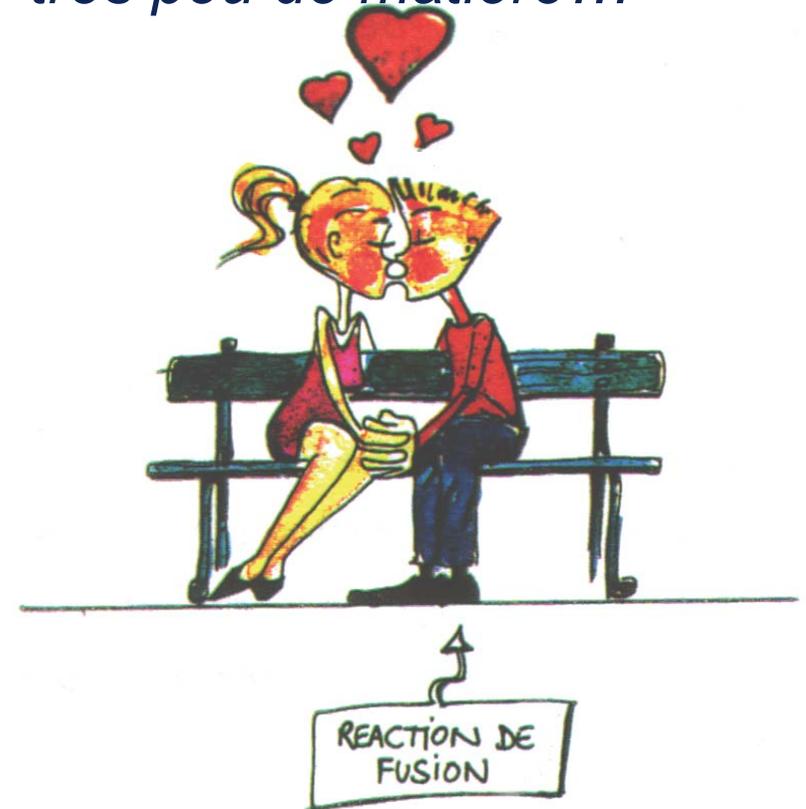
*Arme nucléaire impossible
sans d'uranium ou plutonium*

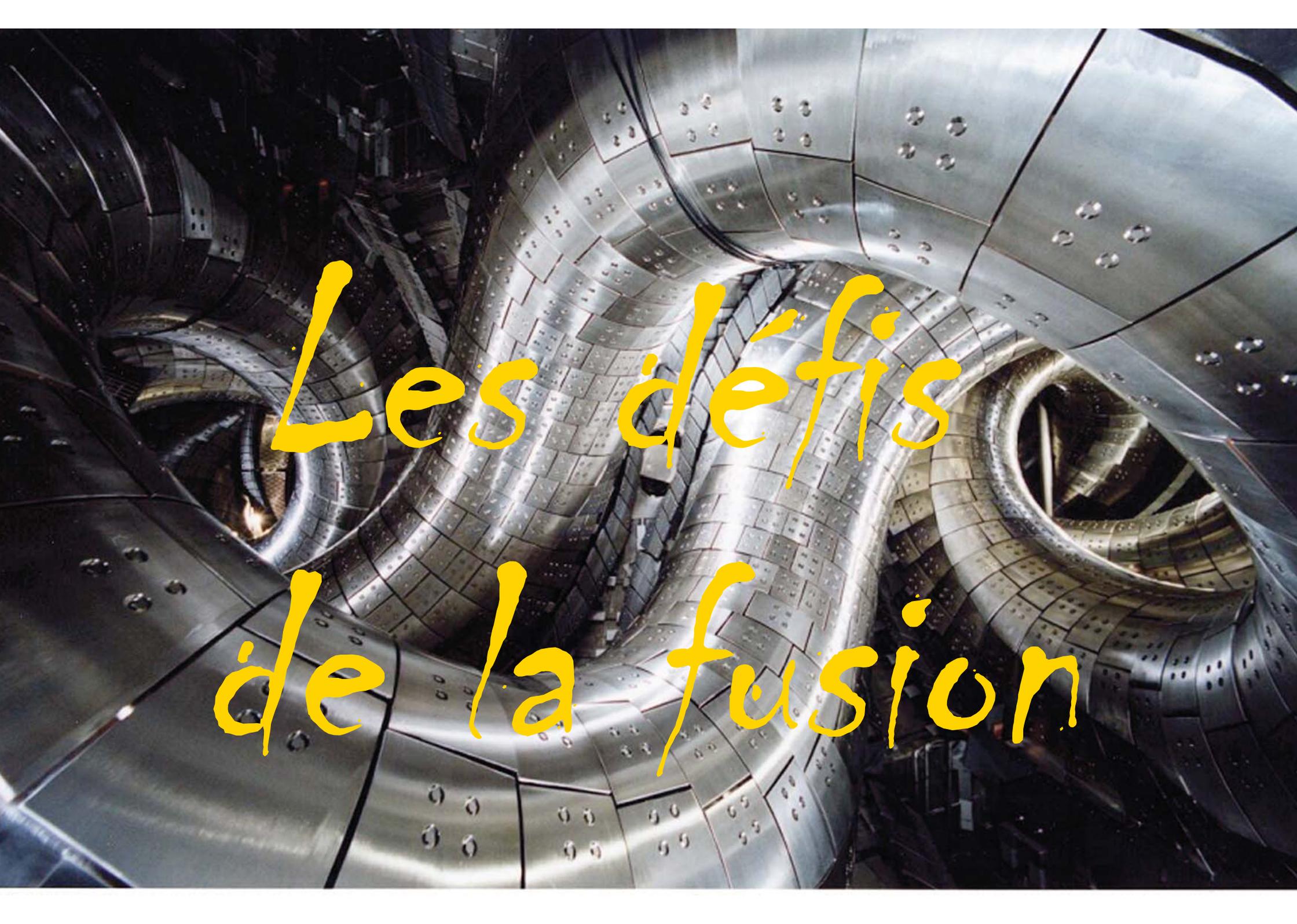
Fission / Fusion



Fission
réactions en chaîne
éviter l'emballement...

Fusion
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, toroidal structure. The walls are composed of numerous metallic segments, each perforated with small holes, likely for cooling or diagnostic purposes. The lighting is dramatic, with bright highlights on the metallic surfaces and deep shadows in the recessed areas, creating a sense of depth and complexity. The overall appearance is that of a highly advanced and intricate piece of engineering.

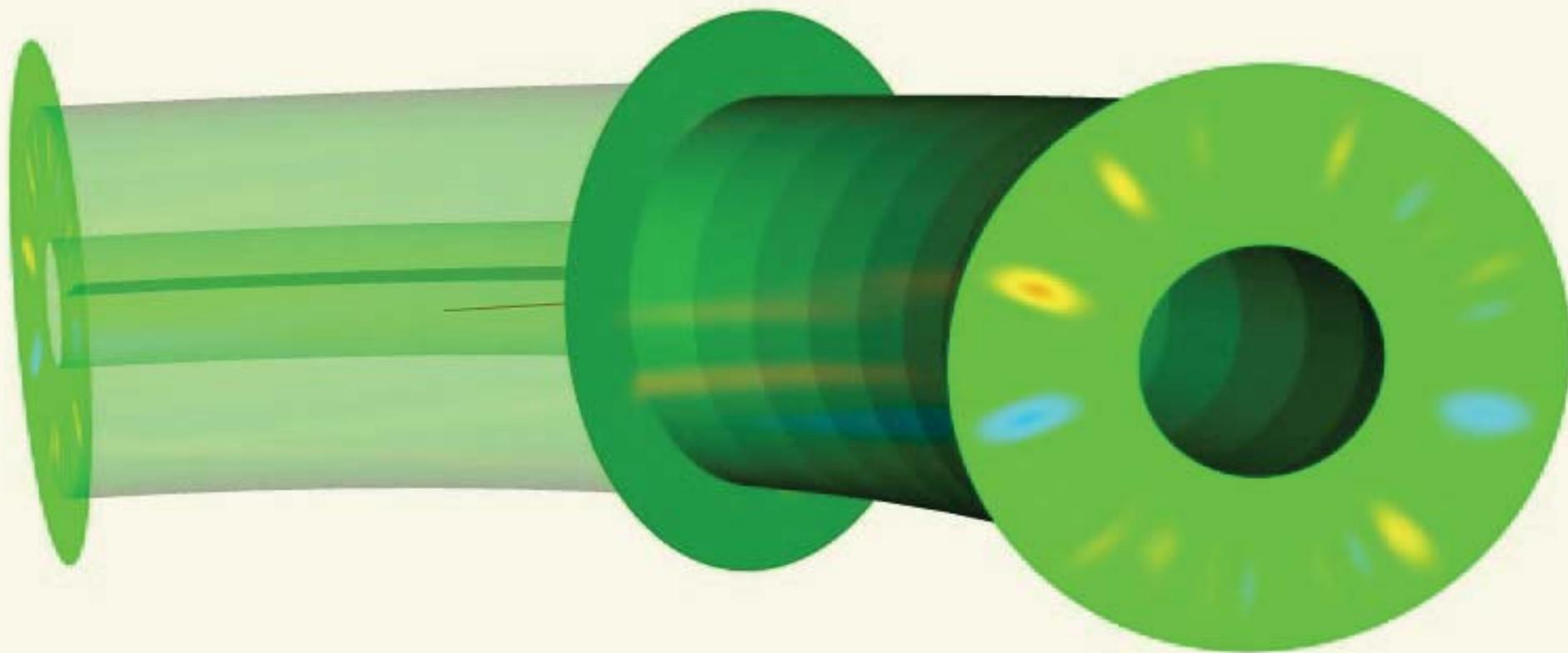
Les défis de la fusion



Un cœur

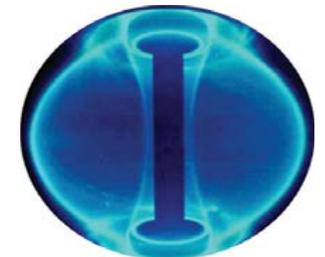
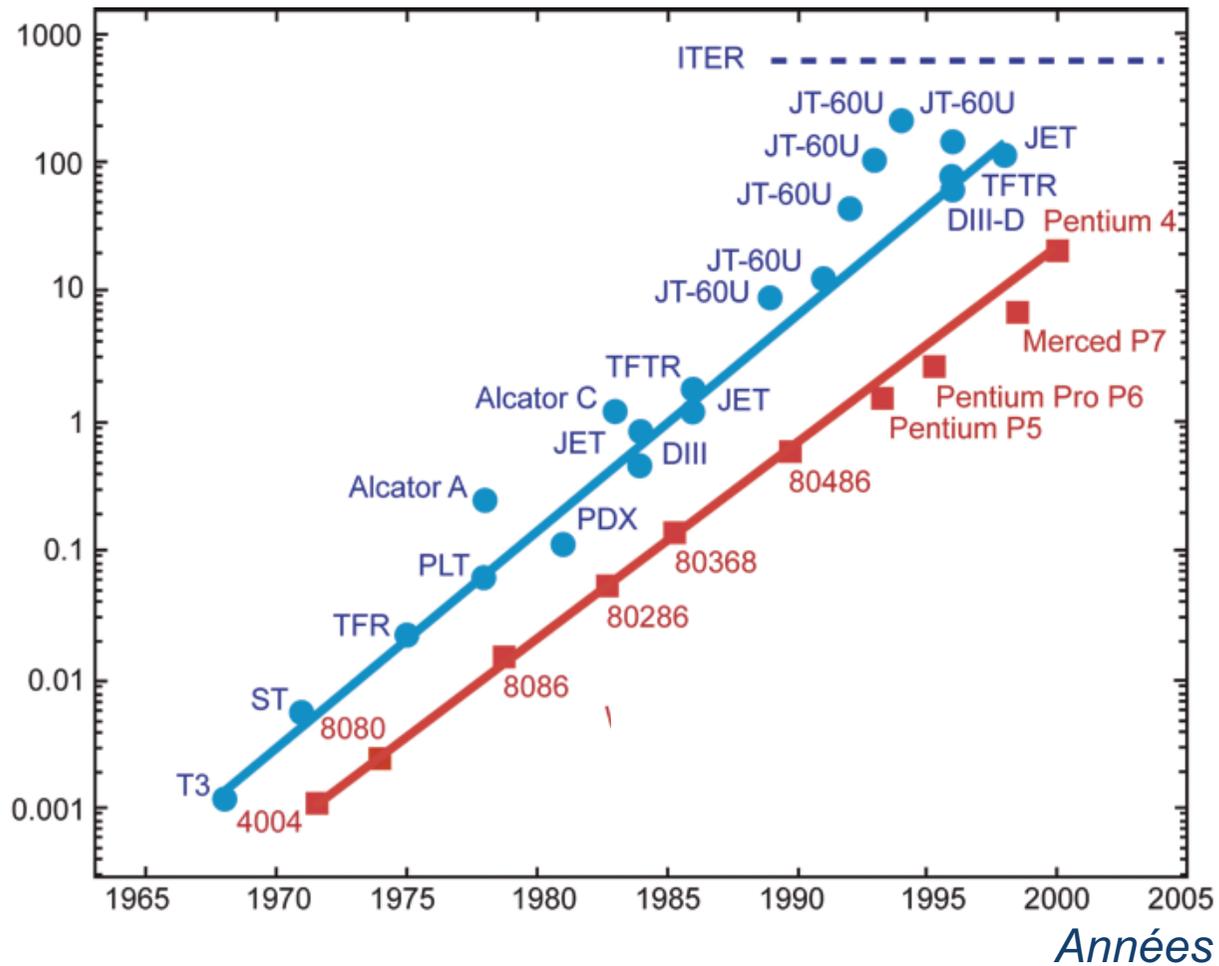
bien isolé

Cisailler les cellules de convection



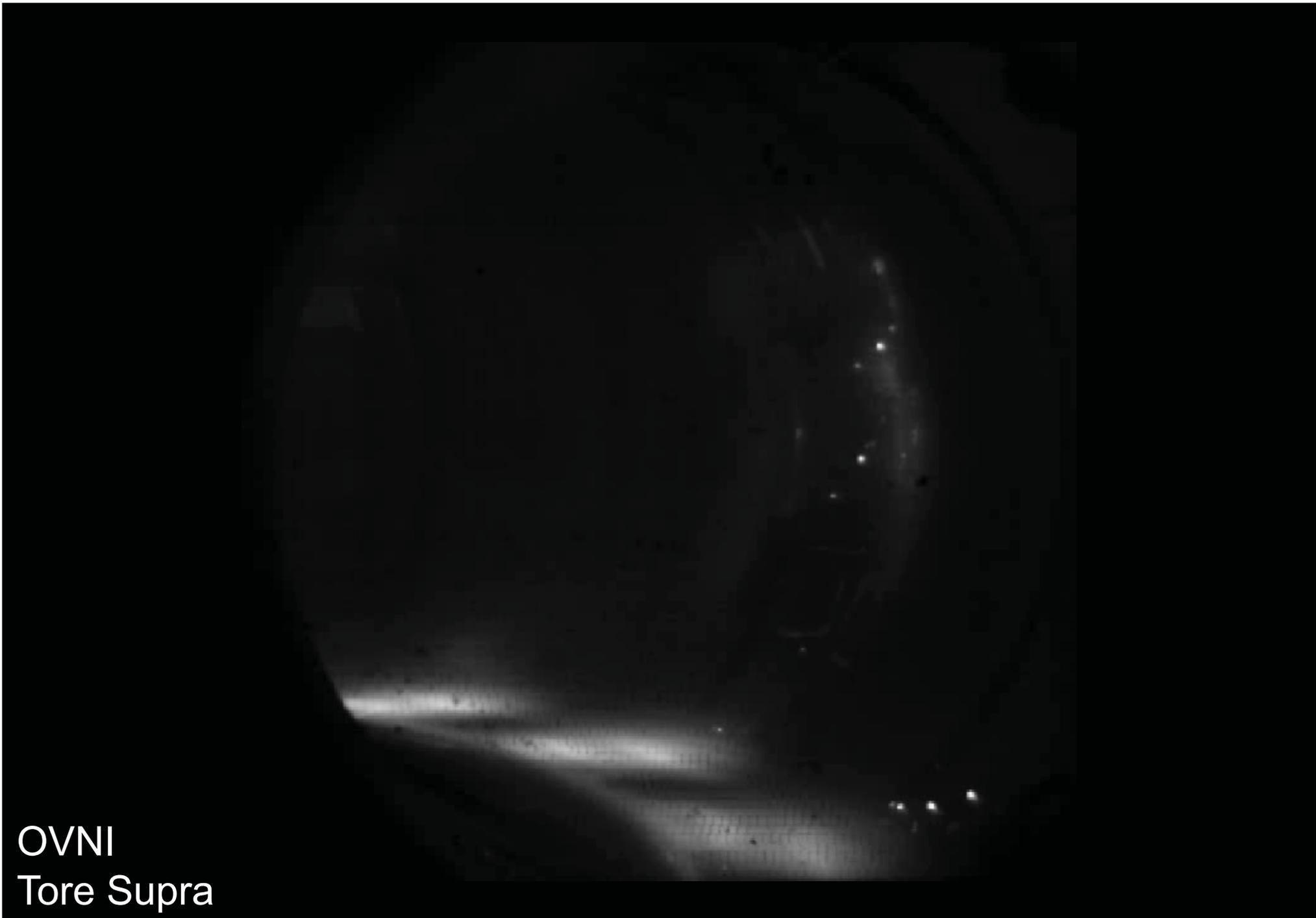
La seule constante de temps de la fusion est-elle 50 ans?

Performances





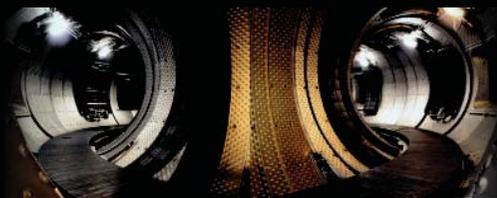
*Interaction
plasma-paroi*



OVNI
Tore Supra



moniT@RE



INRIA Sophia Antipolis
Analyse des trajectoires

Les défis de la fusion inertielle

~ Dix capsules par seconde

Taux de répétition driver (laser...)

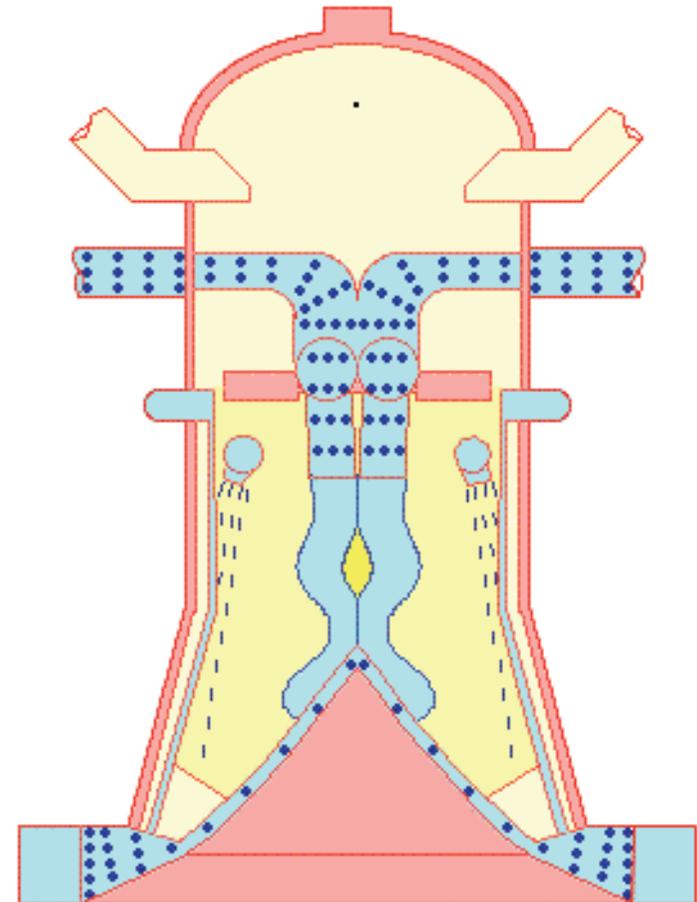
Une capsule ~ qq dizaines de kg de TNT

Parois liquides obligatoires?

*Laser impossible?
(rendement, isotropie dans chambre polluée)*

Faisceaux d'ions lourds?

Cout capsule < 1€



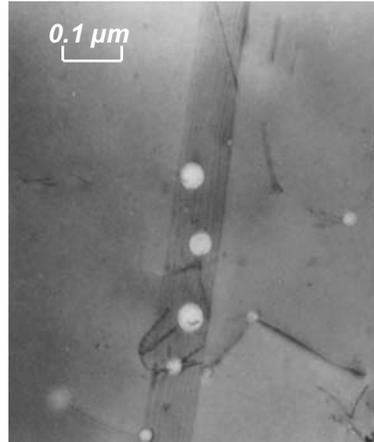
HYLIFE

Matériaux un rude défi

Asdex Upgrade :
paroi Tungstène



Interaction neutrons 14 MeV - matériaux



Neutrons fusion 14 MeV (fission 2 MeV)

Réactions (n,p) (n,a) à seuil : taux de génération H, He plus importants

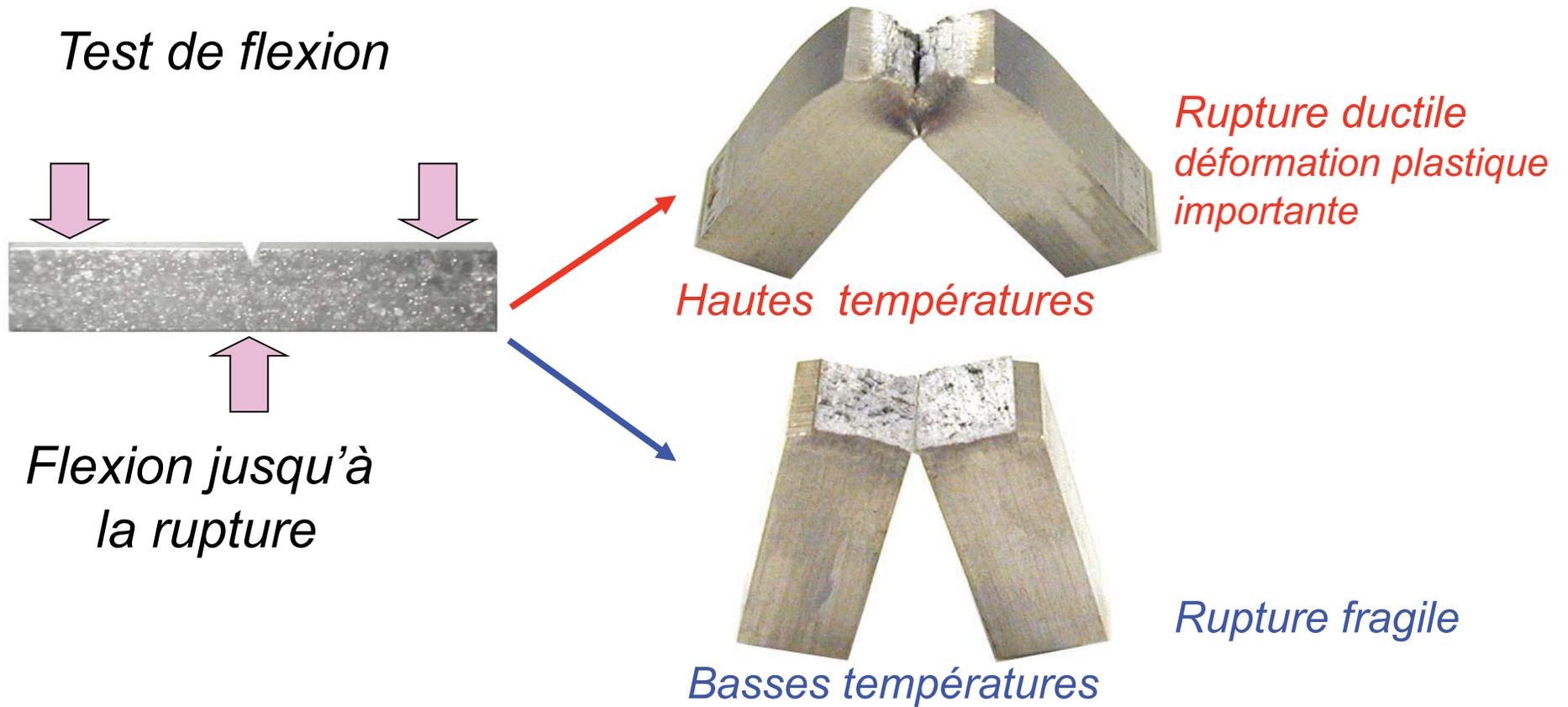
<i>Fusion</i>	<i>Fission (génération IV)</i>
<i>150 dpa*</i>	<i>30-100 dpa*</i>
<i>1500 appm He**</i>	<i>3-10 appm He**</i>
<i>1500 appm H**</i>	<i>3-10 appm H**</i>

Effet He : gonflement

**dpa: déplacement par atome*

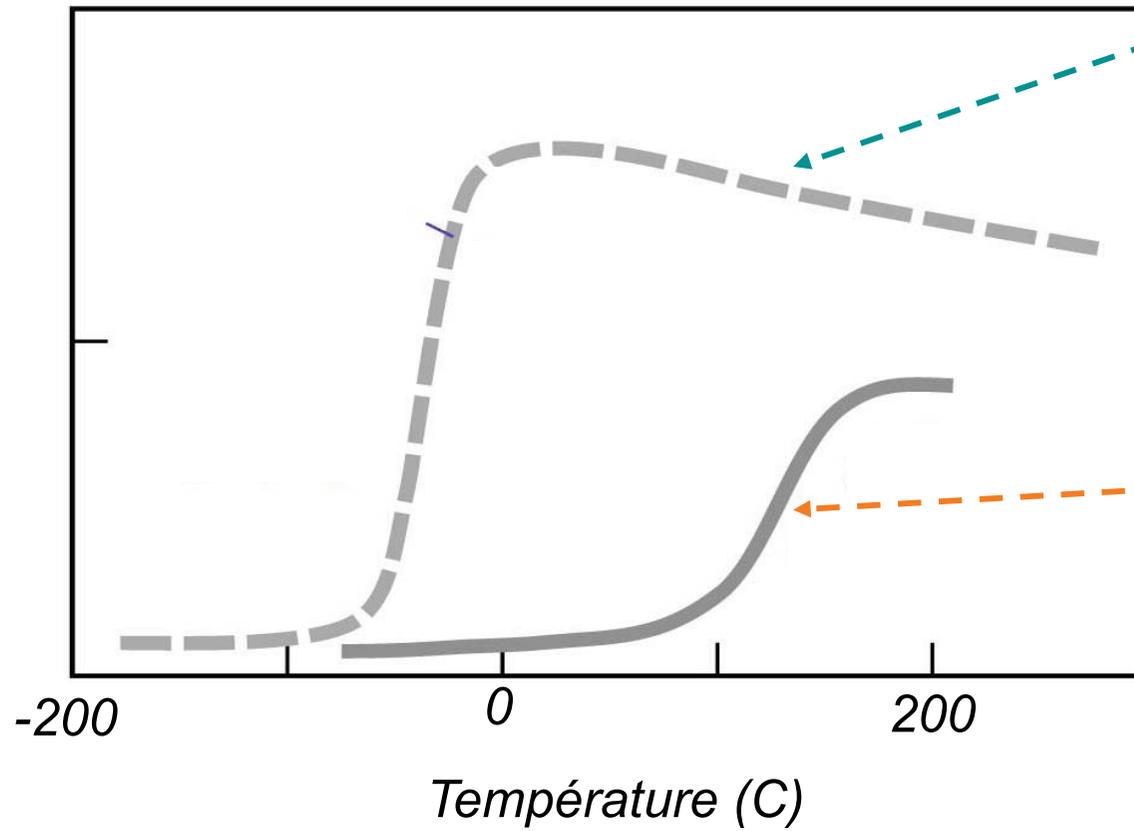
***appm : atomic part per million (nb d'atomes par million)*

Effet de l'irradiation sur la température de transition ductile-fragile

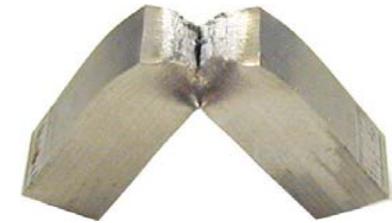


Effet de l'irradiation sur la température de transition ductile-fragile

Energie de fracture



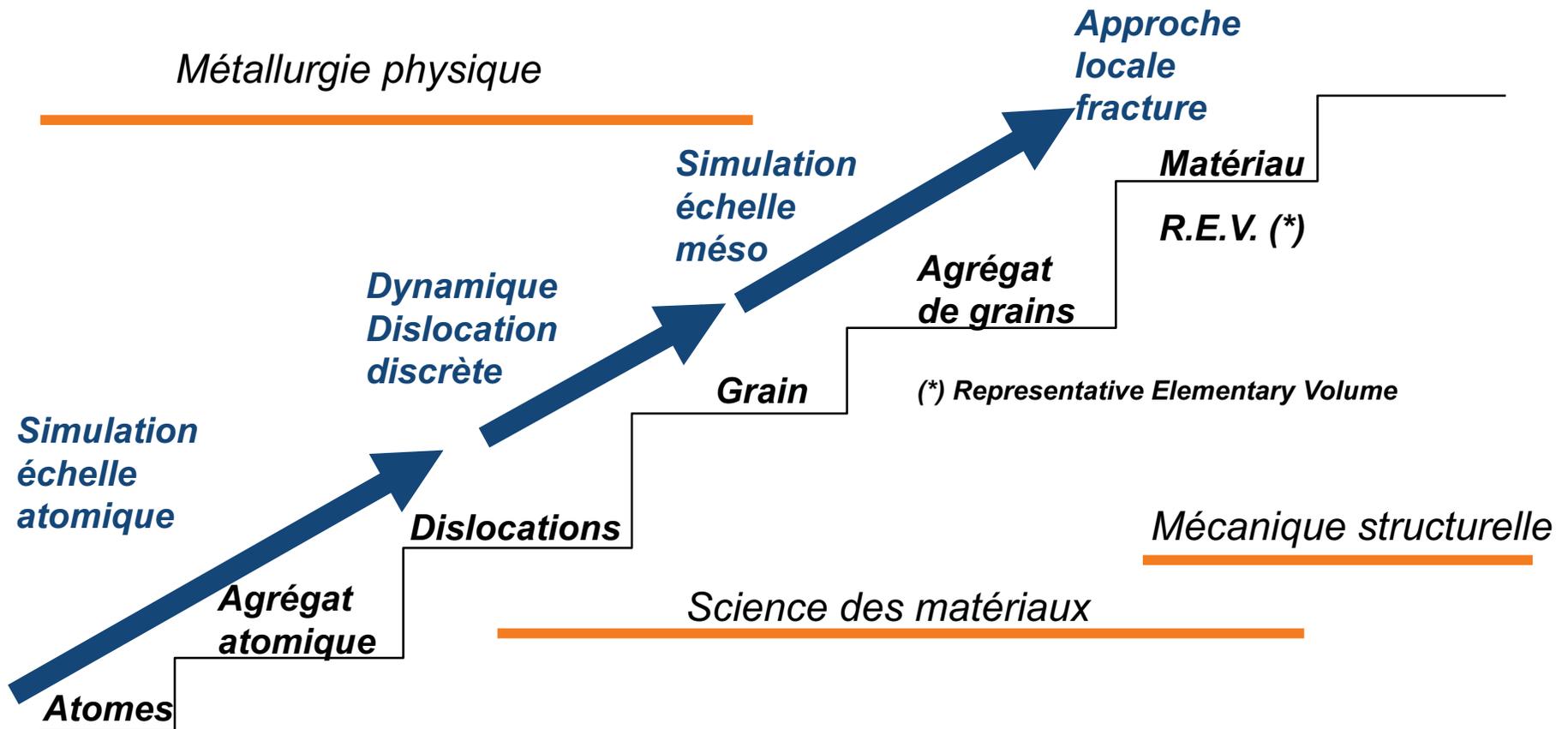
Non irradié



Irradié

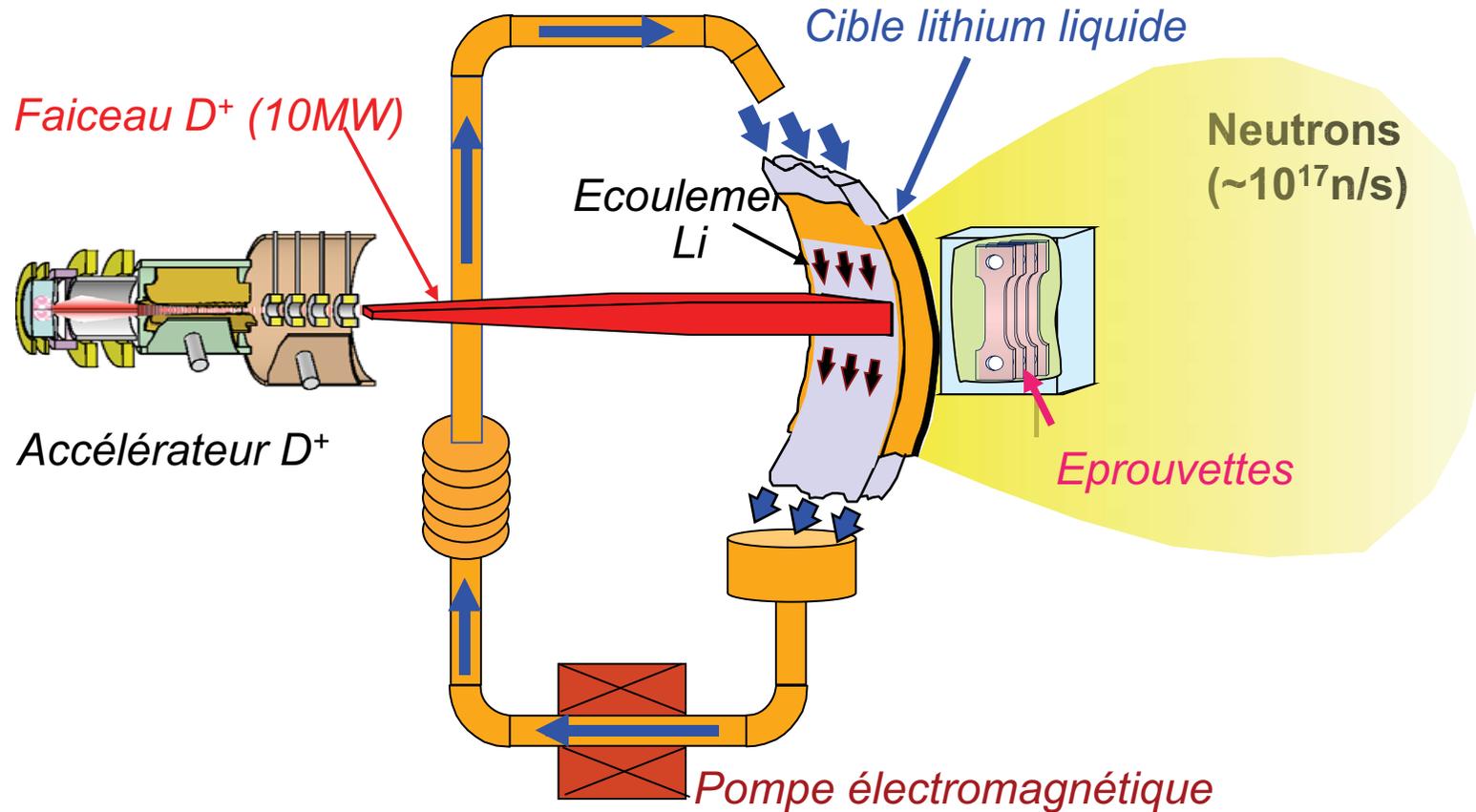


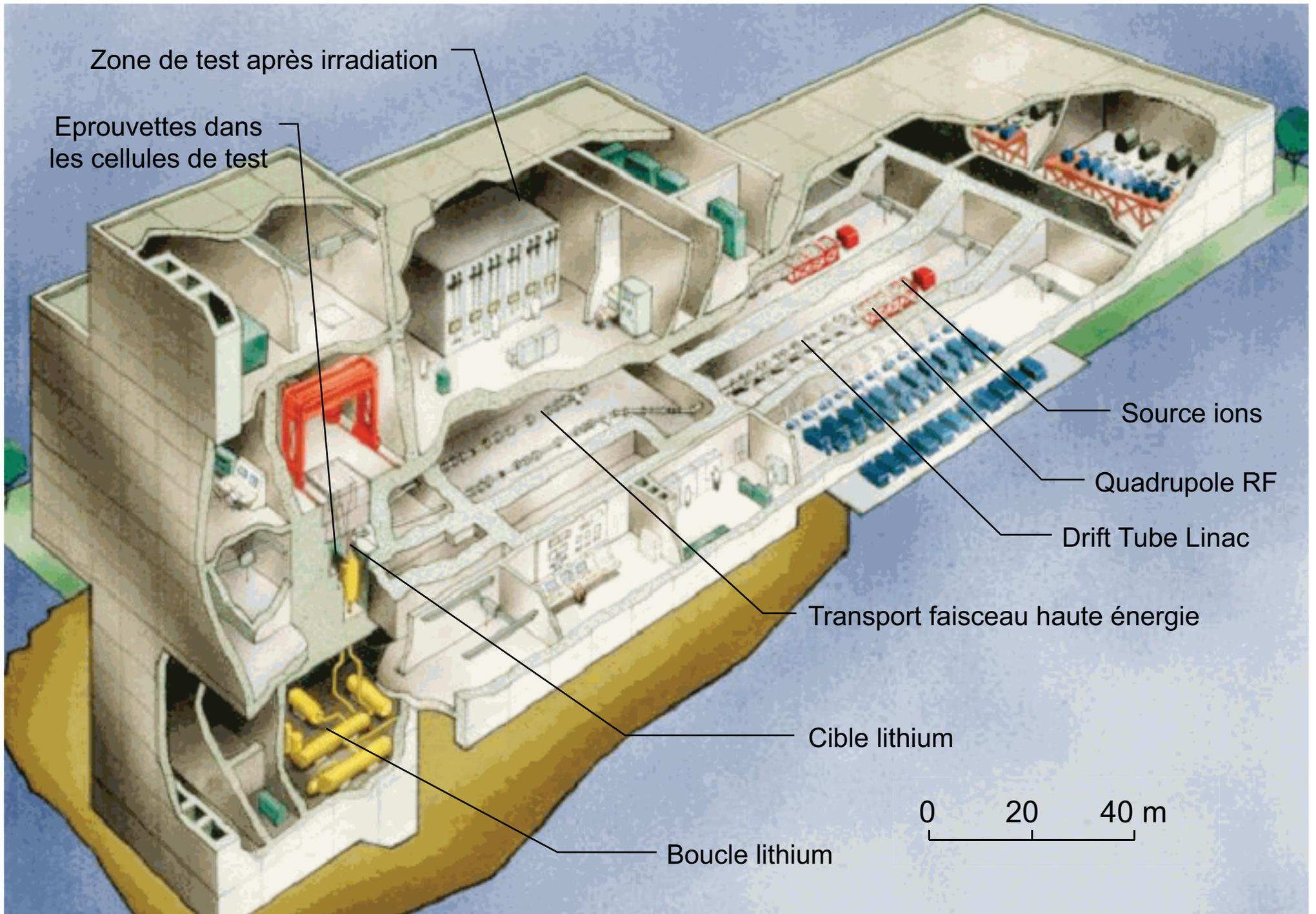
Modélisation multi-échelles...ab initio?



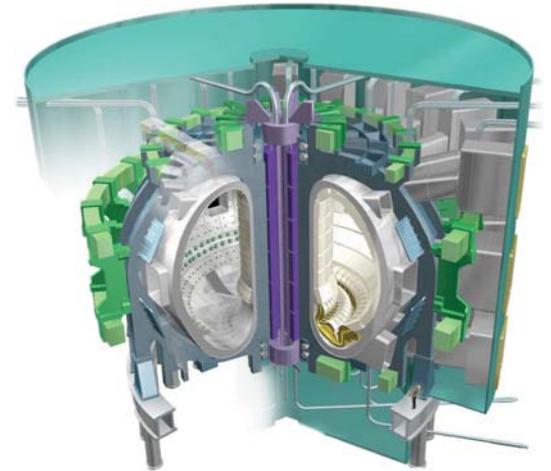
Fin de la stratégie "cook and look"?

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





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

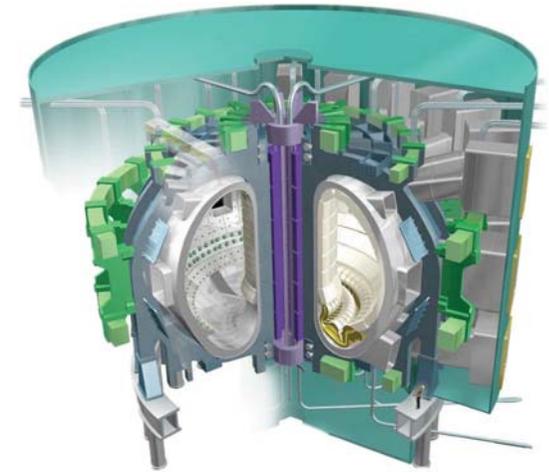
Réacteur alimentant 1 million de personnes \rightsquigarrow ~ 1 grammes de combustible

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

Pas de déchets transmis aux générations futures

Pas de risque de prolifération

Les défis de la fusion



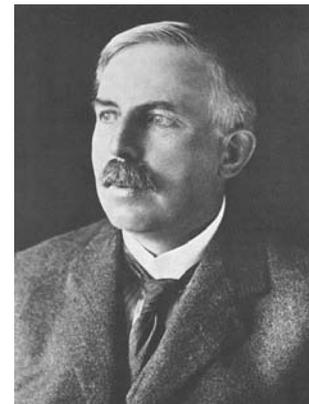
Cœur quasi auto chauffé (ITER : 70% réacteur : 80-90%)

Gain cible, rendement driver, cout cible (NIF, LMJ G=10, HiPER)

Matériaux neutrons, chaleur (IFMIF flux de neutrons d'un réacteur)

Modélisation turbulence plasma et matériaux à partir de leurs compositions

"Talking moonshine..." ?



ITER à Cadarache...







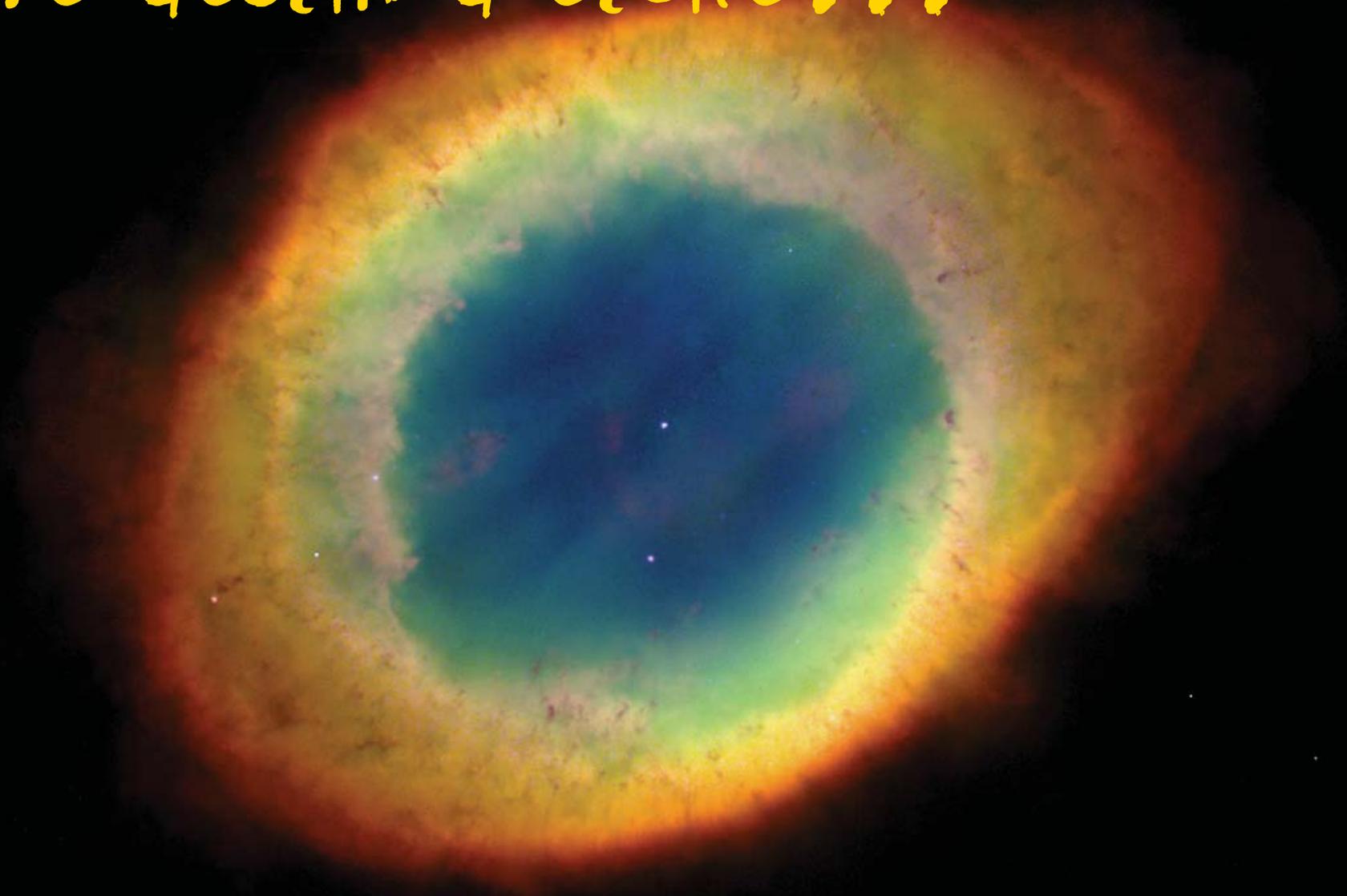


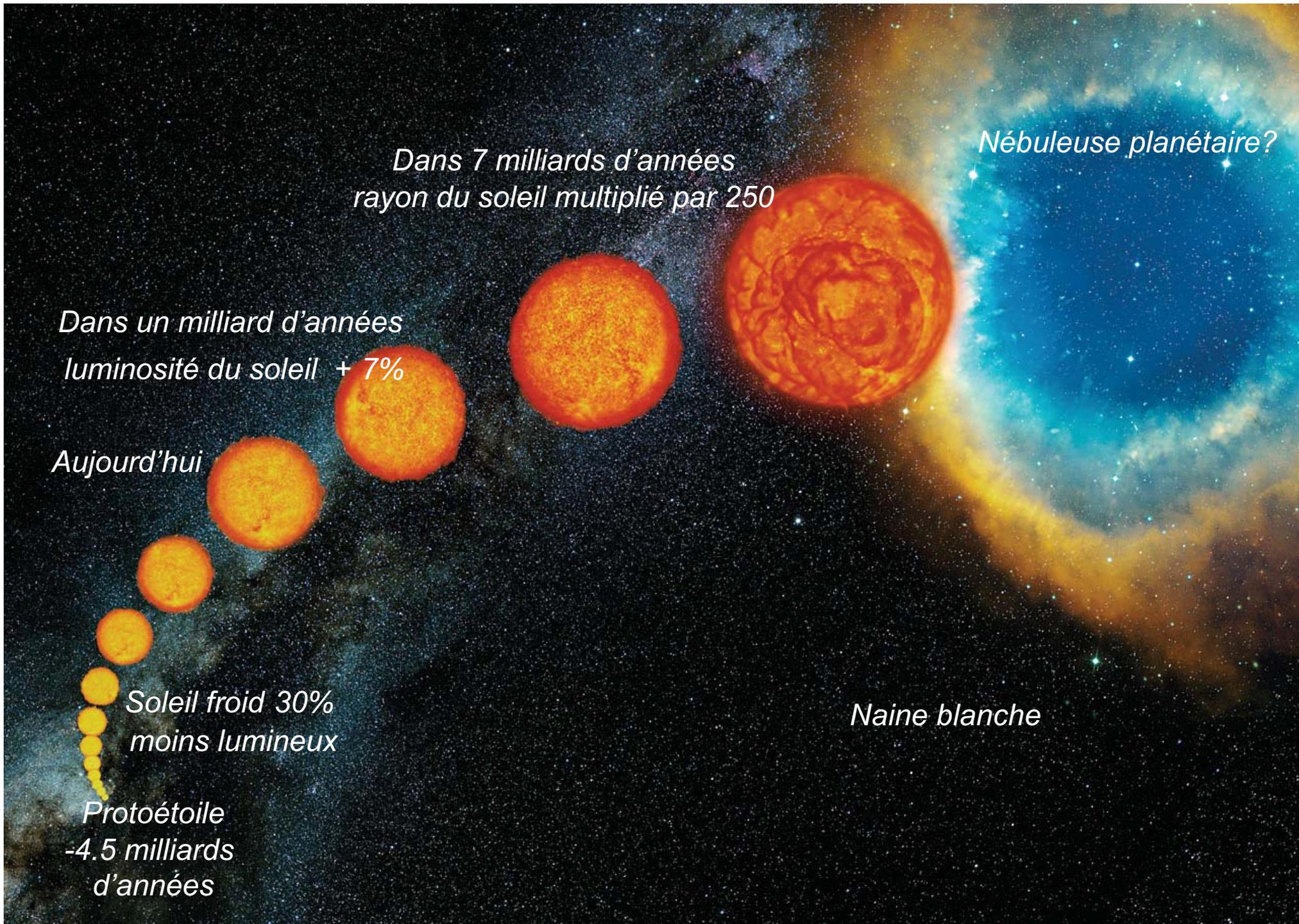
IFMIF à Rokkasho



Décembre 2009

Notre destin d'étoile...





Mantras pour crises climatique et énergétique:

Développement durable

Energies renouvelables

Sans l'énergie nucléaire?

Pourquoi des oxymores?

~~*Développement durable*~~

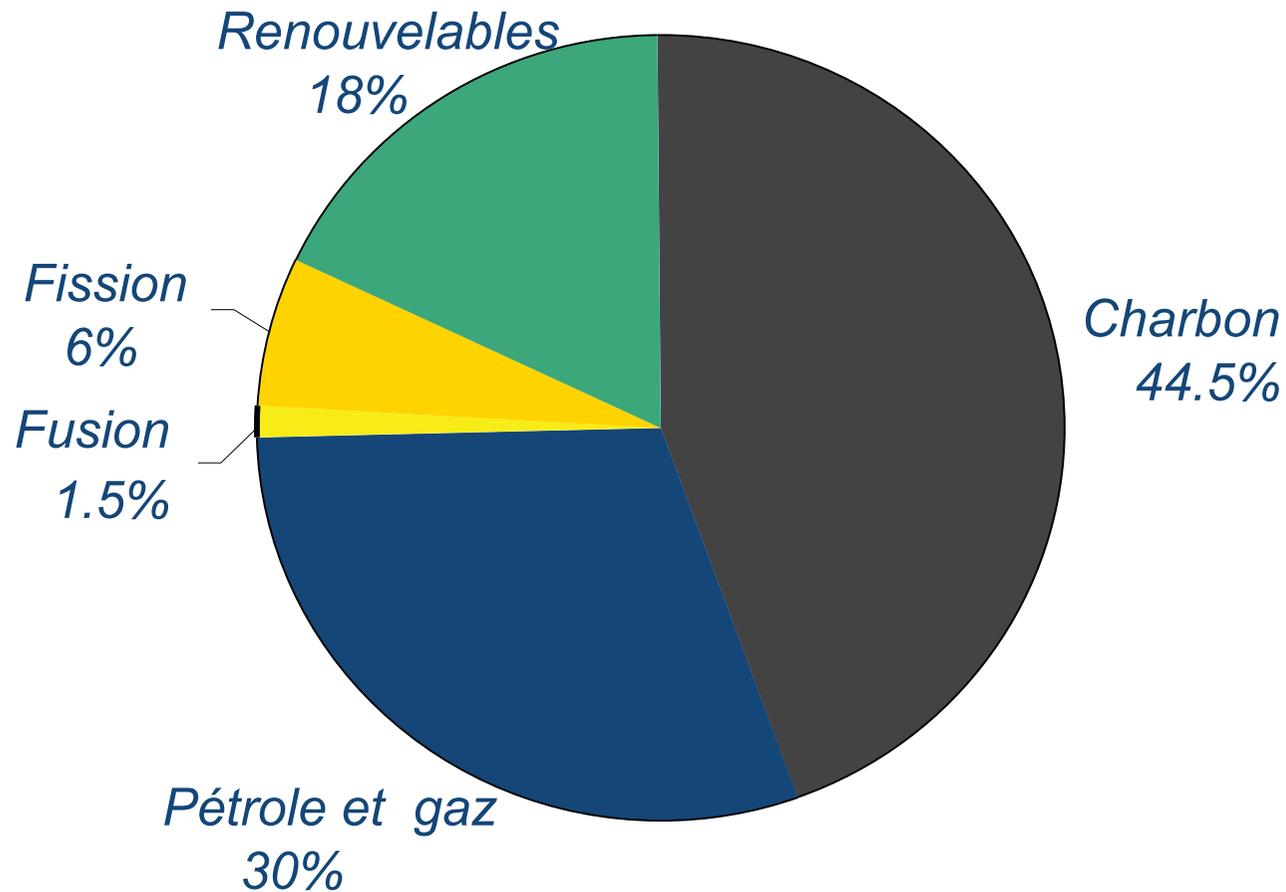
~~*Energies renouvelables*~~

N'avons nous pas simplement besoin d'énergies durables ?

Pour les quelques? milliards d'années d'existence de notre planète...

"...et nous regardons ailleurs "

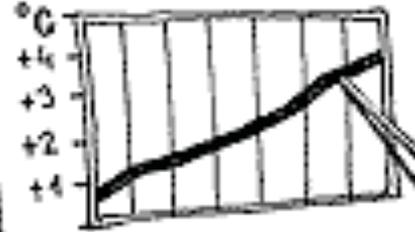
R&D et subventions énergies en Europe ~ 30 milliard €/an



Source : EEA, Energy subsidies in the European Union: A brief overview, 2004
http://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2004_1



Evolution of
Temperatures
NEXT 100 YEARS:



JOHANNESBURG



2002

CHAPPATTE IwI: Herald Tribune

Evolution of
the Market
LAST 10 DAYS:



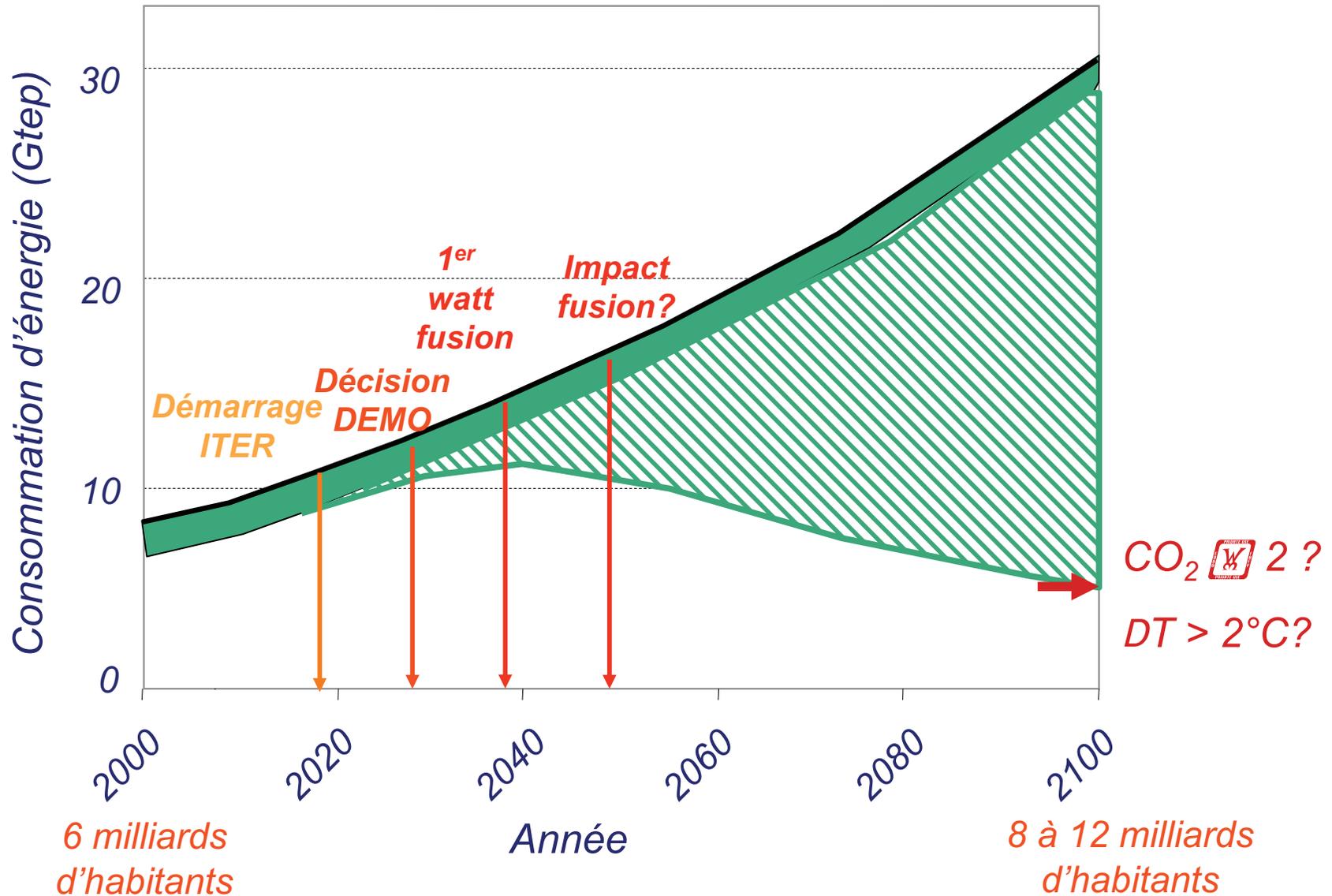
La terre dans un milliard d'années?



*La fusion,
trop tard?*

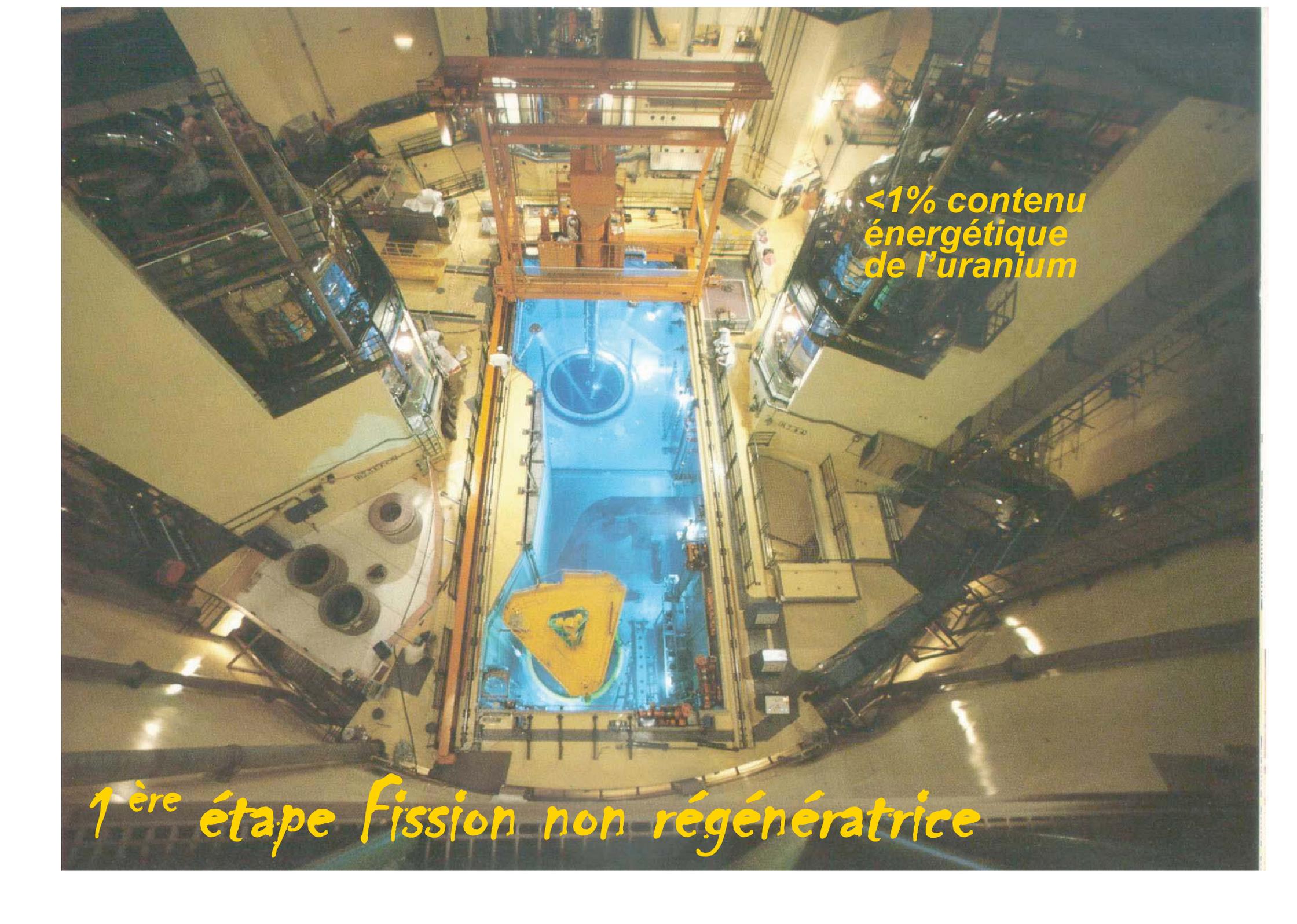


La fusion restera-t-elle toujours une énergie d'avenir?



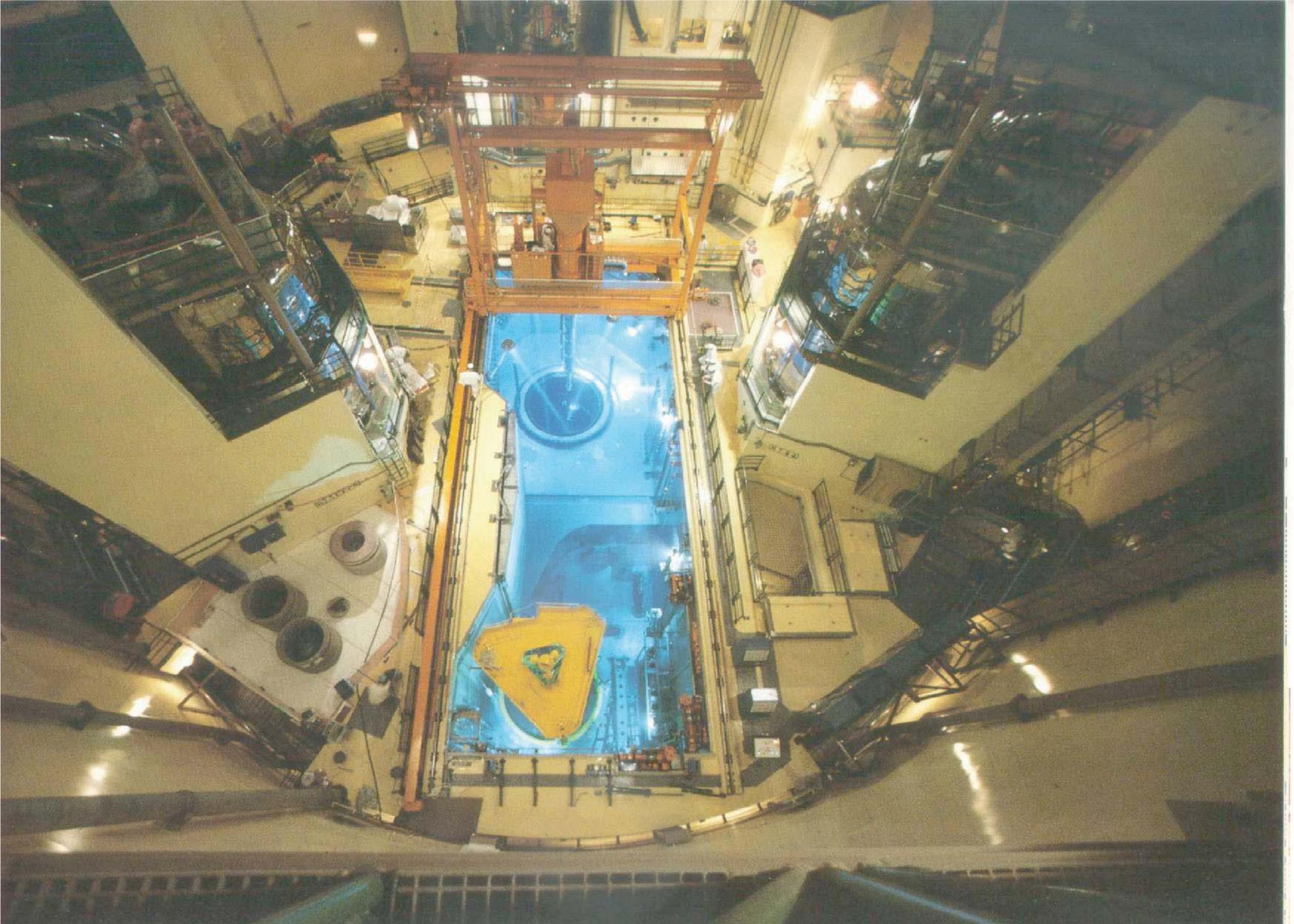
A photograph of a nuclear power plant with two large cooling towers emitting thick white plumes of steam. The plant is situated behind a body of water, which reflects the towers and the sky. Lush green trees are visible in the foreground and background, framing the scene. The sky is blue with scattered white clouds.

*Le nucléaire
une énergie durable?*



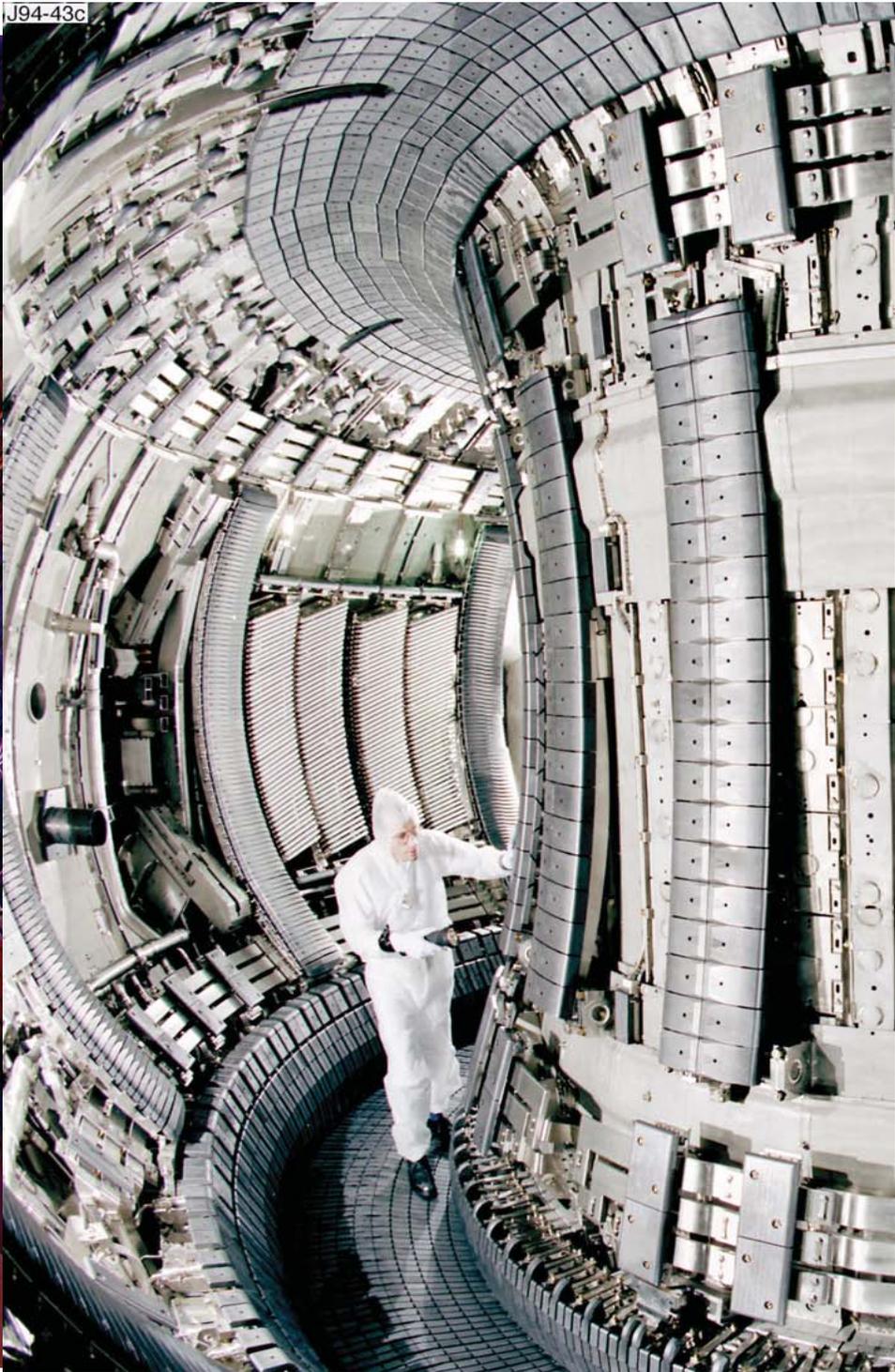
*<1% contenu
énergétique
de l'uranium*

1^{ère} étape fission non régénératrice





J94-43c

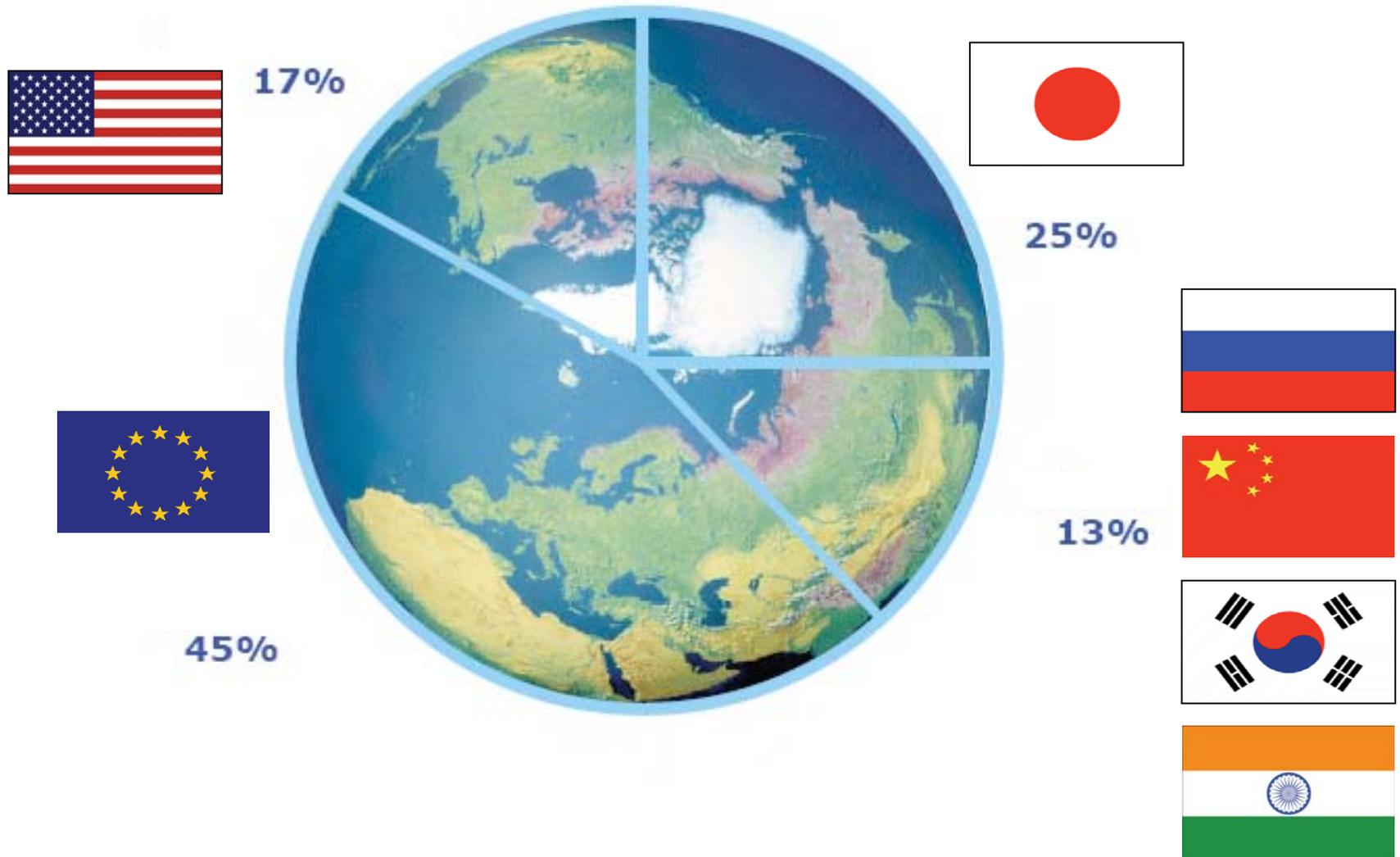


28 juin 2005

ITER
en
Europe



Europe + Japon : 70% de la recherche mondiale



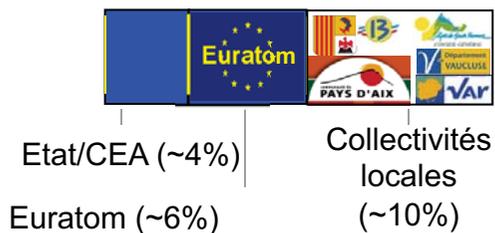
Les océans, réservoirs de combustibles nucléaires?

	Concentration dans océans (g/m ³)	Total océans (milliard tonnes)	Total terre (milliard tonnes)	Ressources humanité (années)
<i>Deuterium</i>	33	45 200	-	~ 5 milliards
<i>Lithium</i>	0.17	233	0.8	~ 100 millions
<i>Uranium</i>	0.003	4.5	0.023	~ milliers
<i>Thorium</i>	10 ⁻⁷	0.0001	0.092	~ centaines

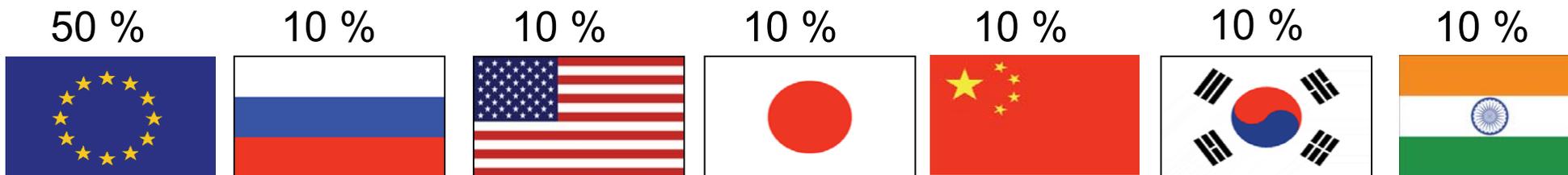


ITER: le partage des coûts

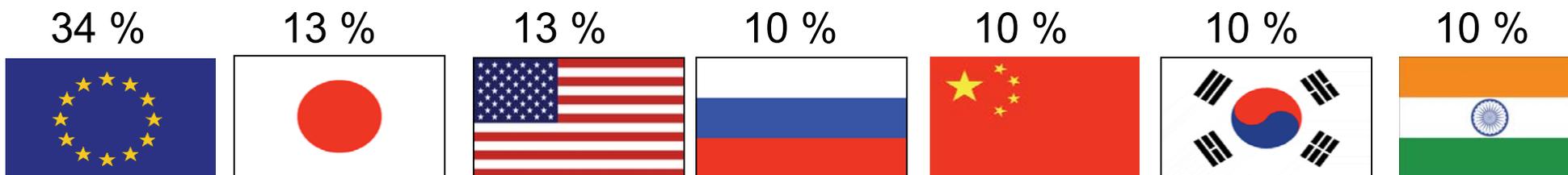
20 %

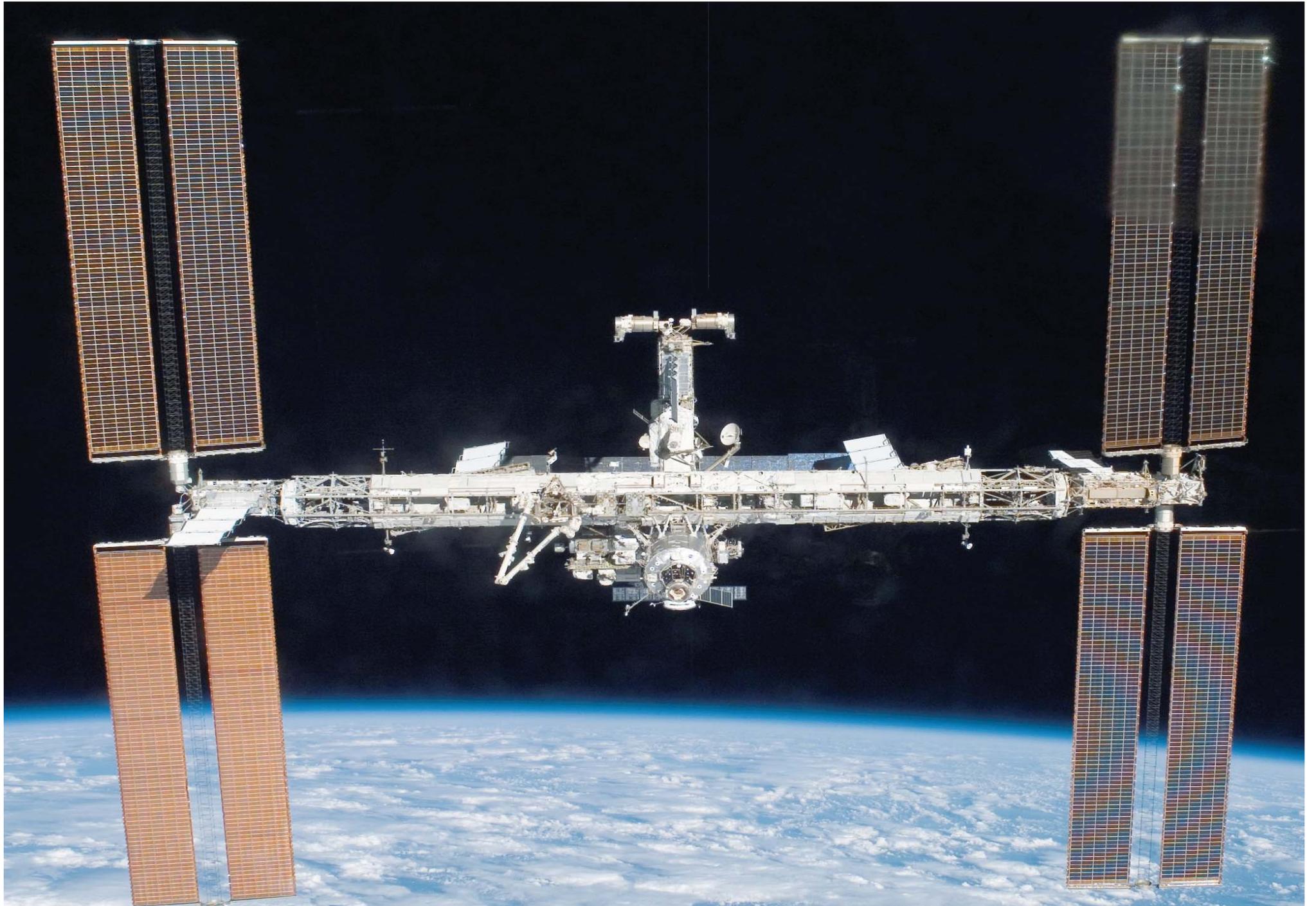


Construction / 10 ans / 15 G€



Exploitation démantèlement / 20 ans / 5,7 G€



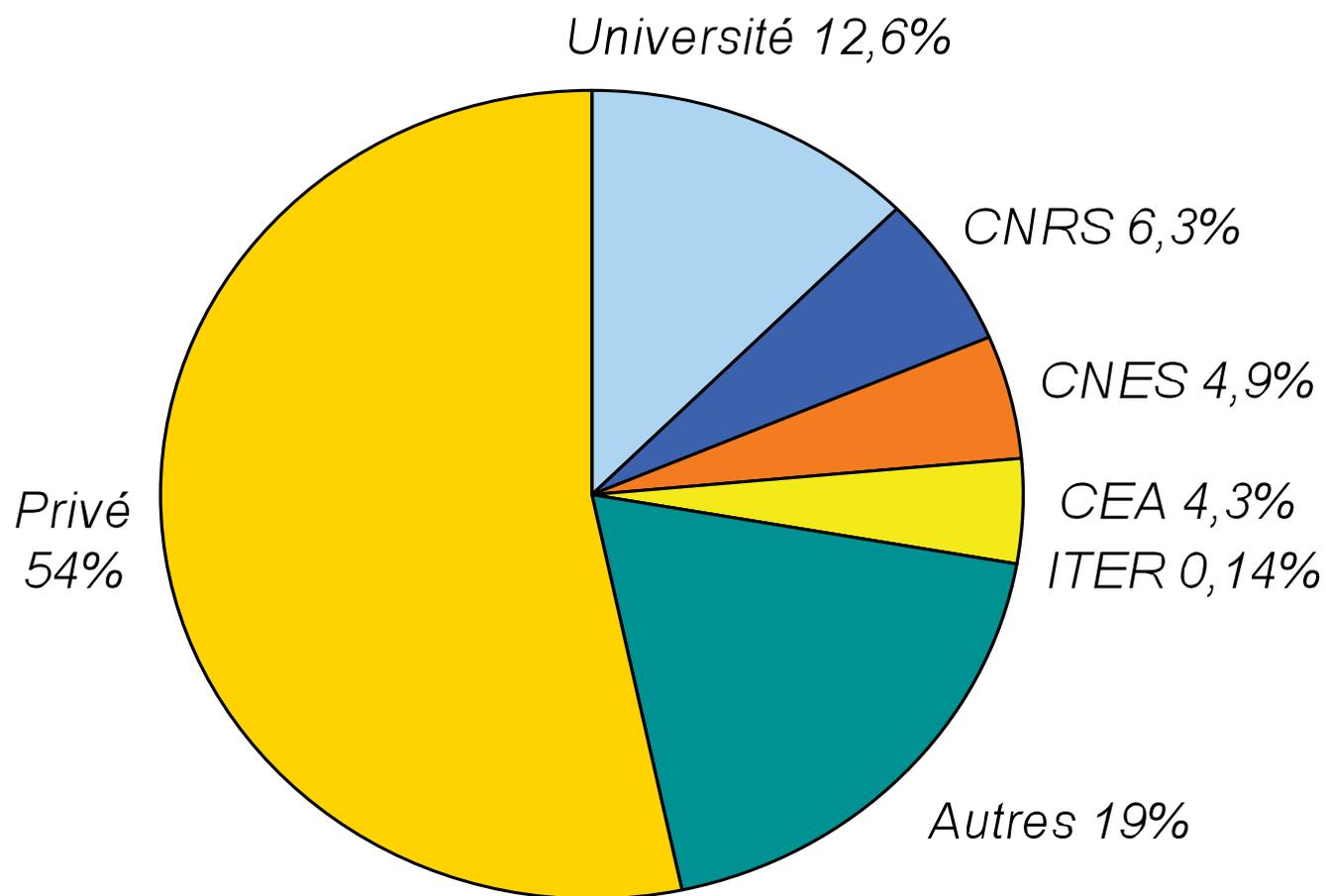


Le poids d'ITER dans la recherche française

35 G€ / an 350.000 personnes

0.05 G€ / an 350 personnes

1€ investi dans ITER  ~ 3€ dépensés en France



Source : Ministère délégué à la Recherche données 2003