

Quel sera le premier réacteur à fusion : Tokamak ou Stellarator ?

Jef Ongena

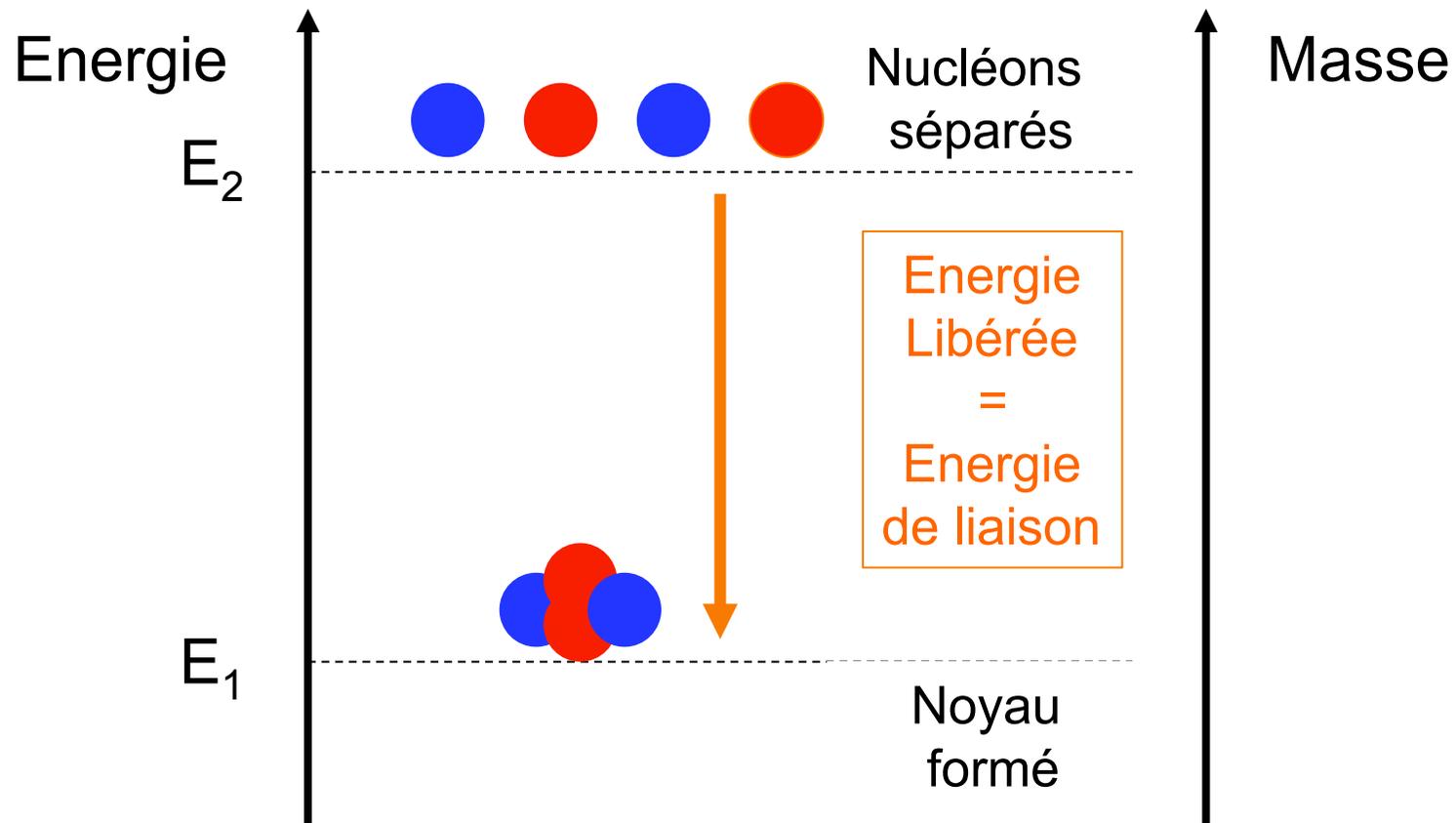
***Directeur de Recherches
Laboratoire de Physique des Plasmas
Ecole Royale Militaire
Bruxelles***

**Centrale Energies
4 Octobre 2017
Paris, France**



Principes des réactions de fusion

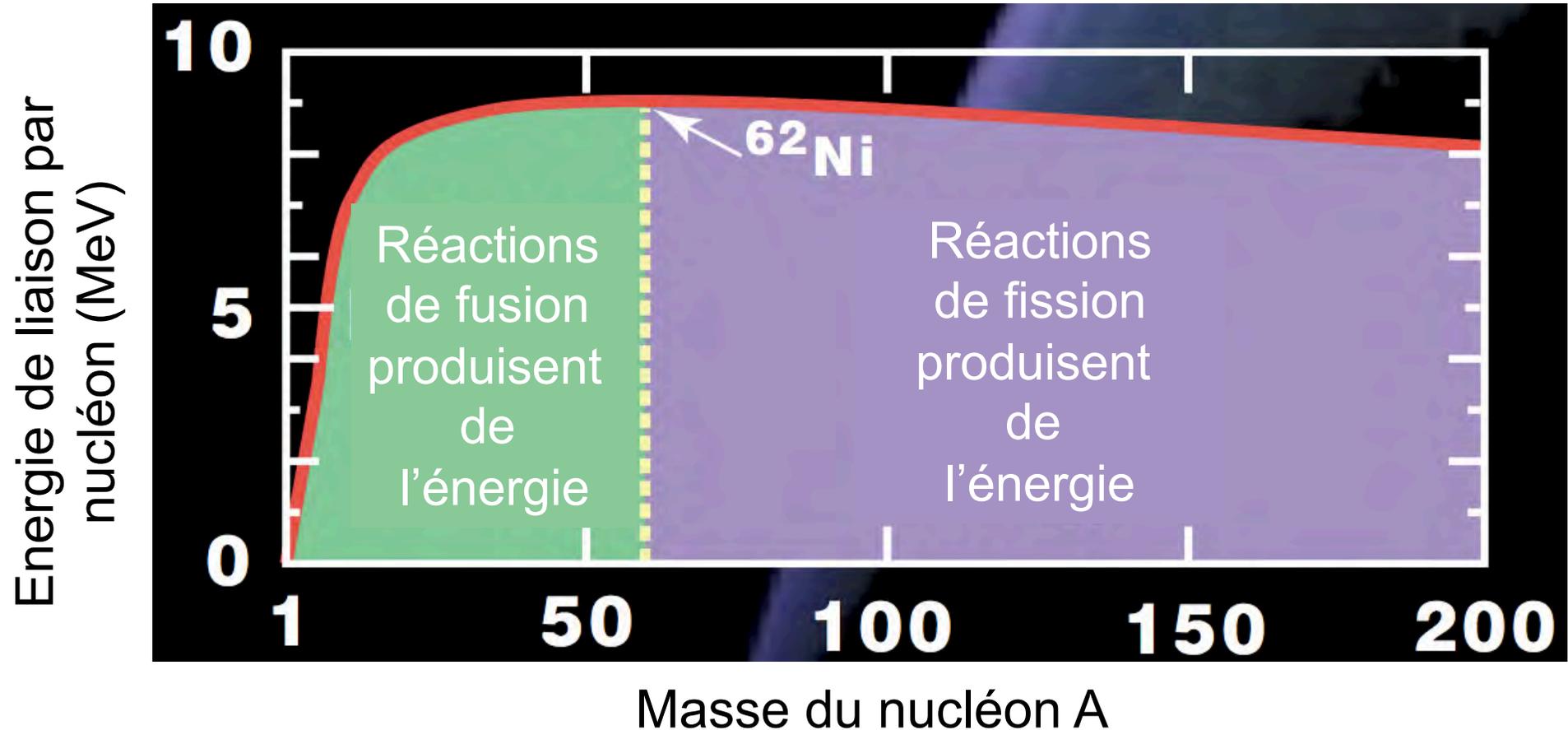
Energie de liaison



Note: L'énergie de liaison est positive car c'est une énergie qu'il faut fournir à un noyau pour le dissocier en nucléons séparés

Origine du gain d'énergie dans les réactions de fission/ fusion

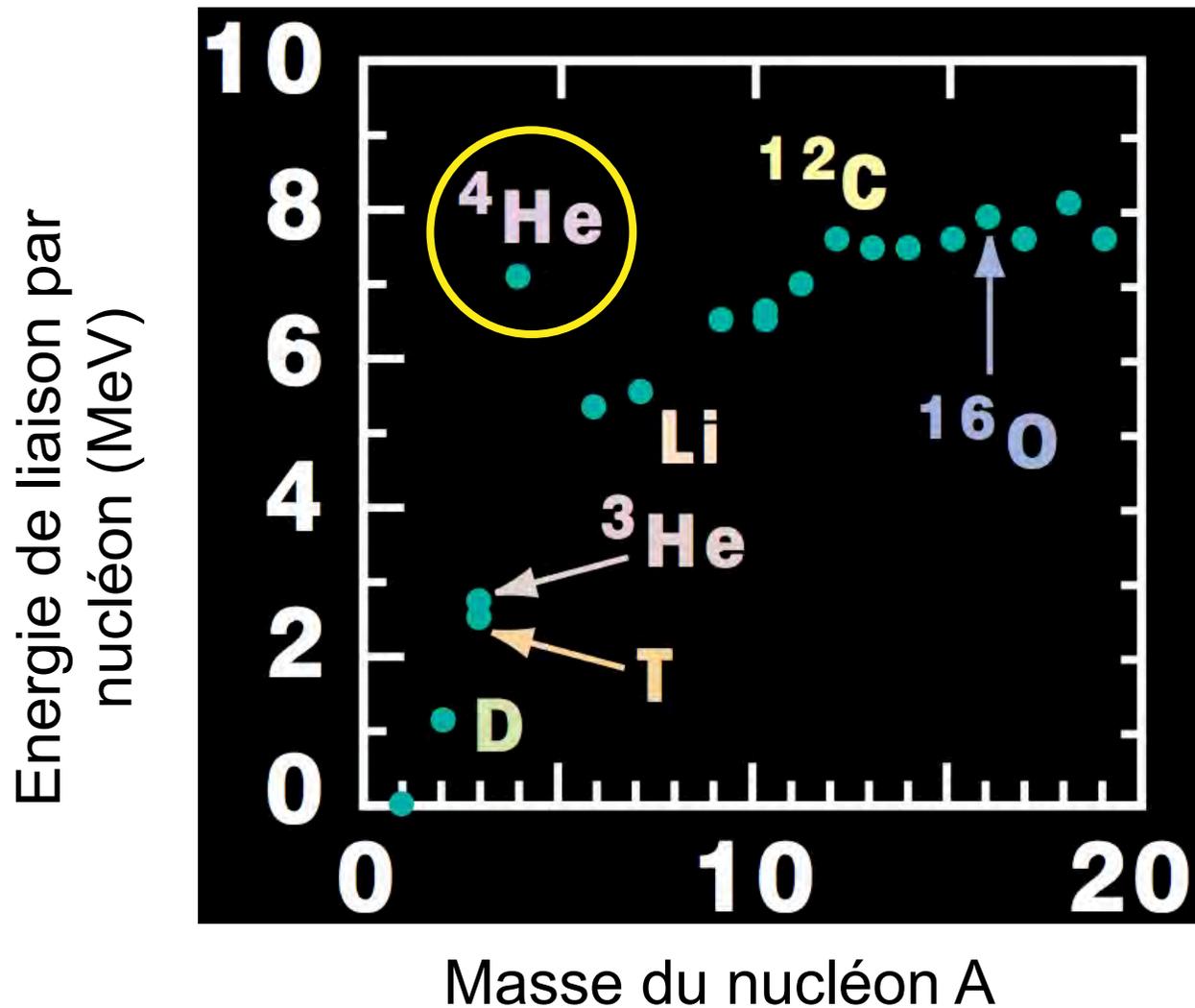
La différence en énergie de liaison
entre les noyaux légers et leurs produits de fusion



Maximum pour $\sim ^{62}\text{Ni}$: conséquences pour les étoiles lourdes

Gain d'énergie dans les réactions de fusion

L'énergie de liaison du ^4He est exceptionnellement grande



Noyau	Energie de liaison totale (MeV)
D = ^2H	2.22457
T = ^3H	8.48182
^3He	7.71806
^4He	28.29567

Si ^4He est le produit de la réaction \rightarrow maximum d'énergie

**Les réactions de fusion dans le soleil
et
dans les machines terrestres**

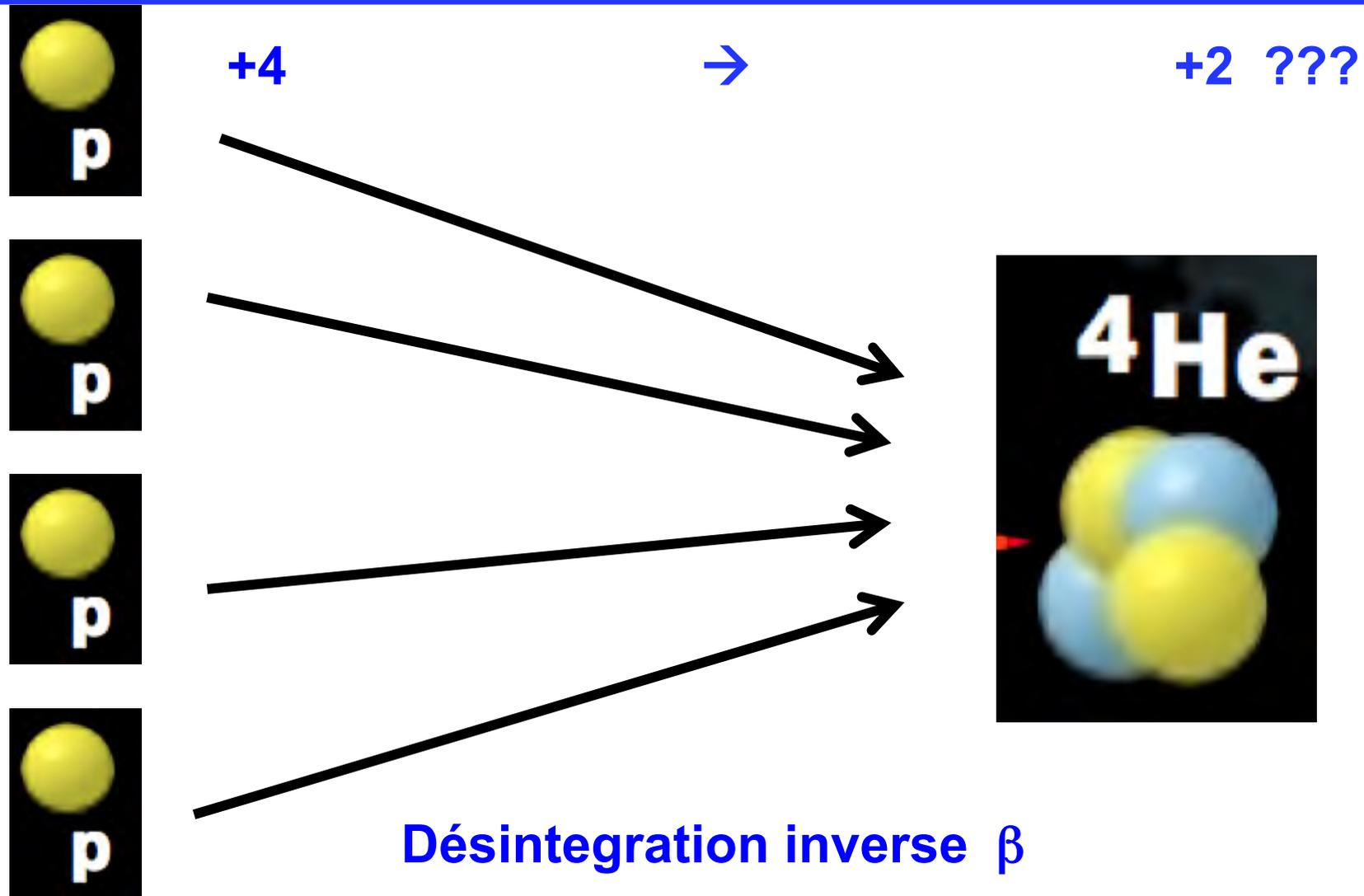
Les réactions de fusion dans le soleil



Fusion de l'hydrogène pour former de l'hélium

Group #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period																		
1	1 H	Fusion →																2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	(117) (Uus)	118 Uuo
* Lanthanoids	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
** Actinoids	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr			

De l'hélium produit à partir de 4 protons ?



Désintégration inverse β

Réaction très difficile et lente (main bien pour l'humanité....)

Soleil: chaque seconde 4 millions de tonnes \rightarrow énergie

La température du soleil

Température à la surface

De la loi de Stefan-Boltzmann et sa luminosité L:

$$L = 4\pi\sigma R_{\text{soleil}}^2 T_{\text{surface}}^4 \rightarrow T_{\text{surface}} = 5780\text{K}$$

(σ = constante de Stefan-Boltzmann = $5.670 \times 10^{-8} \text{ J m}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

Température au centre:

Par proton: l'énergie thermique (= $3/2 kT$) =
l'énergie potentielle gravitationnelle au centre:

$$1.5k T_{\text{centre}} = Gm_p M_{\text{soleil}}/R_{\text{soleil}}$$

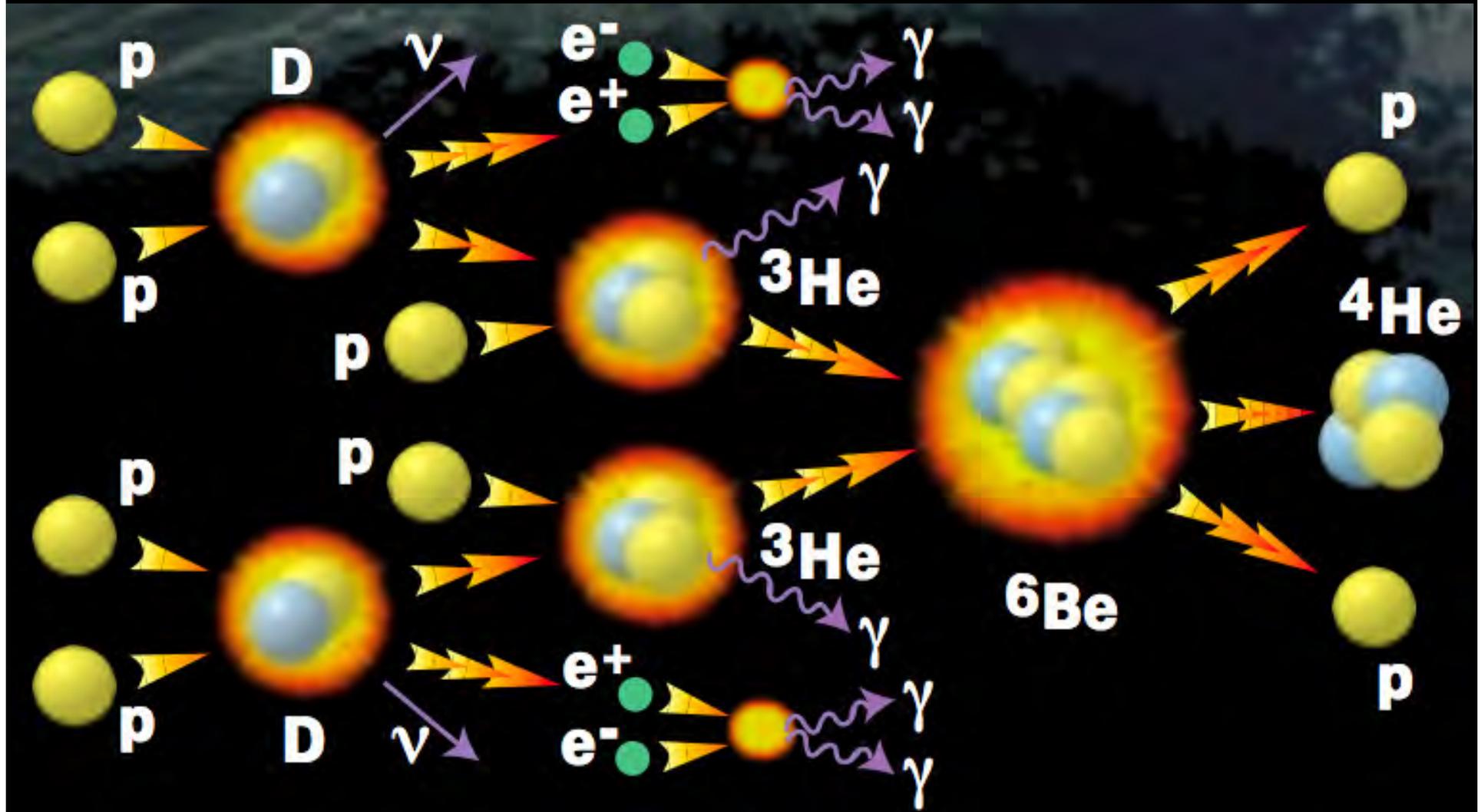
$$T_{\text{centre}} = 15\,600\,000 \text{ K}$$

(G = constante gravitationnelle = $6.6726 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$)

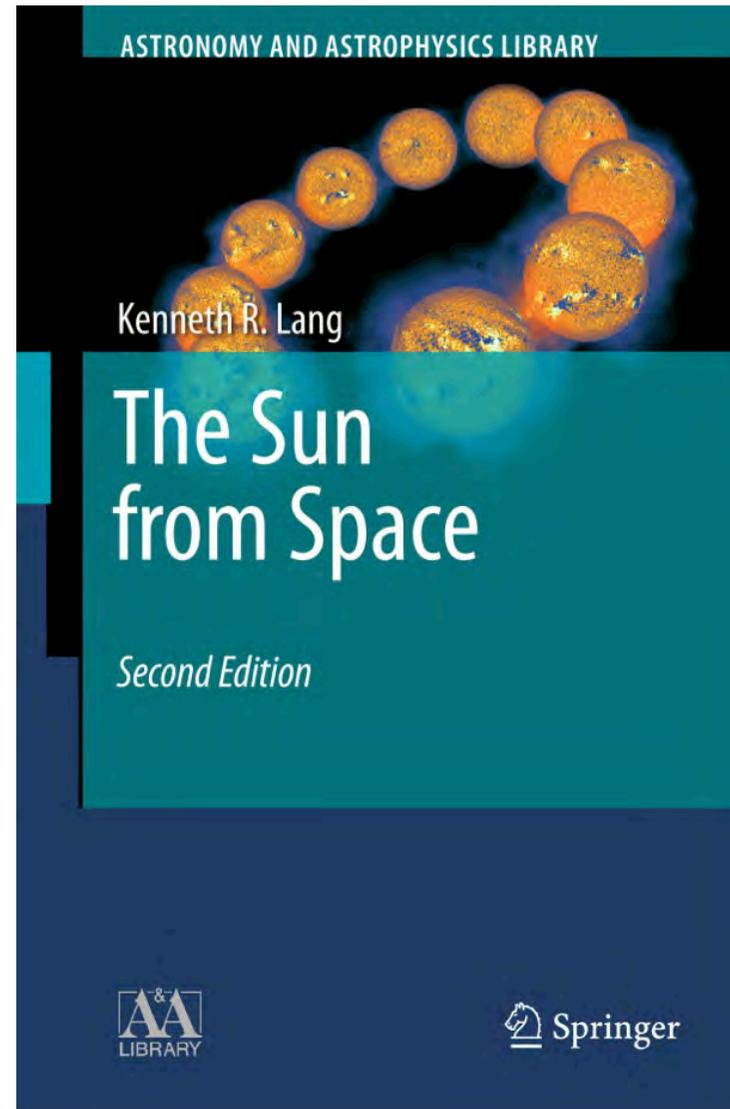
k =constante de Boltzmann= $1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

m_p = masse du proton = $1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

La réaction p-p dans le soleil



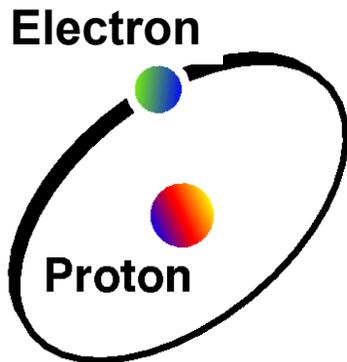
Référence intéressante au sujet du soleil



La fusion terrestre

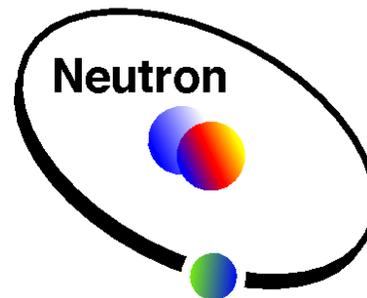


La fusion terrestre: utiliser les isotopes d'hydrogène



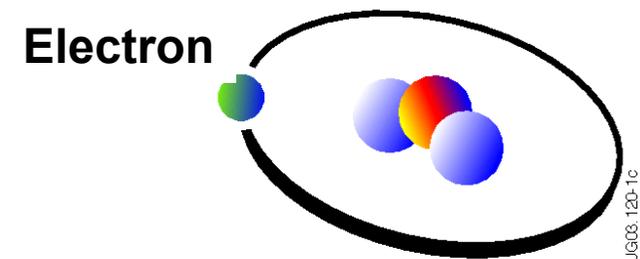
Hydrogène (${}^1_1\text{H}$)

Isotope
naturel
Stable



Deutérium (${}^2_1\text{H}$) ou D

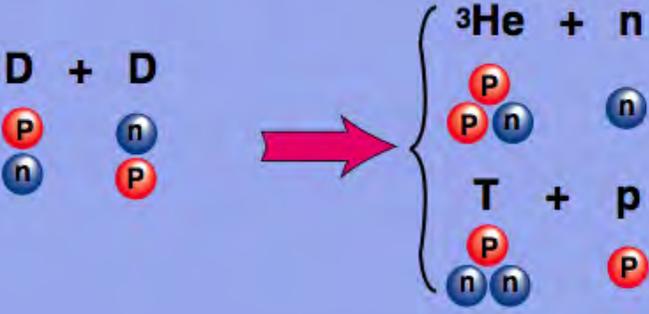
Isotope
naturel
Stable



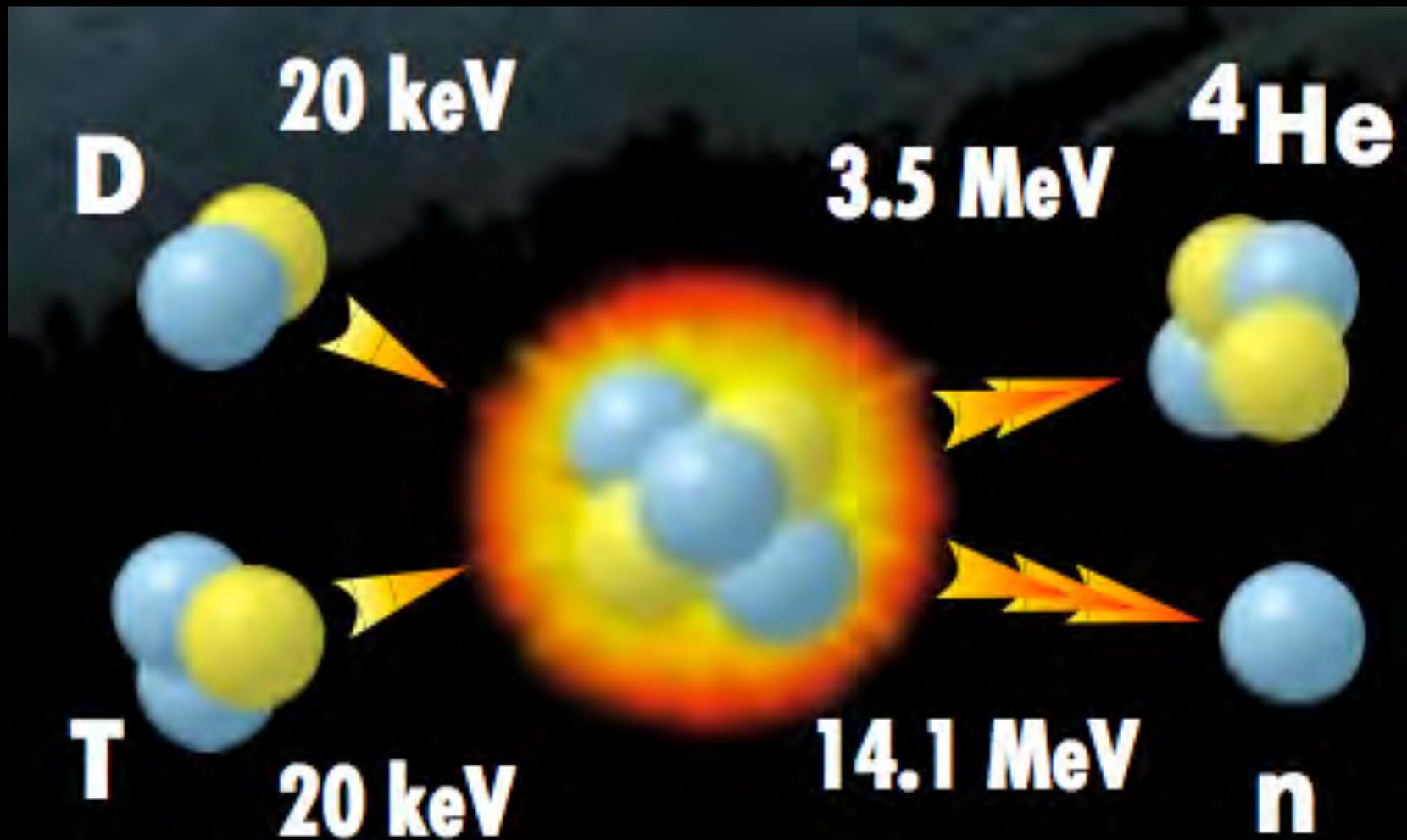
Tritium (${}^3_1\text{H}$) ou T

Isotope
artificiel
Demi-vie
12.3 ans

Les réactions de fusion terrestres 'les plus simples'

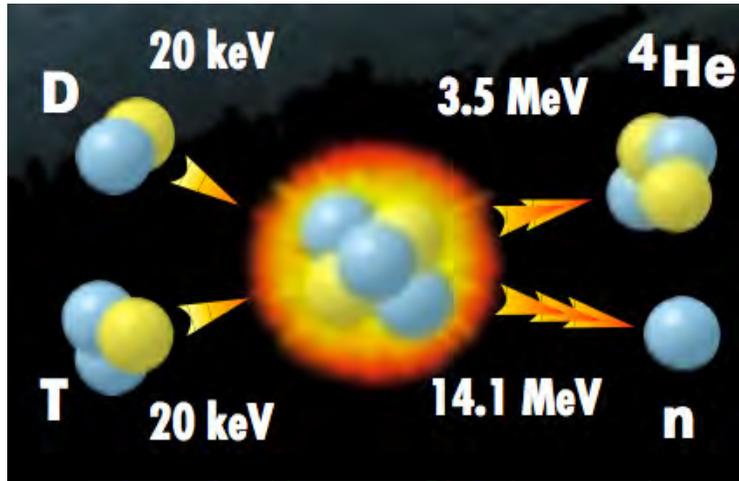
Réaction de fusion	Température nécessaire (en millions de degrés C)	Energie libérée (en keV)
$D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$ 	100-200	17,600
$D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$ 	~700	18,300
$D + D \rightarrow \begin{cases} {}^3\text{He} + n \\ T + p \end{cases}$ 	~400	~4,000
	~400	~4,000

La réaction de fusion terrestre la plus 'simple'

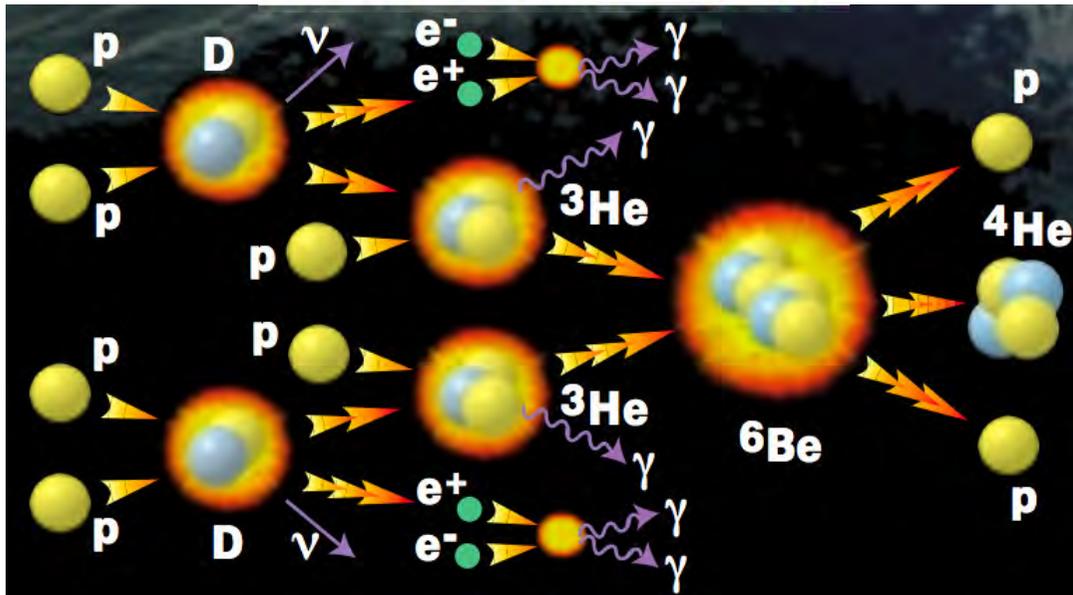


Comparons les réactions de fusion p-p et D-T

Sur terre (D-T)



Dans le soleil (p-p)

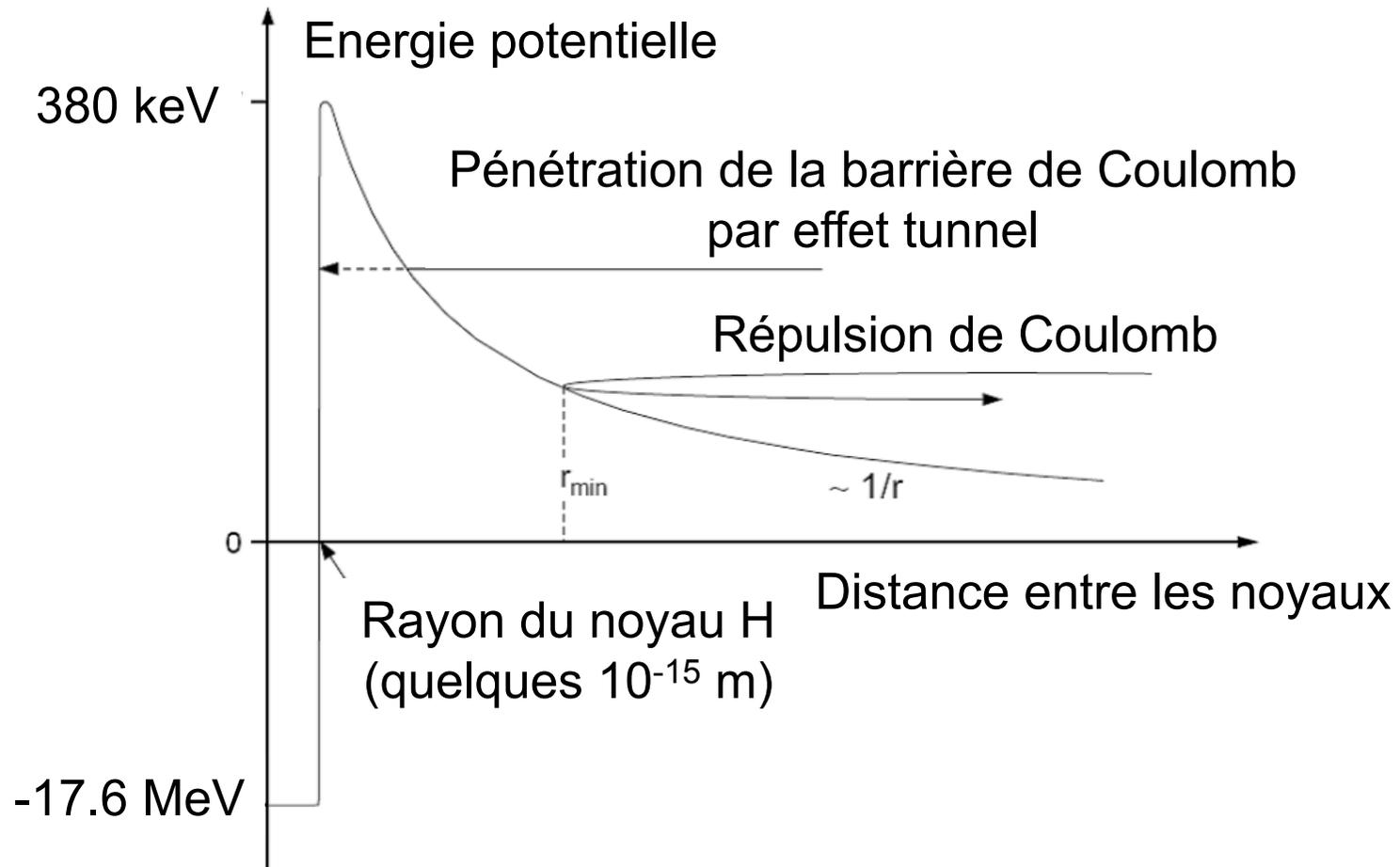


La réaction D-T est

10^{25} fois plus probable que la

réaction p-p

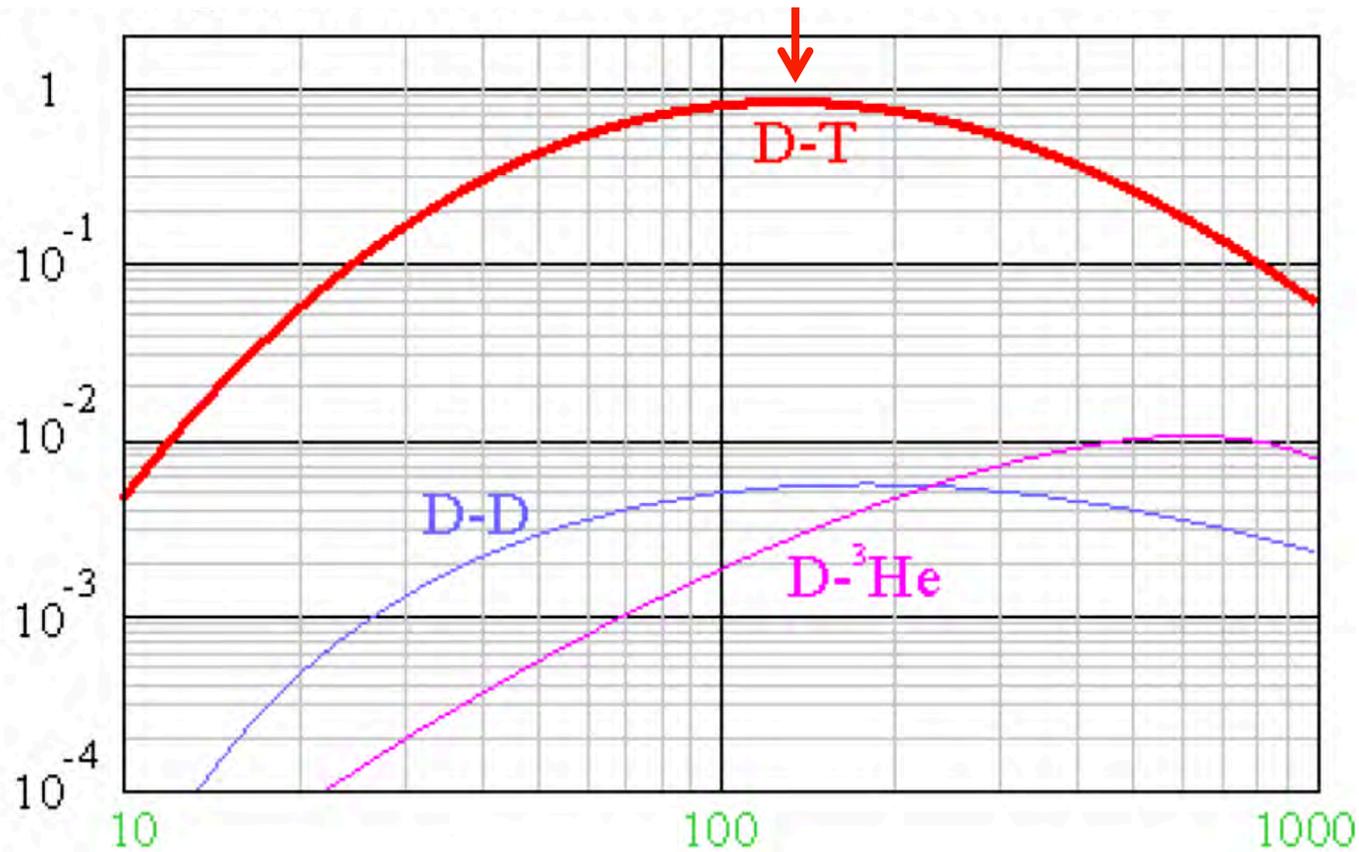
Les réactions de fusion: effet tunnel



Températures nécessaires pour réaliser la fusion sur terre

Maximum pour la réaction D-T à 100-150 millions de degrés C

Sections efficaces pour différentes réactions (échelle relative)



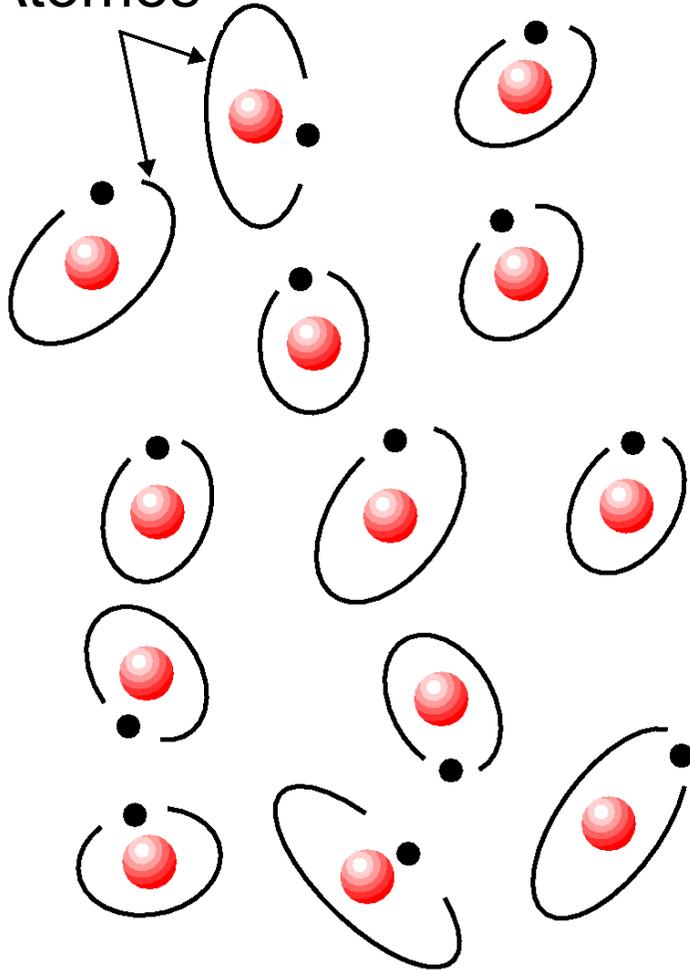
Température du plasma en millions de degrés

Les machines à confinement toroidales
Principes and réalisation pratique

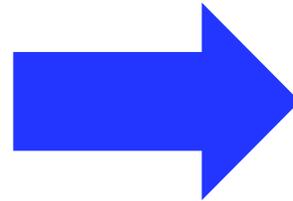
La fusion magnétique: principes

Gaz à basse température

Atomes

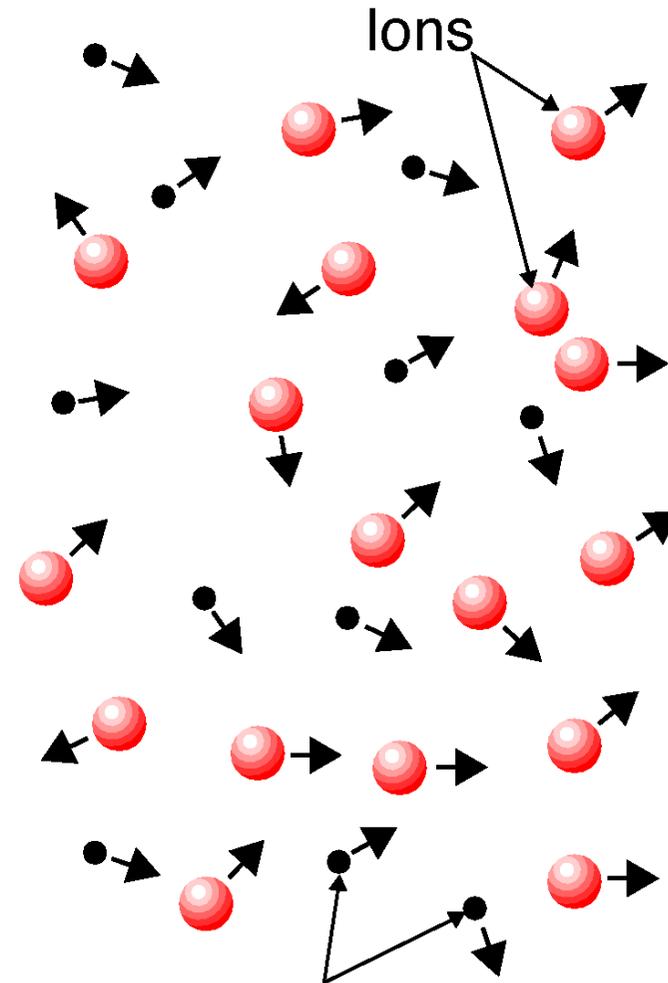


ENERGIE



Plasma

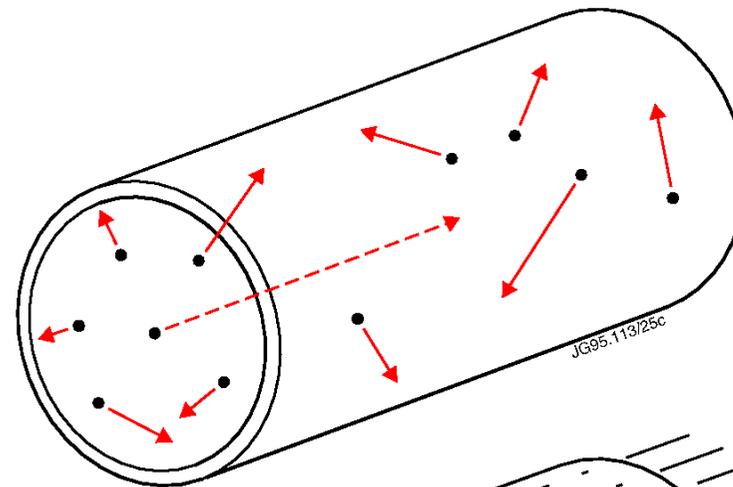
Ions



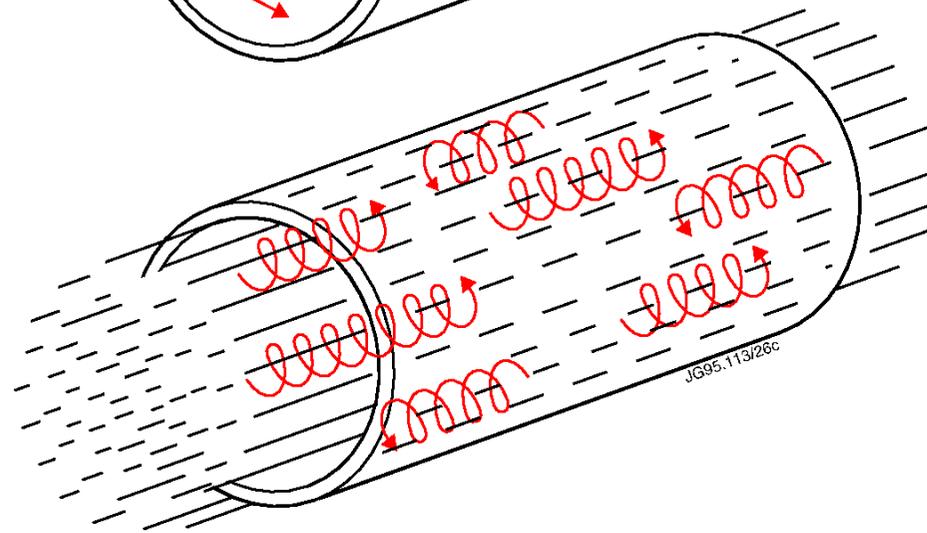
Electrons

La fusion magnétique: principes

Les particules chargées suivent les lignes de champ magnétiques par suite la force de Lorentz



Sans champ magnétique

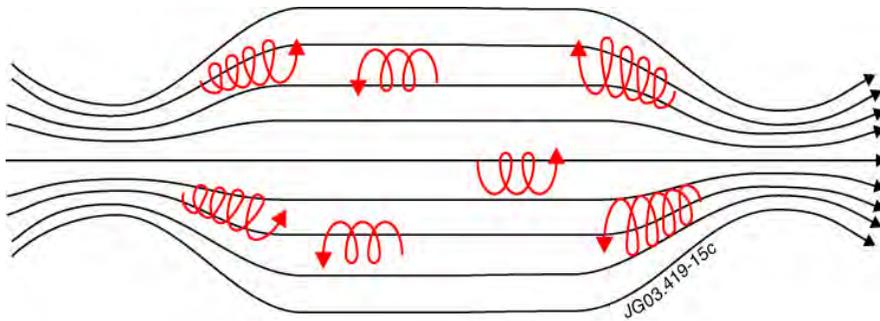


Avec champ magnétique

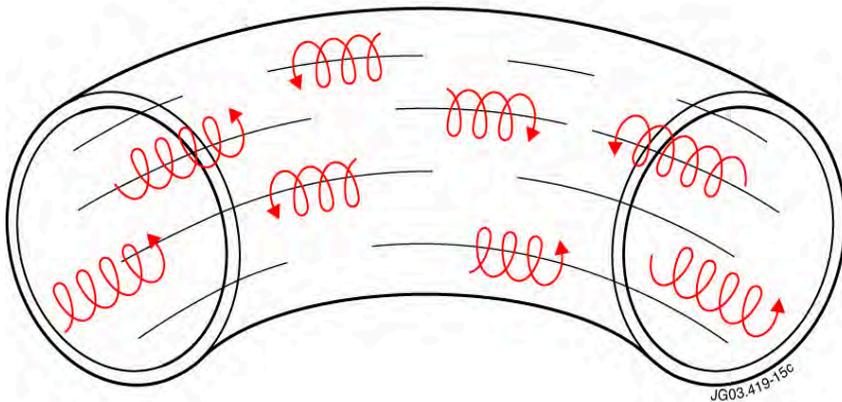
La fusion magnétique: principes

Comment limiter les pertes aux extrémités d'un cylindre ?

Deux solutions possibles



- 'fermer' le champ aux extrémités
 - Systèmes lineaires



- 'fermer' le champ sur lui-même
 - Configurations toroidales

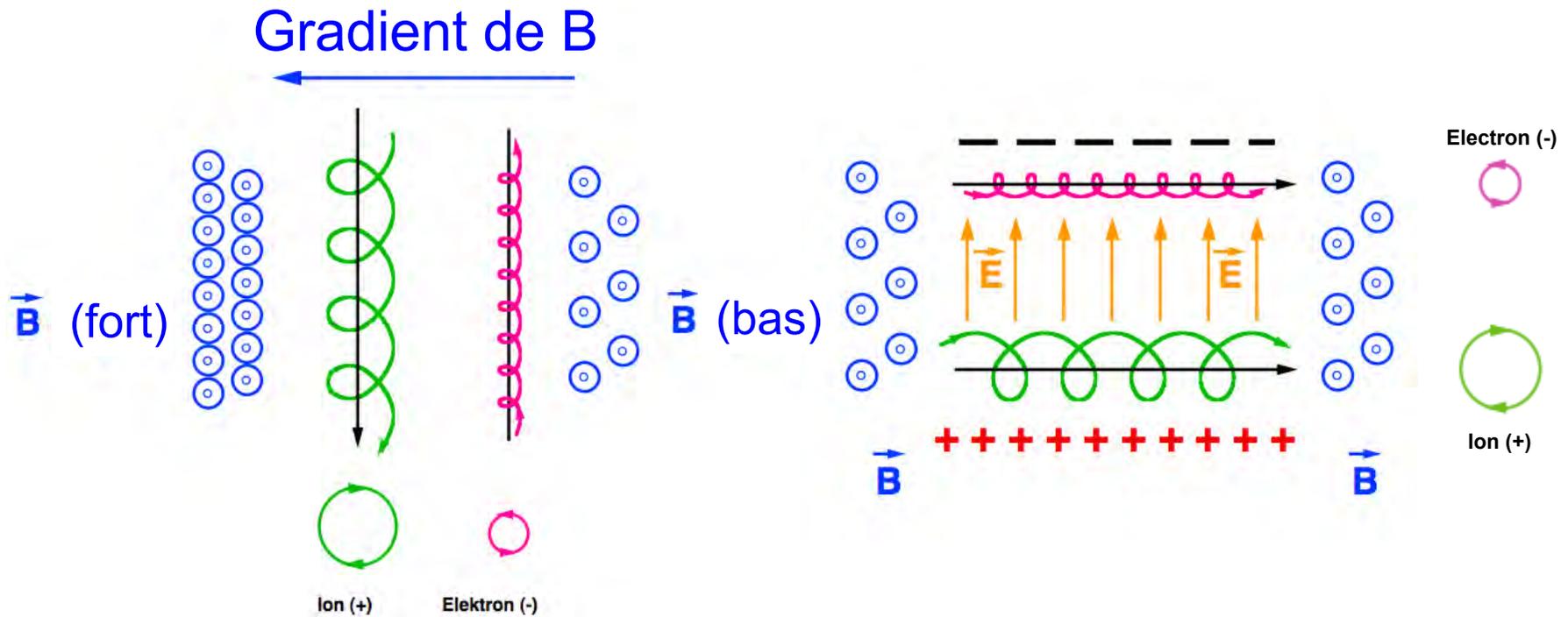
Mais: séparation des charges dans un champ toroidal...

Raison:
Rayon de giration varie avec B et v_{\perp}

$$\rho_L = \frac{mv_{\perp}}{qB}$$

Champ toroidal:
Ions et électrons se séparent
→ Champ électrique

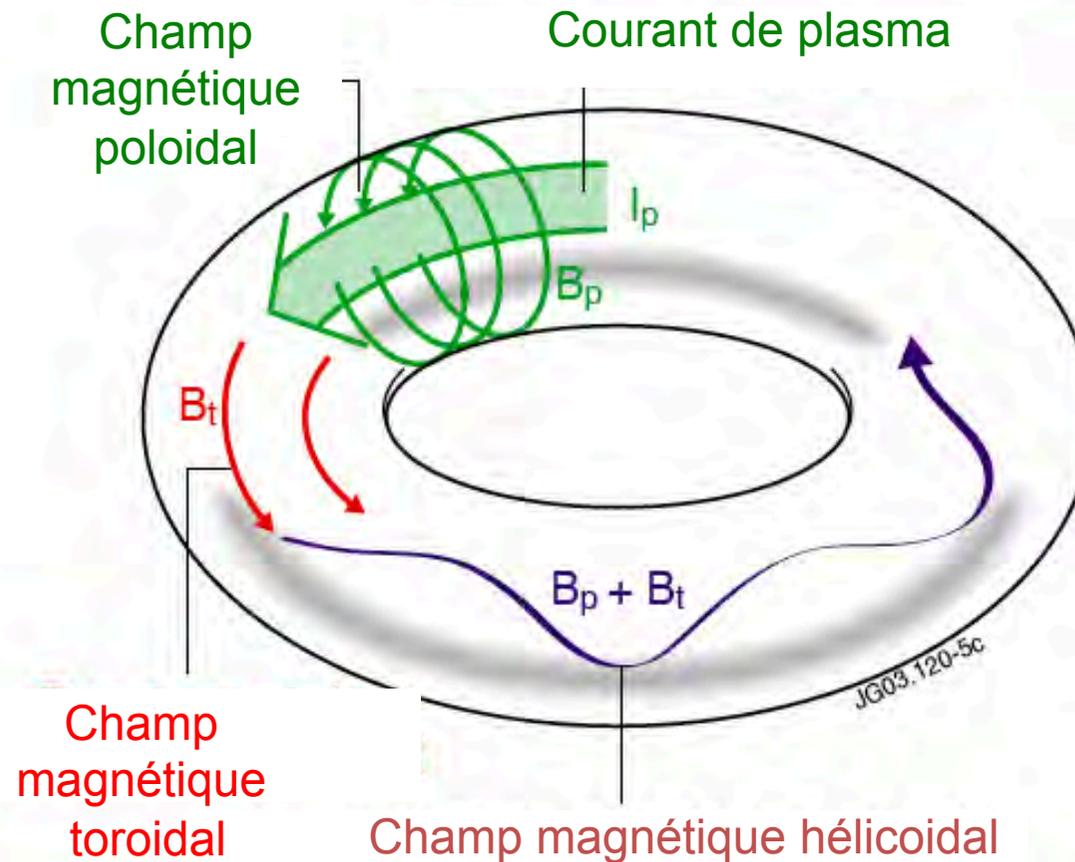
Champ magnétique + électrique:
Ions et électrons quittent le plasma



Réaliser une configuration toroidale stable: Option 1

Tokamak

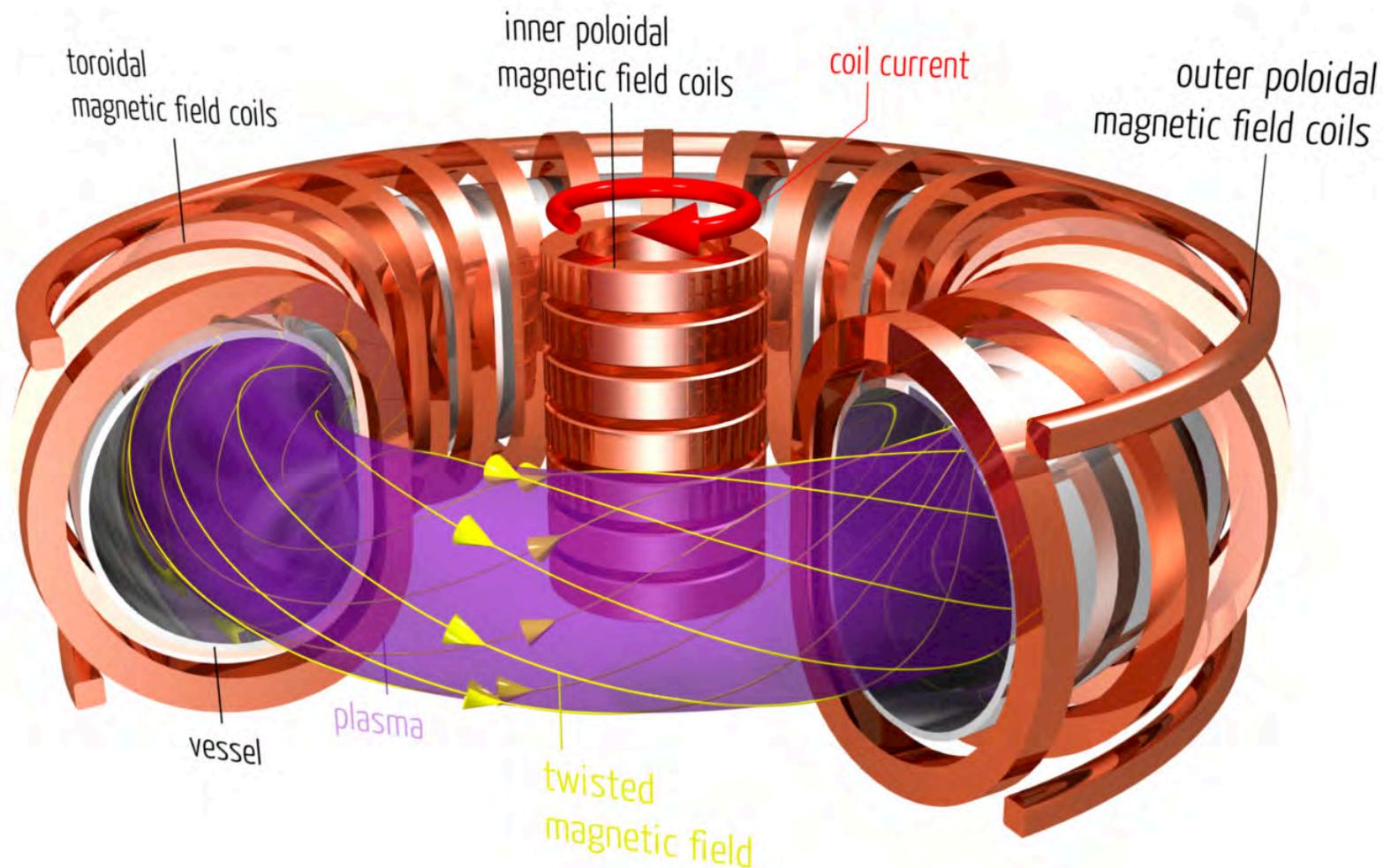
L'anneau de plasma constitue le secondaire d'un transformateur
Le courant de plasma qui y circule est induit par le primaire du transformateur (~100kA - 10MA)



Réaliser une configuration toroidale stable: Option 1

Tokamak (1951 Sakharov et Tamm)

тороидальная камера с магнитными катушками
„chambre toroidale avec bobines magnetiques“



Joint European Torus (JET)

Le plus grand tokamak du monde

(à Culham, à 10km d'Oxford)



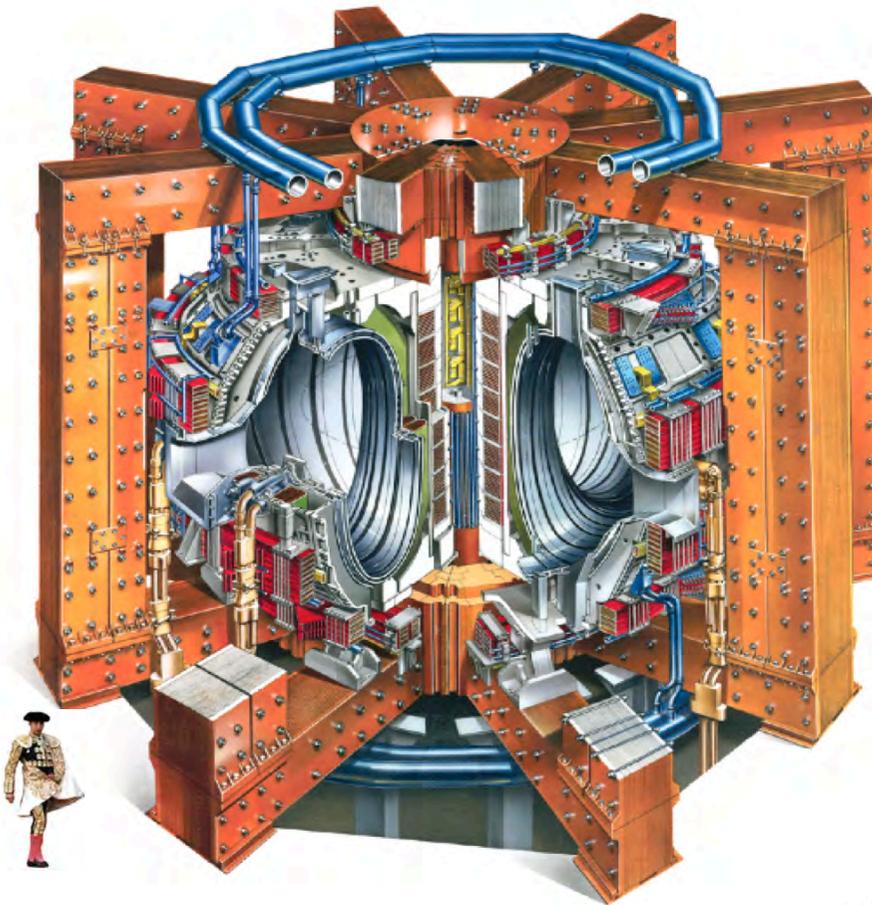
www.jet.efda.org

Joint European Torus (JET)

Joint European Torus (JET)

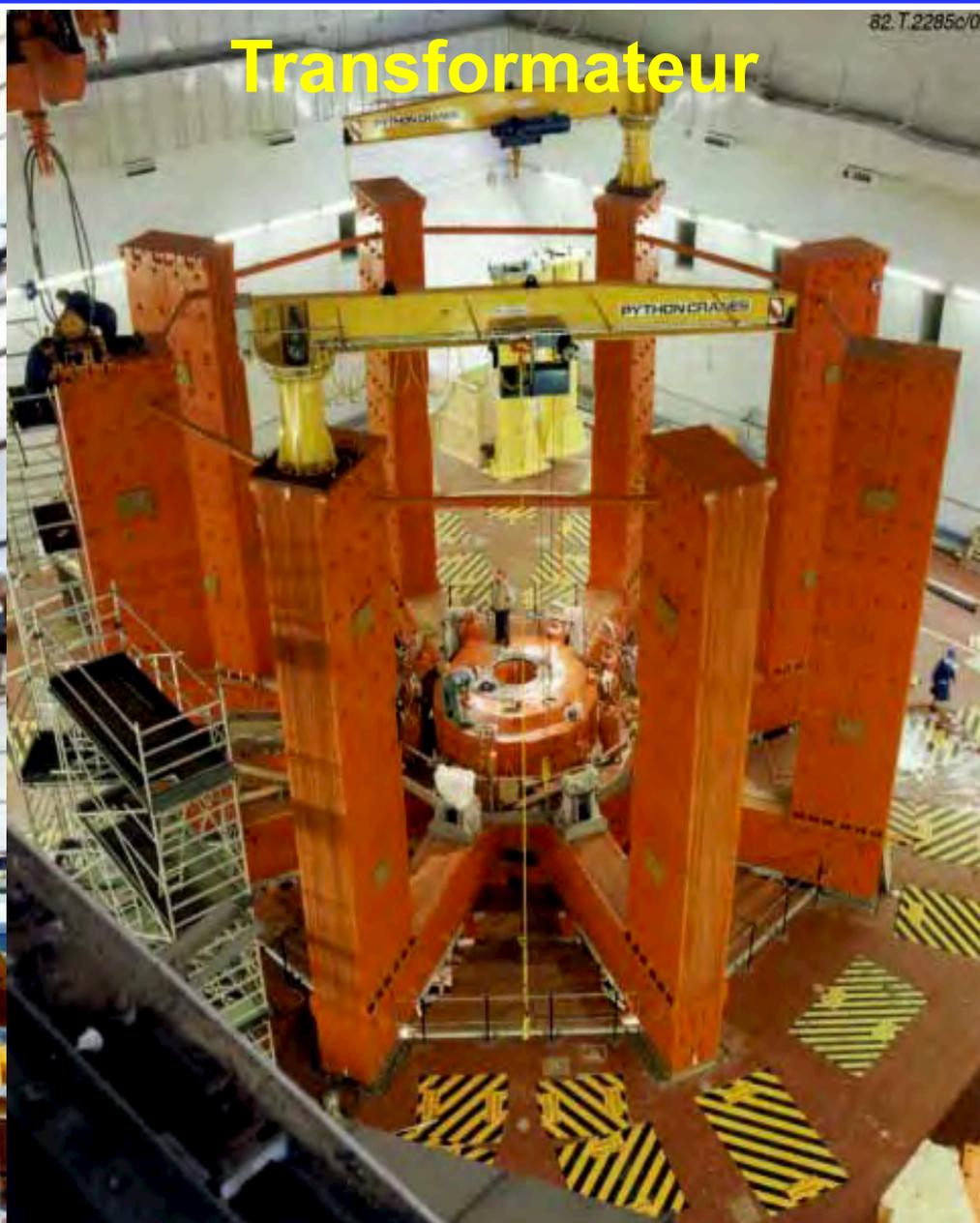
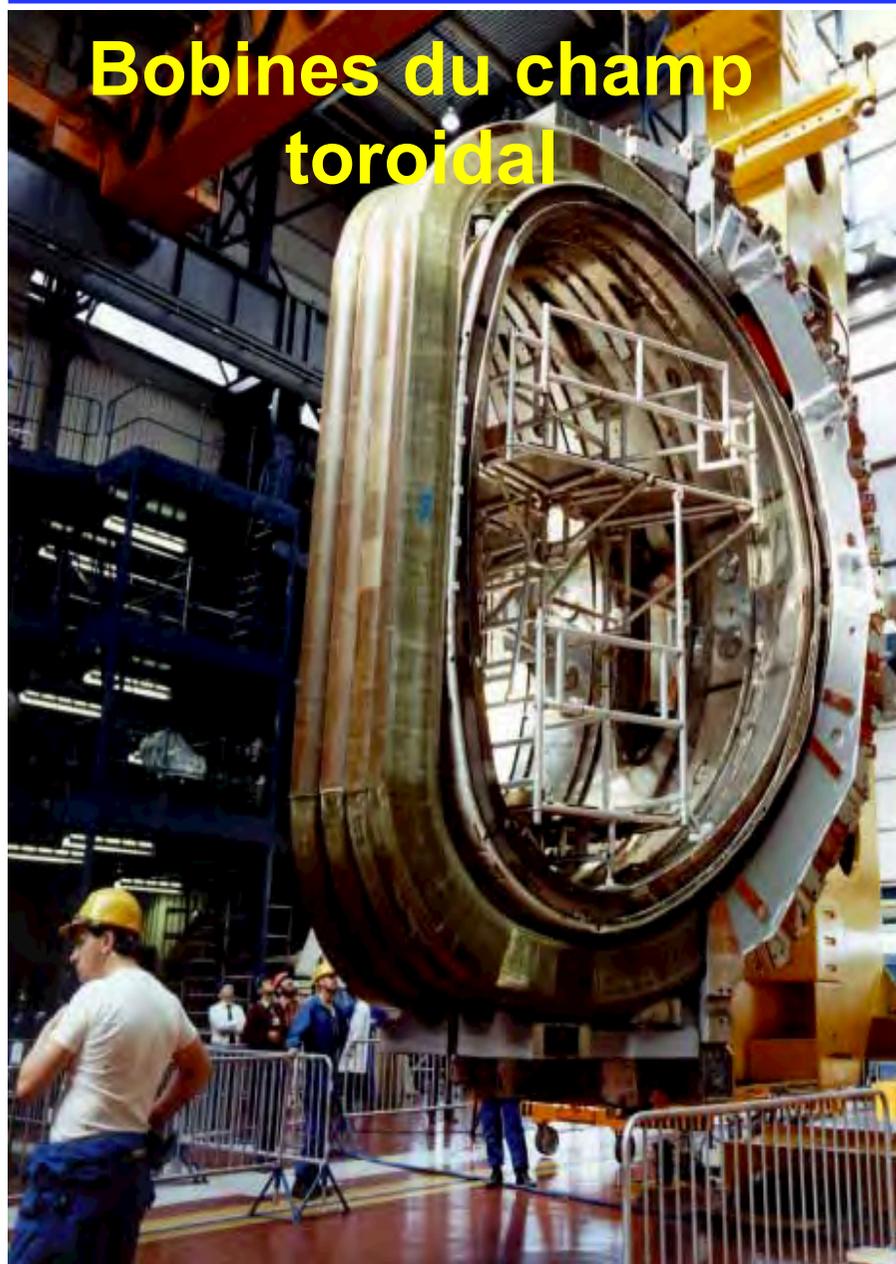
Machine Européenne de fusion (près d'Oxford)

Le plus grand tokamak du monde

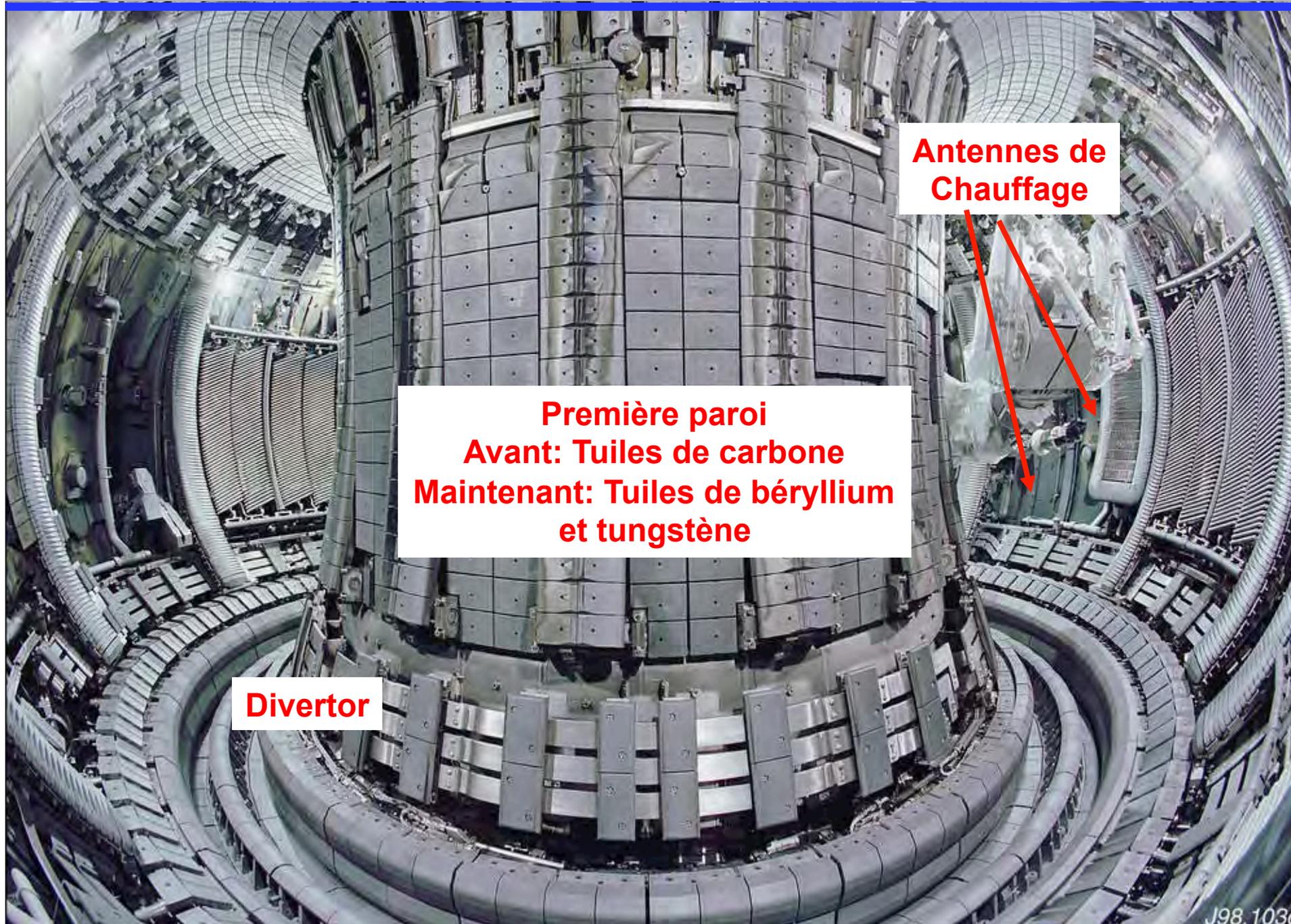


Enceinte à vide	3.96m x 2.4m
Volume du plasma	80 m ³ - 100 m ³
Courant de plasma	jusque 5 MA
	dans la configuration 'divertor'
Champ toroidal	jusque 4 Tesla

Construction de JET (1983)



Vue de l'intérieur de JET

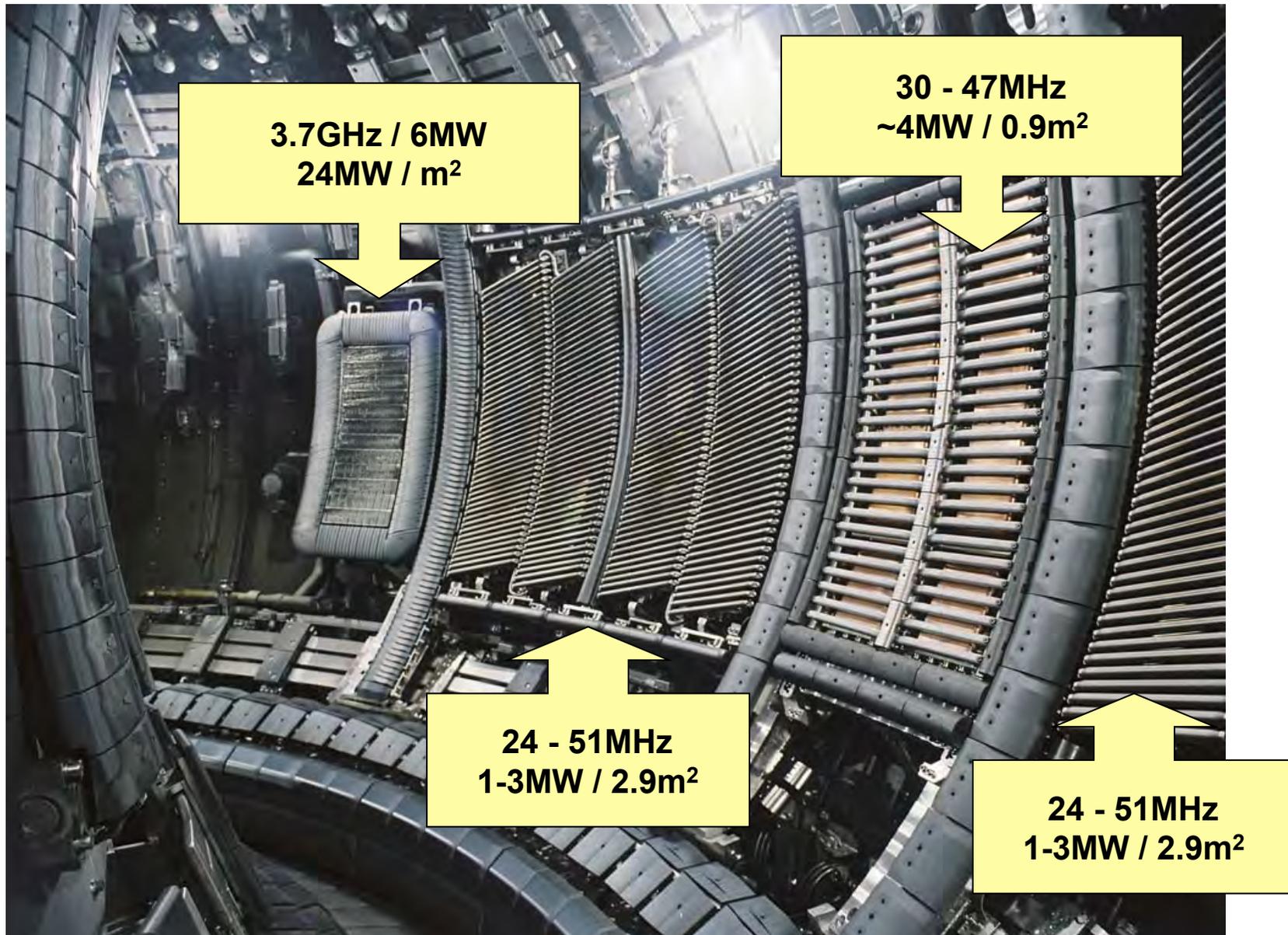


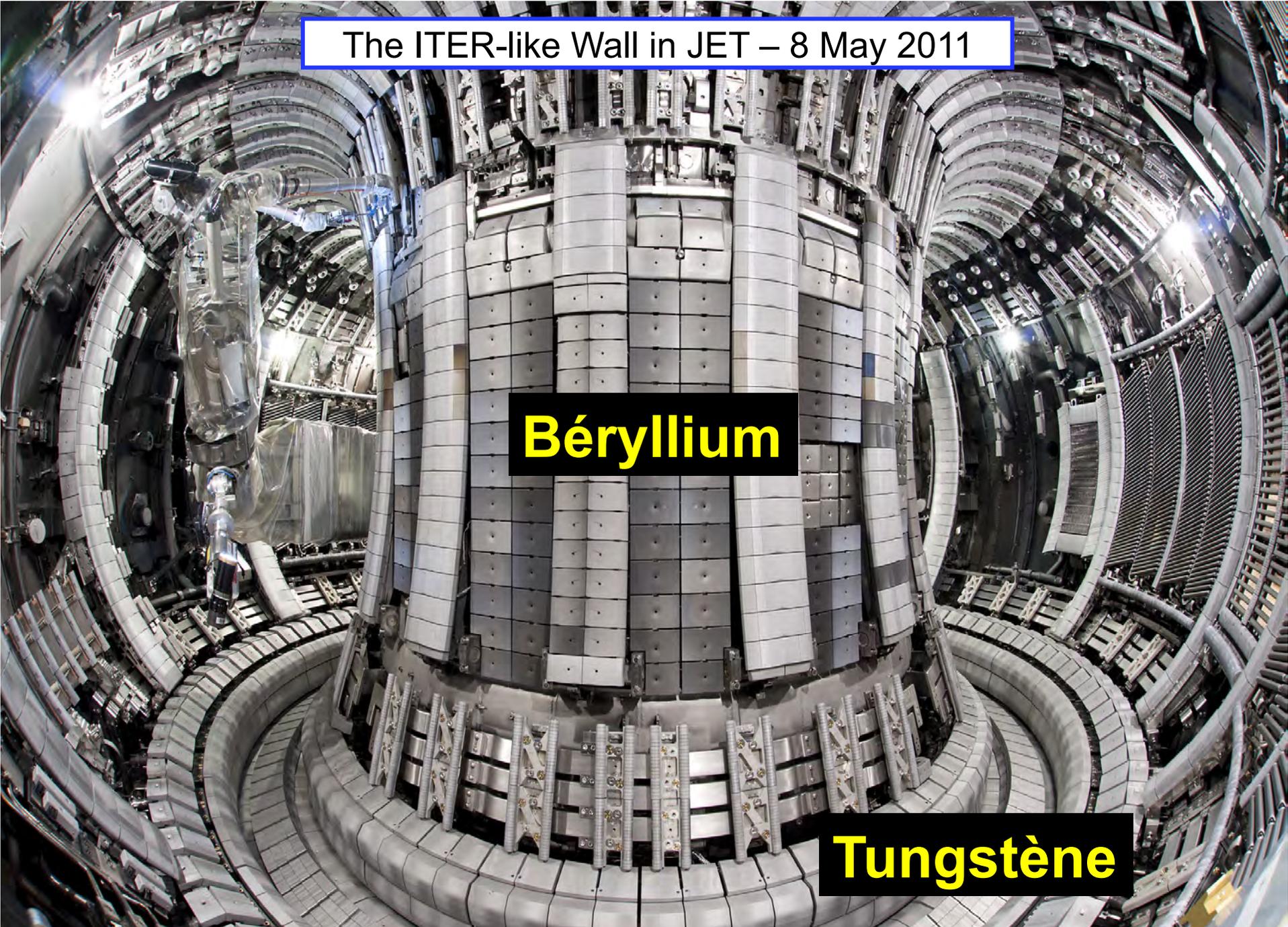
**Antennes de
Chauffage**

**Première paroi
Avant: Tuiles de carbone
Maintenant: Tuiles de béryllium
et tungstène**

Divertor

Systemes de chauffage radiofréquence du JET



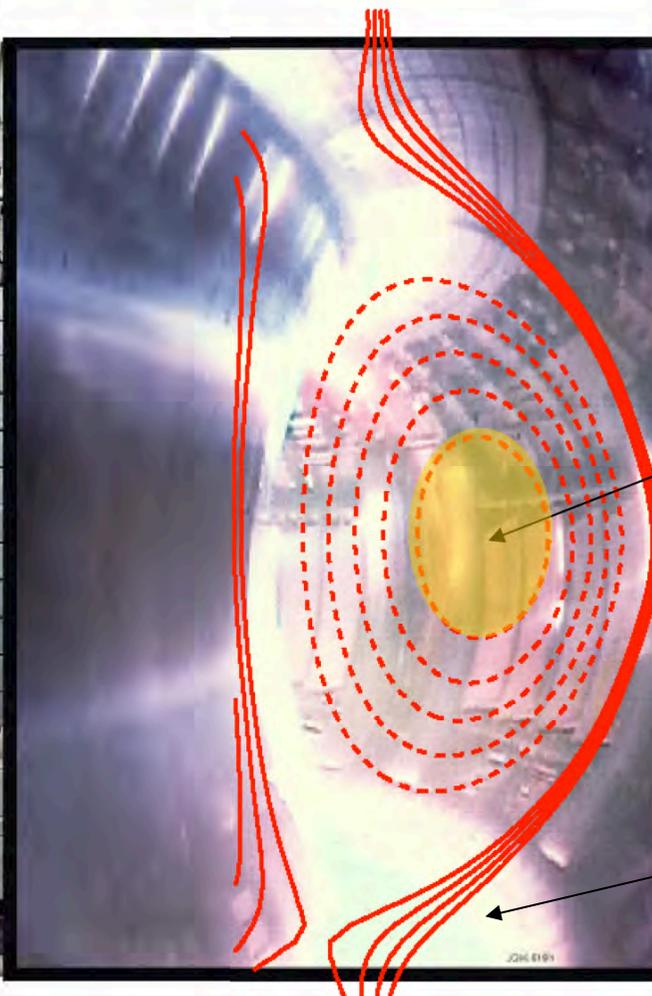


The ITER-like Wall in JET – 8 May 2011

Béryllium

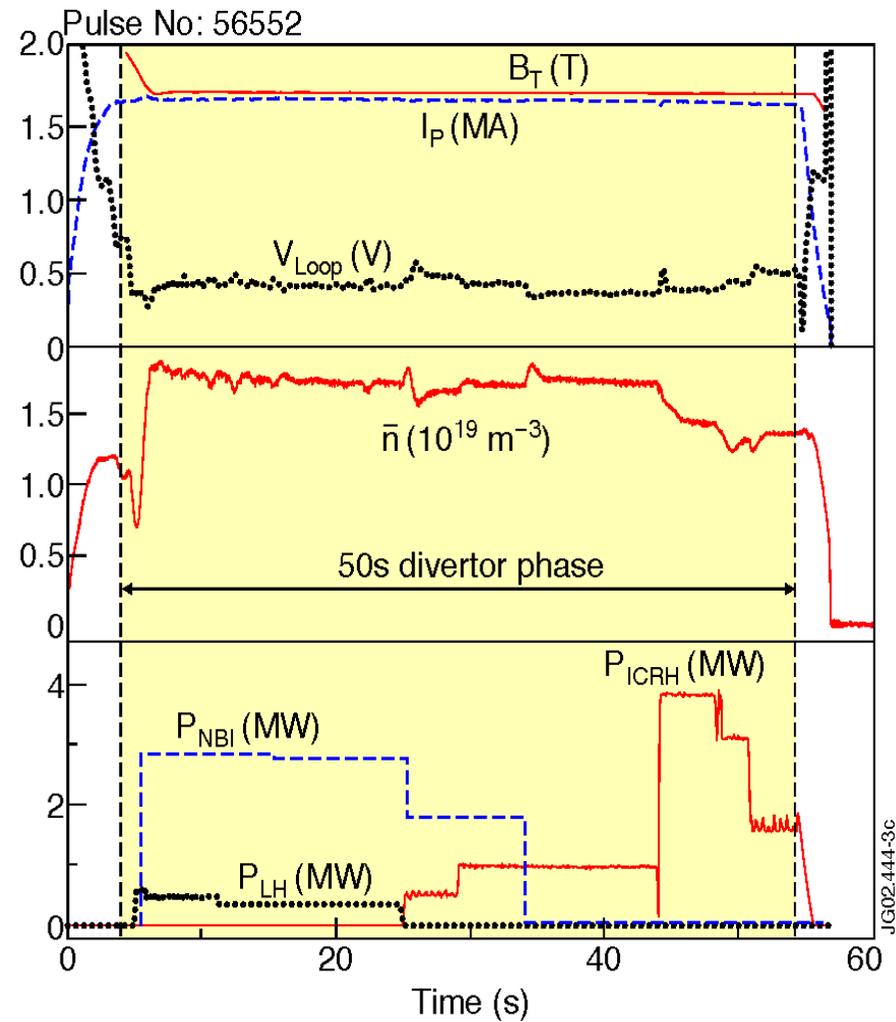
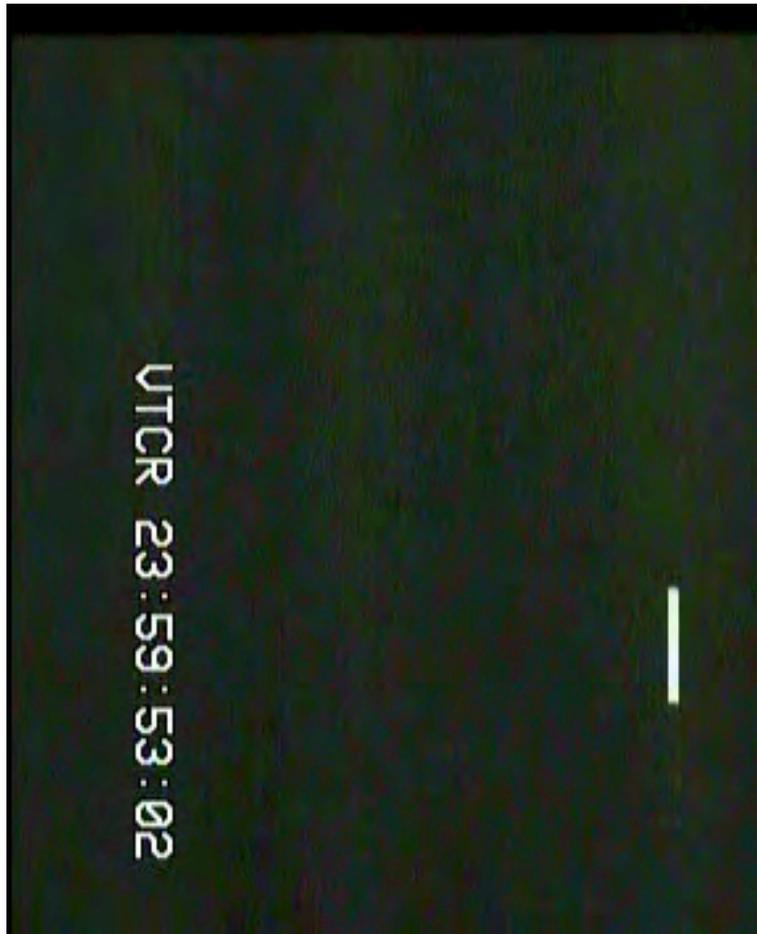
Tungstène

Intérieur du JET avec et sans plasma



Exemple d'une expérience fusion (JET)

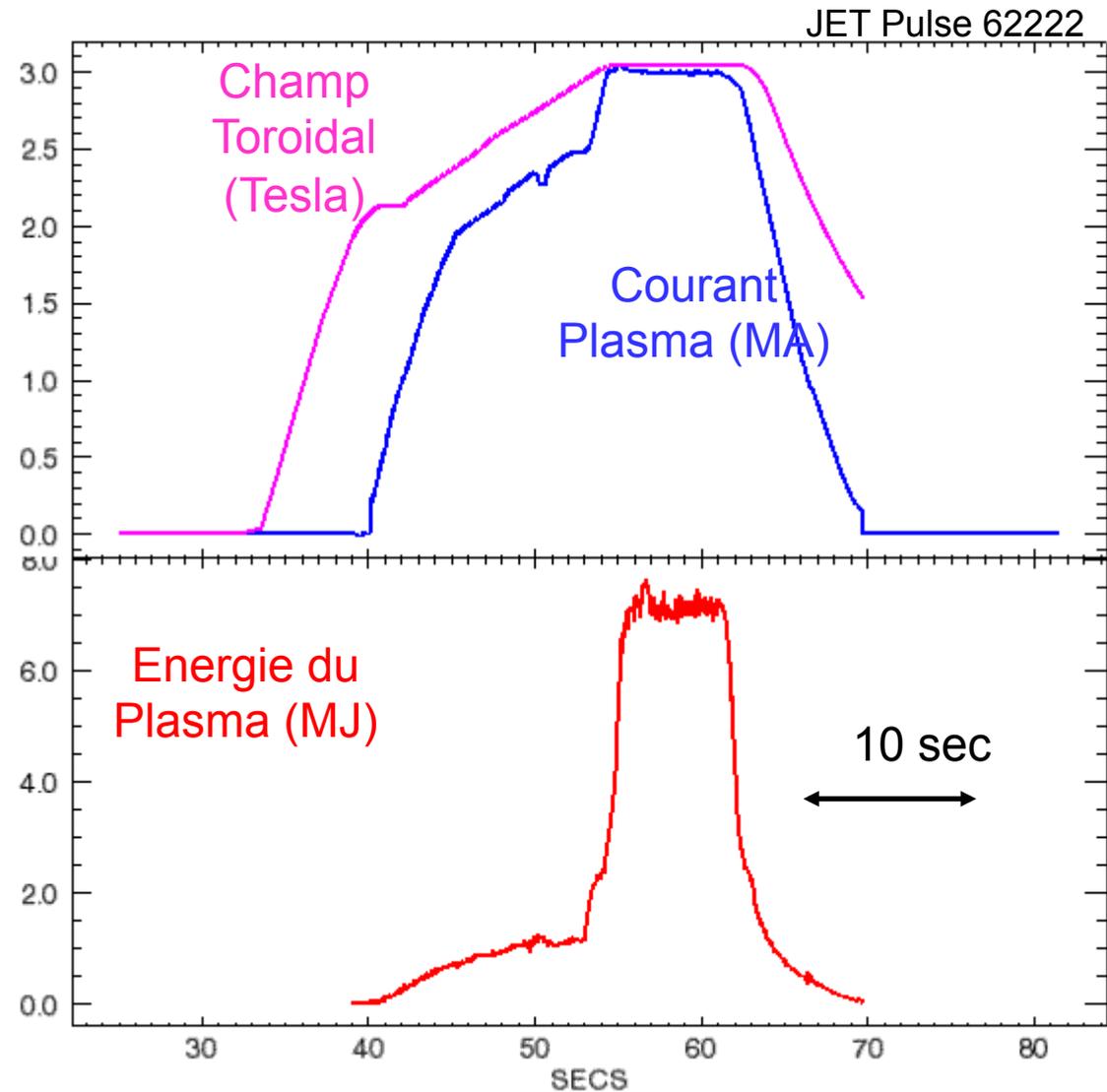
150 millions de degrés pendant une minute



Aussi: Tore Supra (France): 6min30s, LHD (Japon): 30min

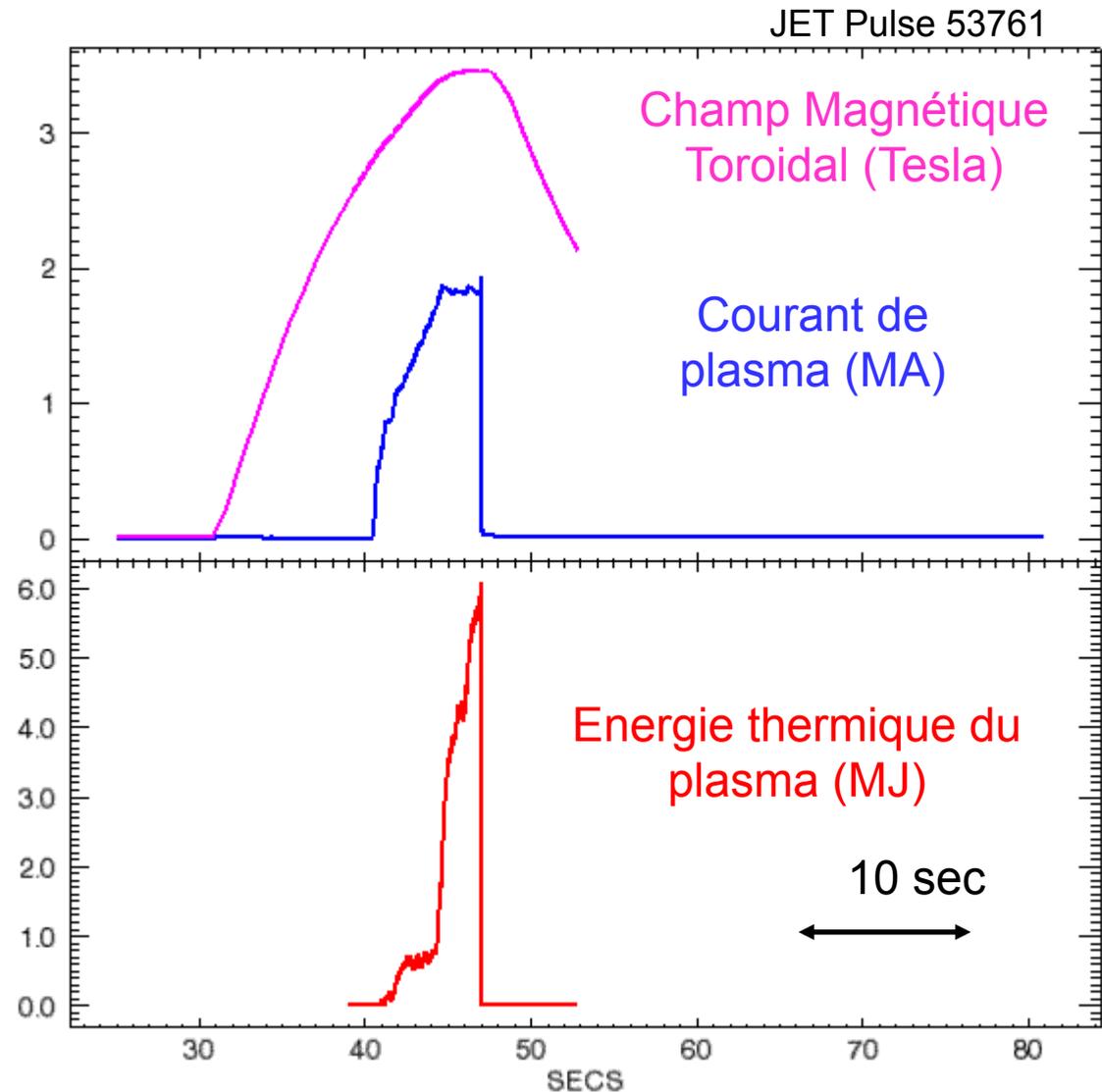
Une décharge de tokamak normale

- Augmenter le champ magnétique toroidal
- Induire un courant de plasma
- Chauffer le plasma
- "Eteindre" sur plusieurs secondes



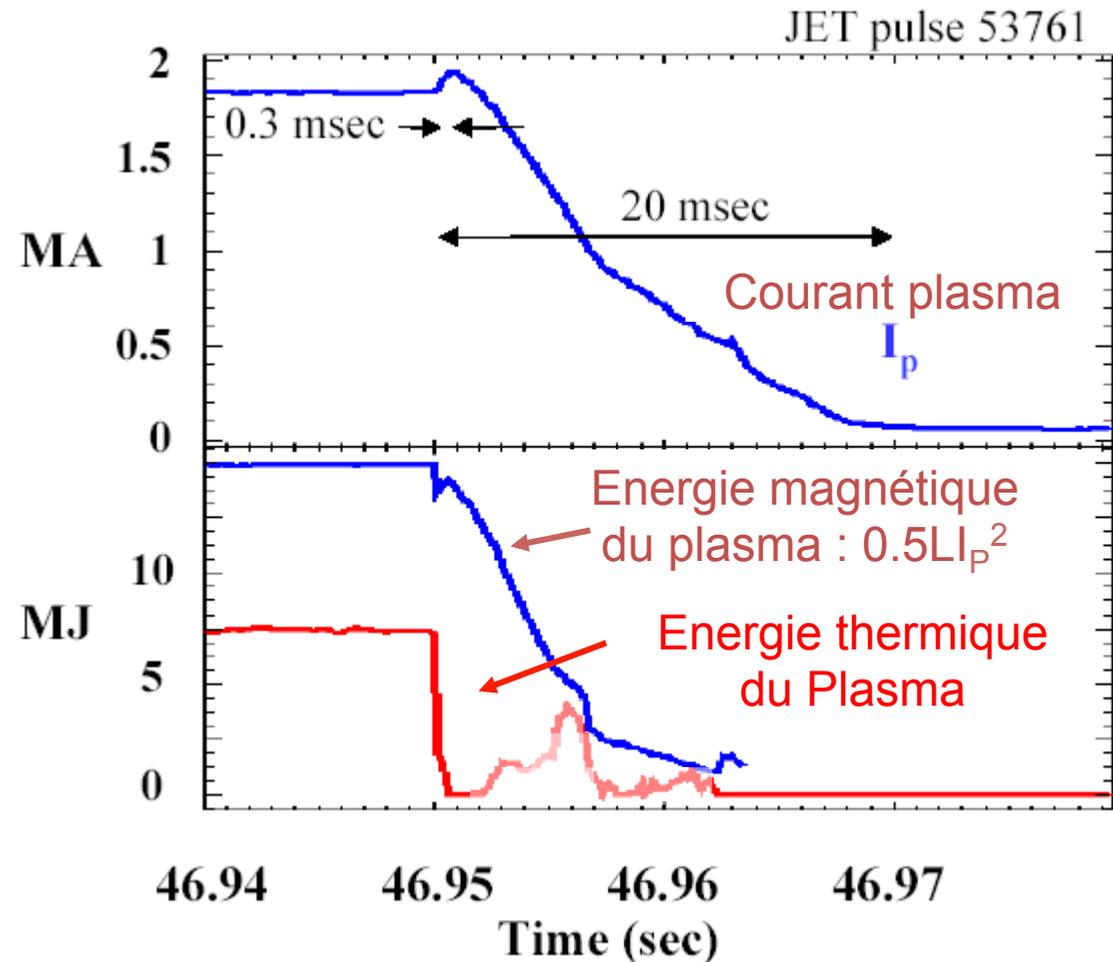
Qu'est-ce qu'une disruption ?

- Effondrement rapide de l'énergie thermique du plasma
- ..et du courant de plasma
- Instabilités MHD détruisent la structure magnétique du plasma

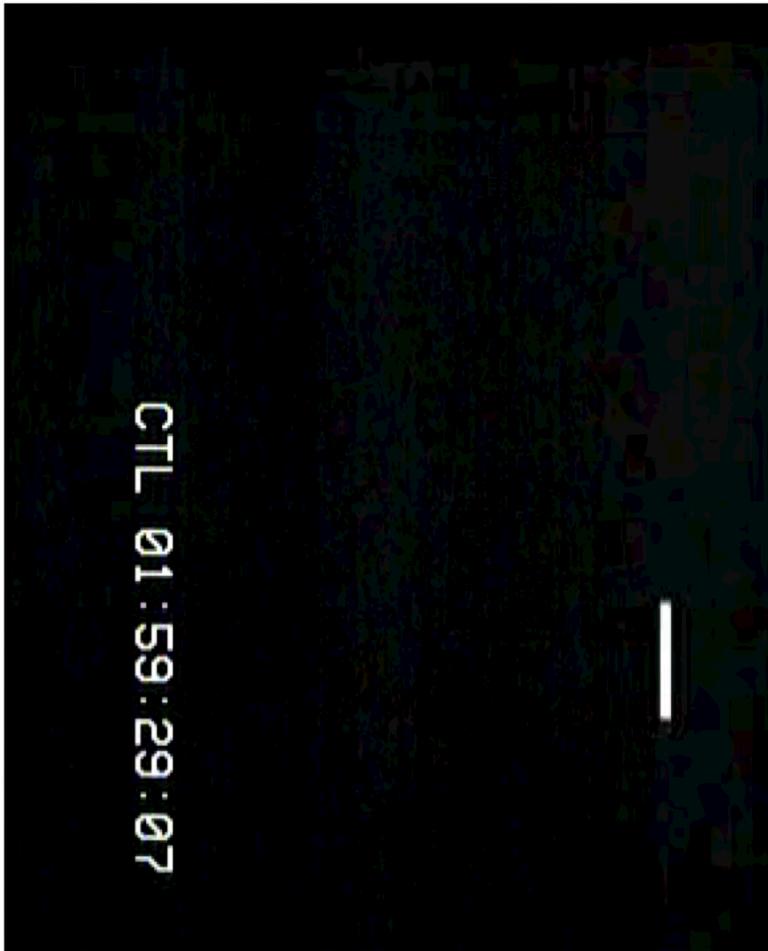


Une disruption en détail

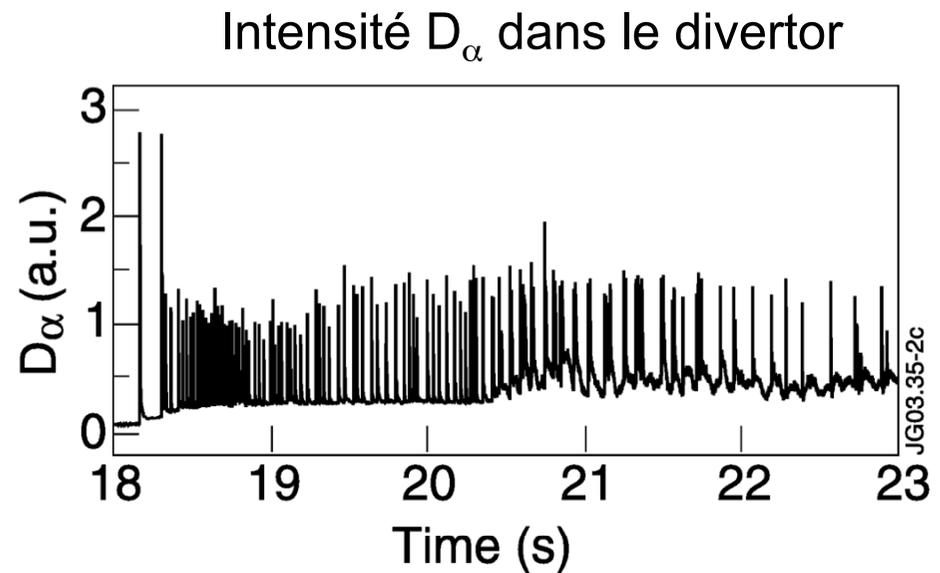
- Sans bon confinement le plasma se refroidit rapidement
- Un plasma froid est très résistif et induit une diminution rapide du courant de plasma



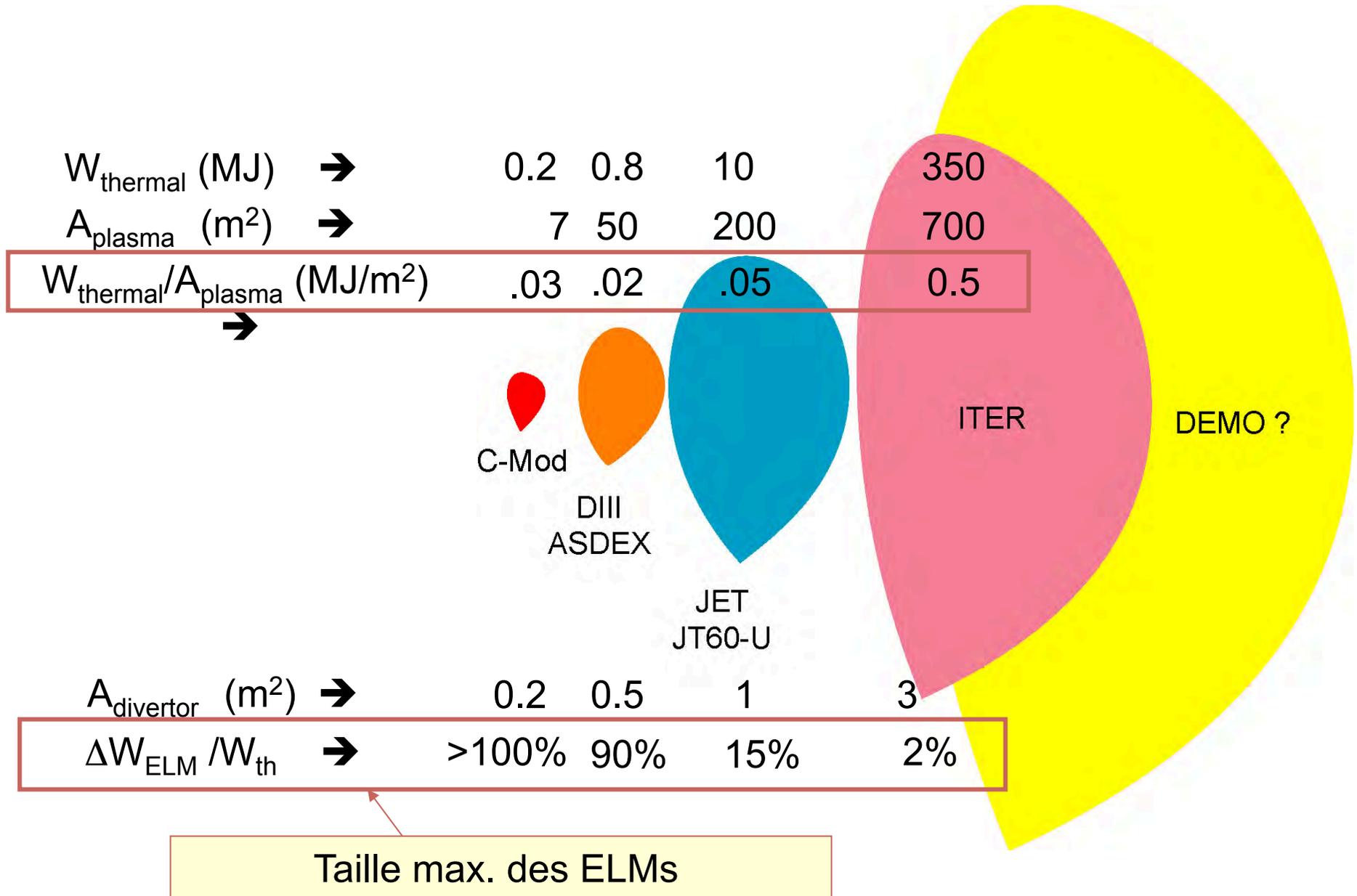
Edge Localized Modes (ELMs)



- Oscillations périodiques observées dans le bord du plasma
- Influence l'érosion chimique et physique de la première paroi



Extrapolation de la taille des disruptions et ELMs vers ITER



Le contrôle de la puissance arrivant à la paroi est essentiel dans ITER



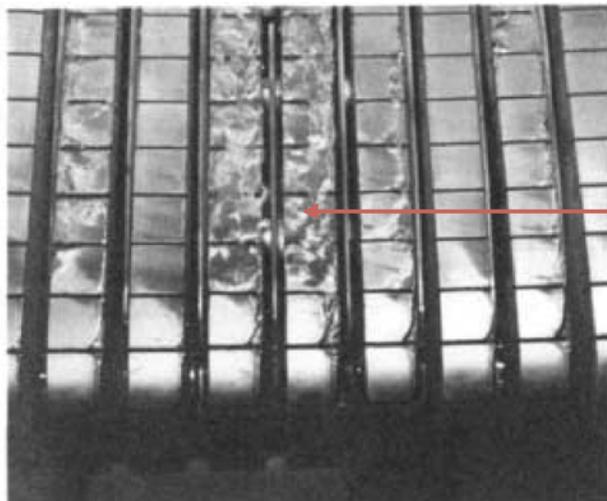
Eléments du divertor en Mo (C-Mod, Etats-Unis)

Toroidal

Destruction de la paroi

Grands ELMs / Disruptions

Fusion local de la paroi



JET Be Limiter

ITER peut tolérer un grand niveau de fusion partielle de sa chambre en Be

Loarte



Judith facility
e-beam 7MJ/m² (4.3ms)

Emission de particules

Koza C10

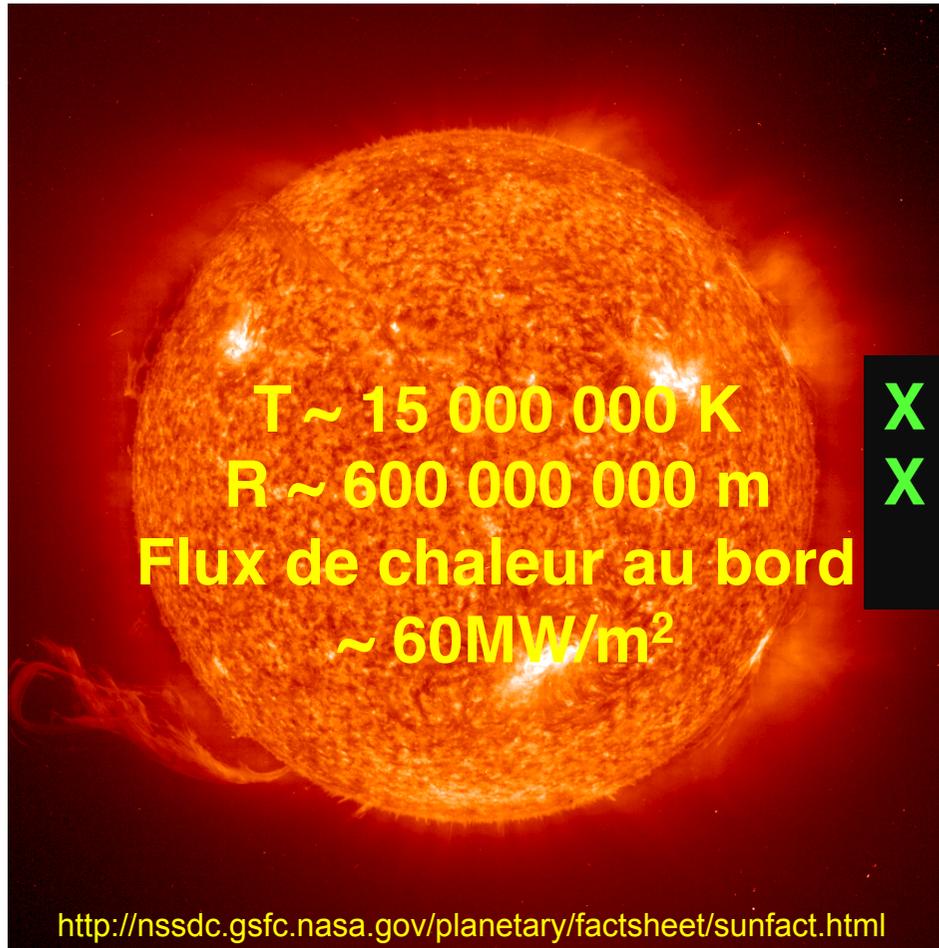
CFC_NB31



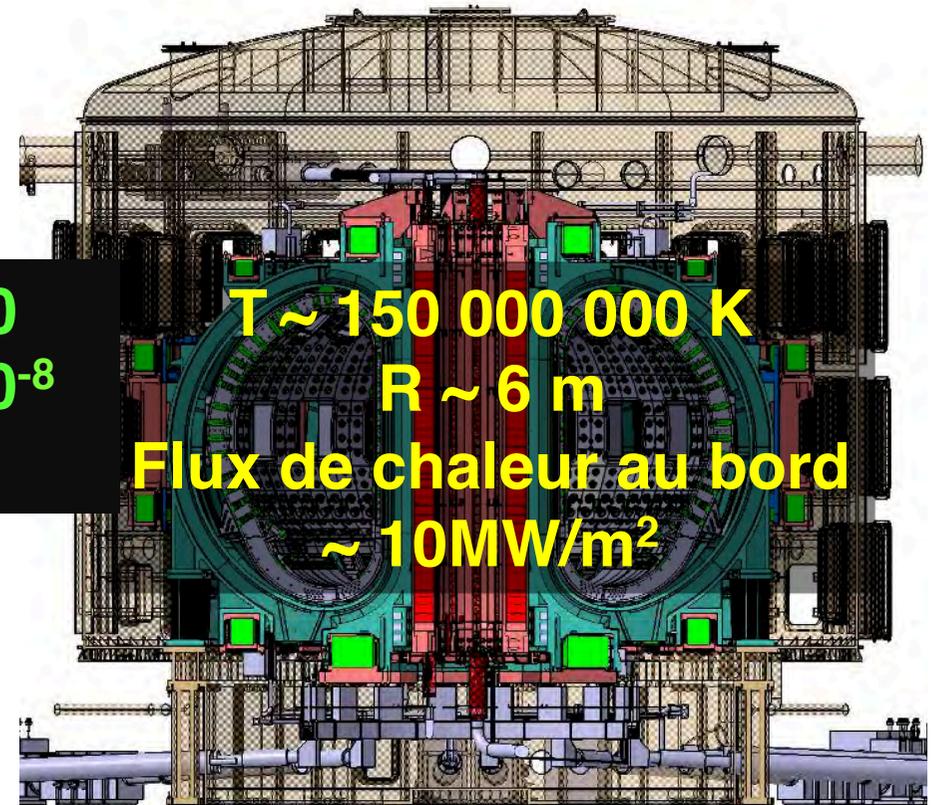
0.1mm

Fissures

Le défi de la fusion: un véritable mini-soleil sur terre



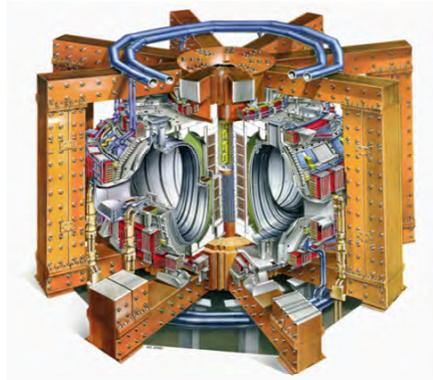
$\times 10$
 $\times 10^{-8}$
 \approx



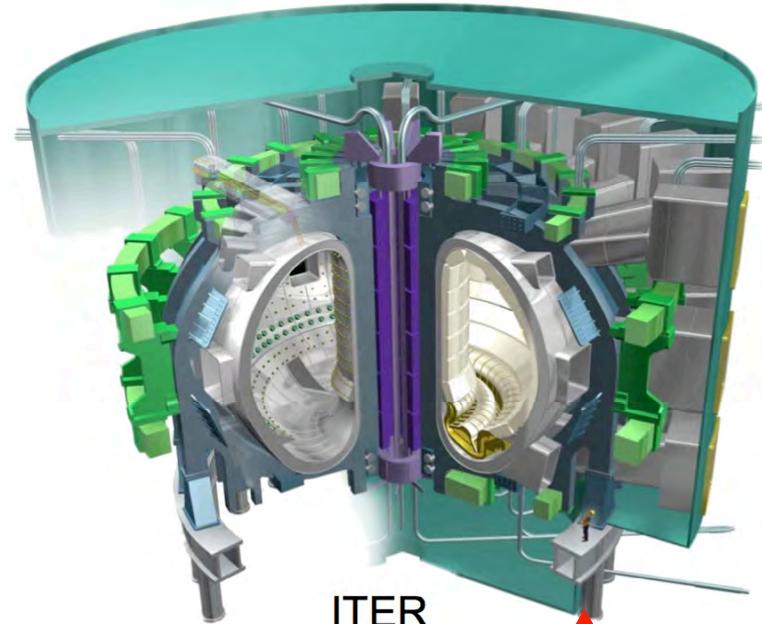
Tokamaks



ASDEX
Upgrade
Garching (D)

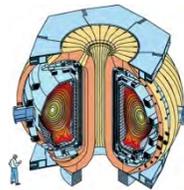


JET
Culham (GB)



ITER
Cadarache (F)

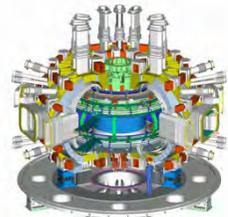
Person



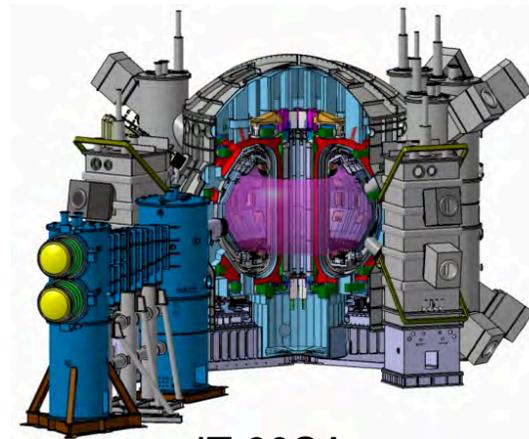
DIII-D
San Diego
(USA)



EAST
Chengdu (C)



KSTAR
Daejon (KR)



JT-60SA
Naka (JA)

Après JET

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)



ITER

En construction à Cadarache

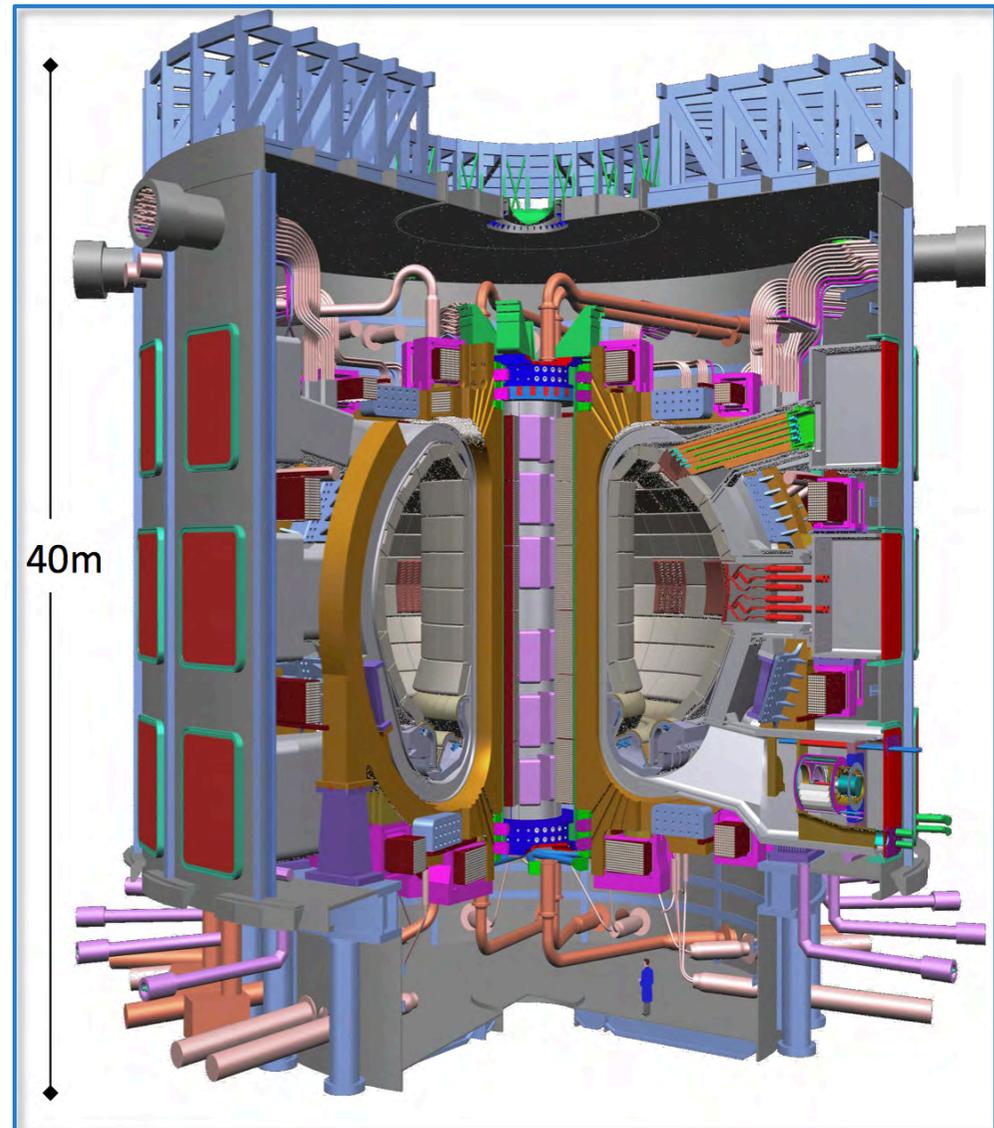
Petit rayon: 6.2m

Grand rayon: 2.0m

Durée de la décharge: 300s

Puissance de fusion: 500MW

Amplification de puissance: > 10

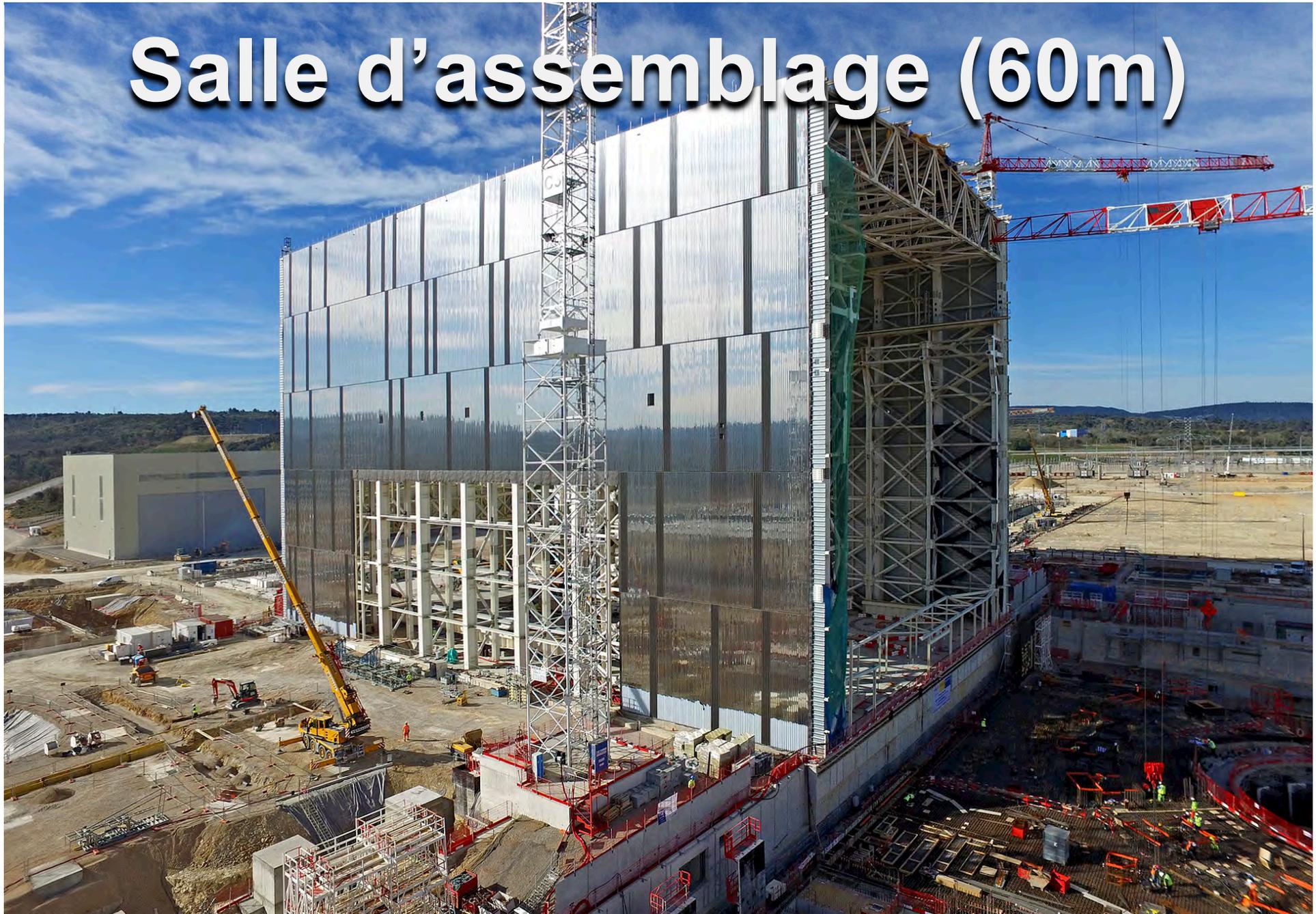


Quelle: ITER 2001

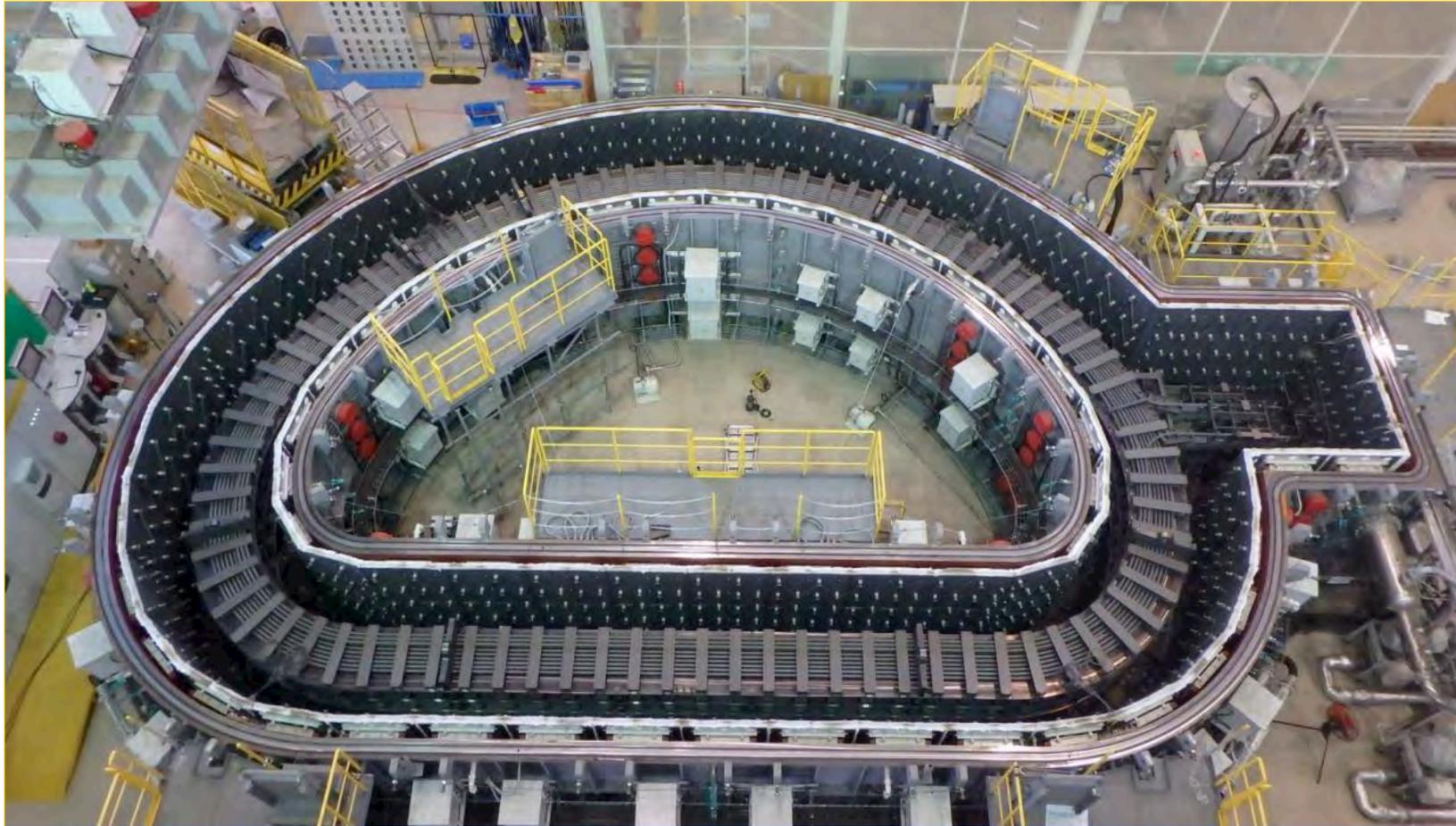
Le site du tokamak



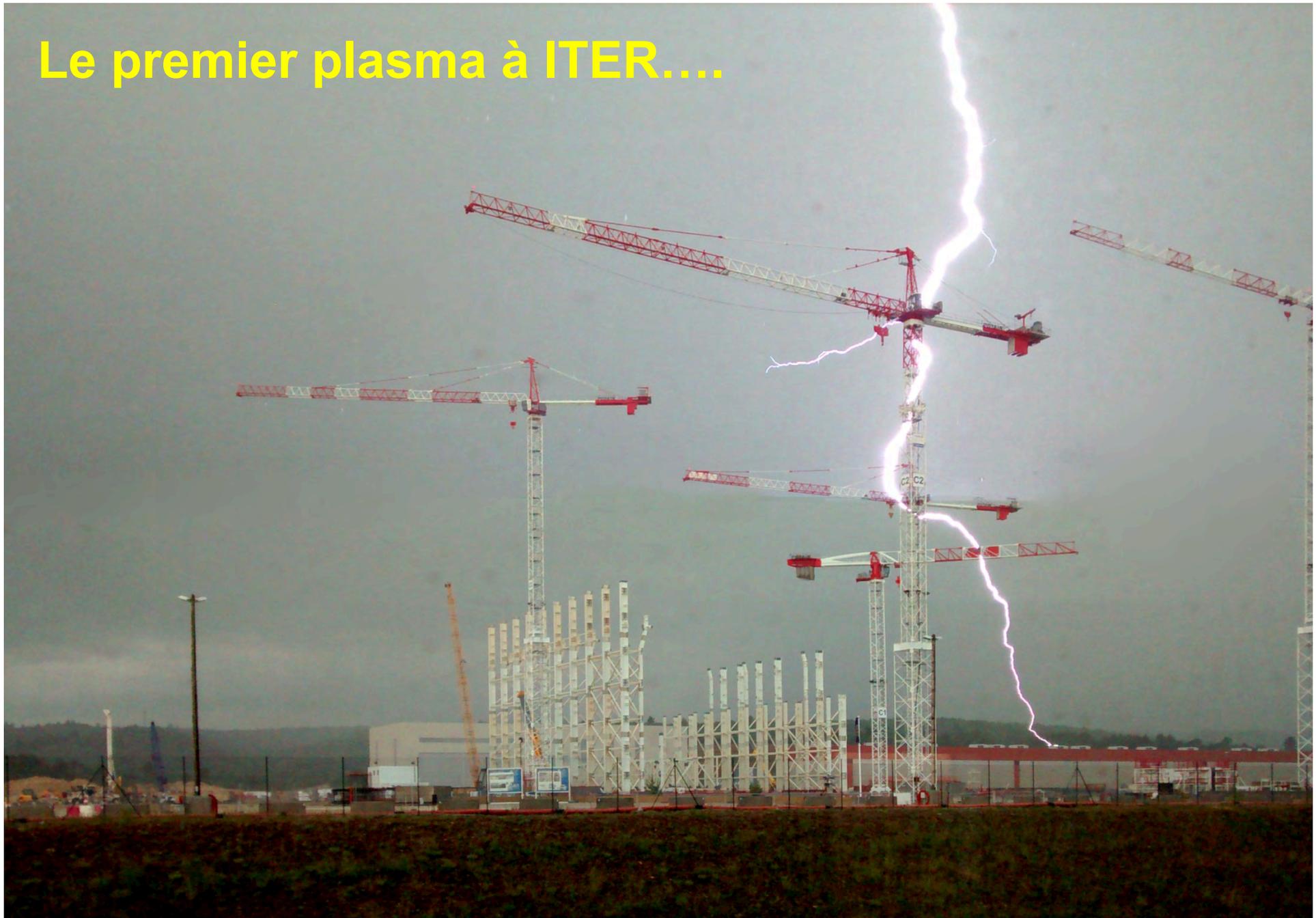
Salle d'assemblage (60m)



Fabrication des bobines toroidales au Japon



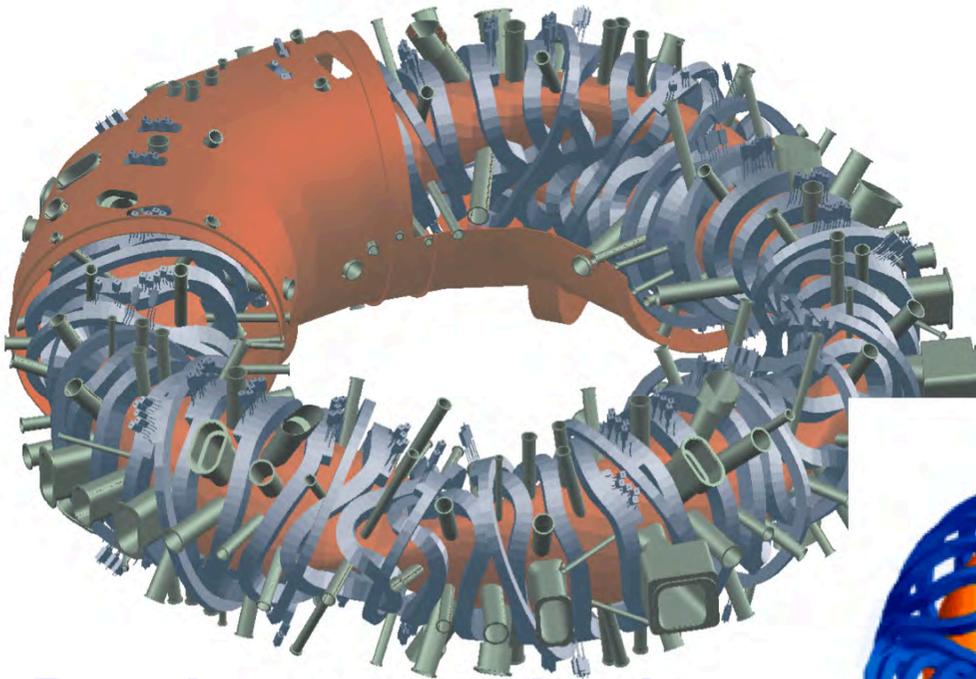
Le premier plasma à ITER....



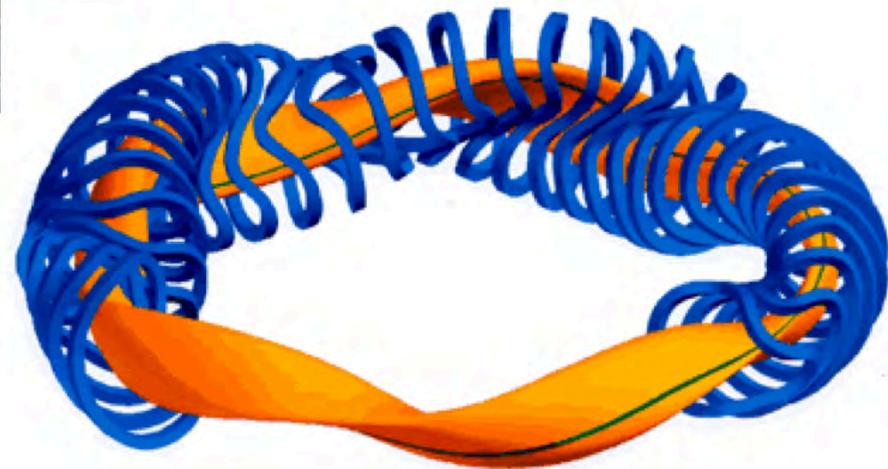
Réaliser une configuration toroidale stable: Option 2

Stellarator

Des bobines complexes en 3D créent directement un champ hélicoidal



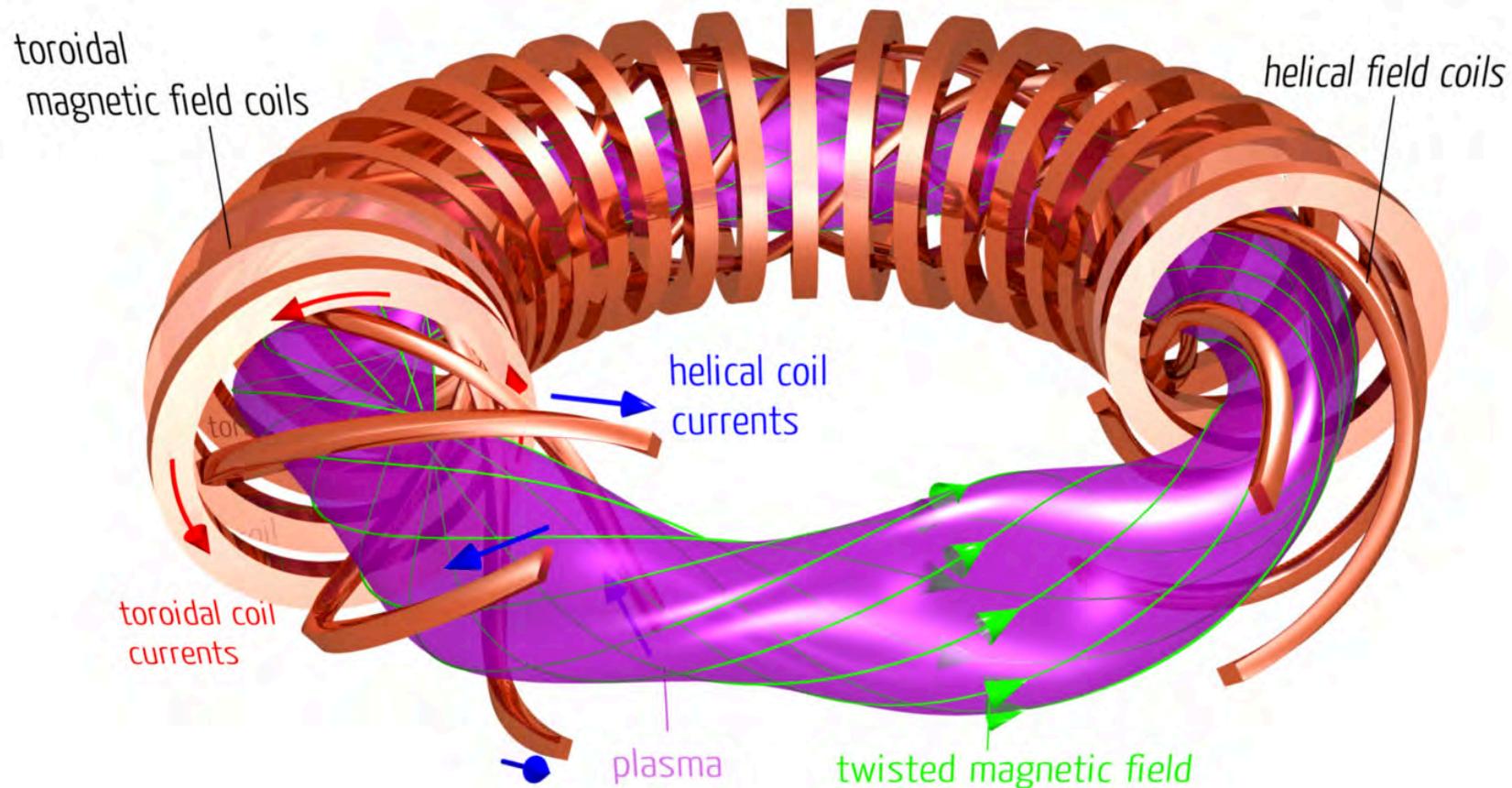
Pas de courant de plasma
⇒ pas de transformateur
⇒ **opération continue**



Réaliser une configuration toroidale stable: Option 2

**Stellarator: Conception originale en 1951
(Lyman Spitzer, Princeton University, Etats-Unis)**

**Stella = Etoile
„la machine qui réalise l'étoile sur terre“**



Wendelstein 7-X

Grand rayon: 5.5 m

Petit rayon (moyenne): 0.53 m

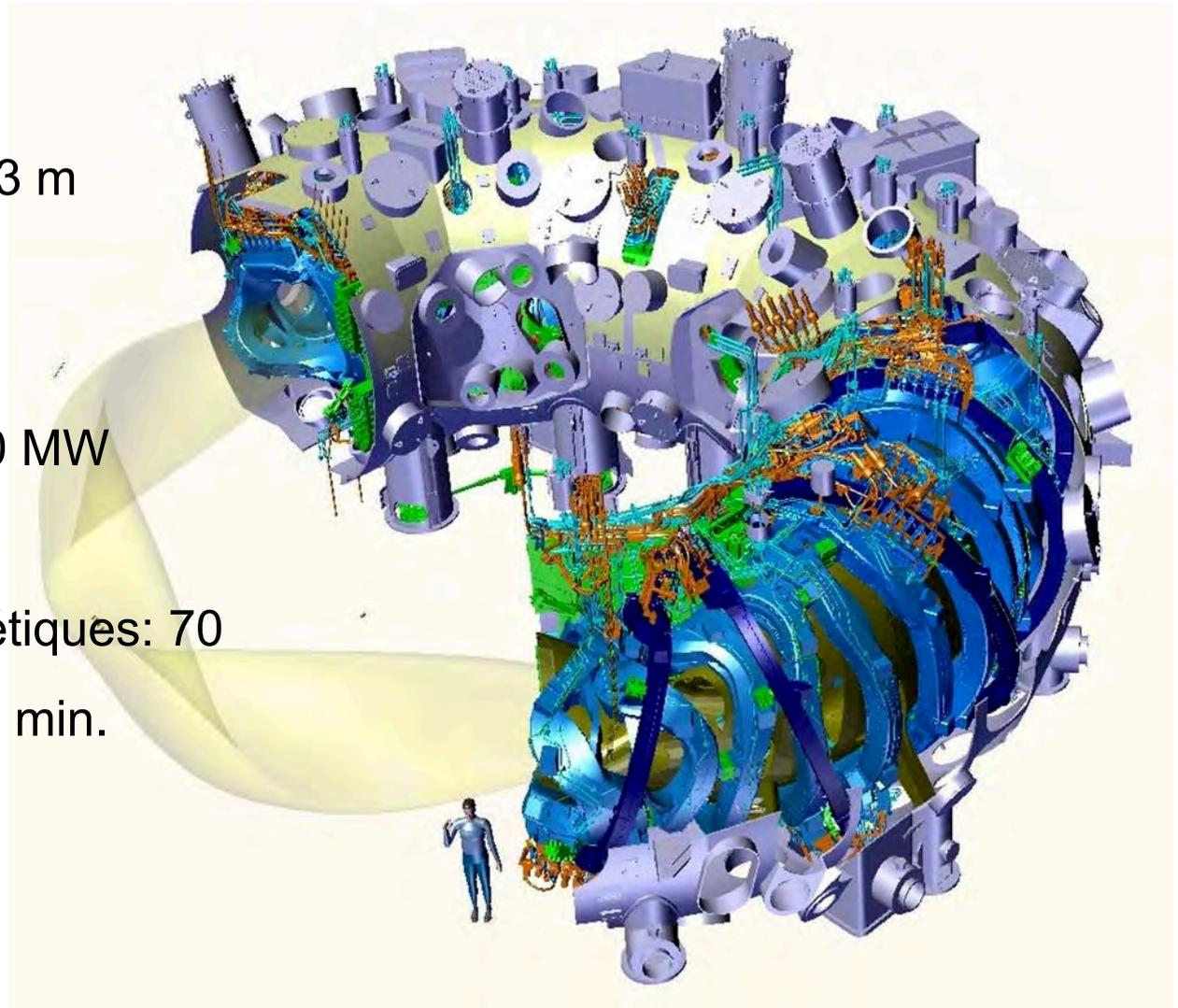
Volume de plasma: 30 m³

Champ toroidale: 3 T

Puissance de chauffage: 10 MW

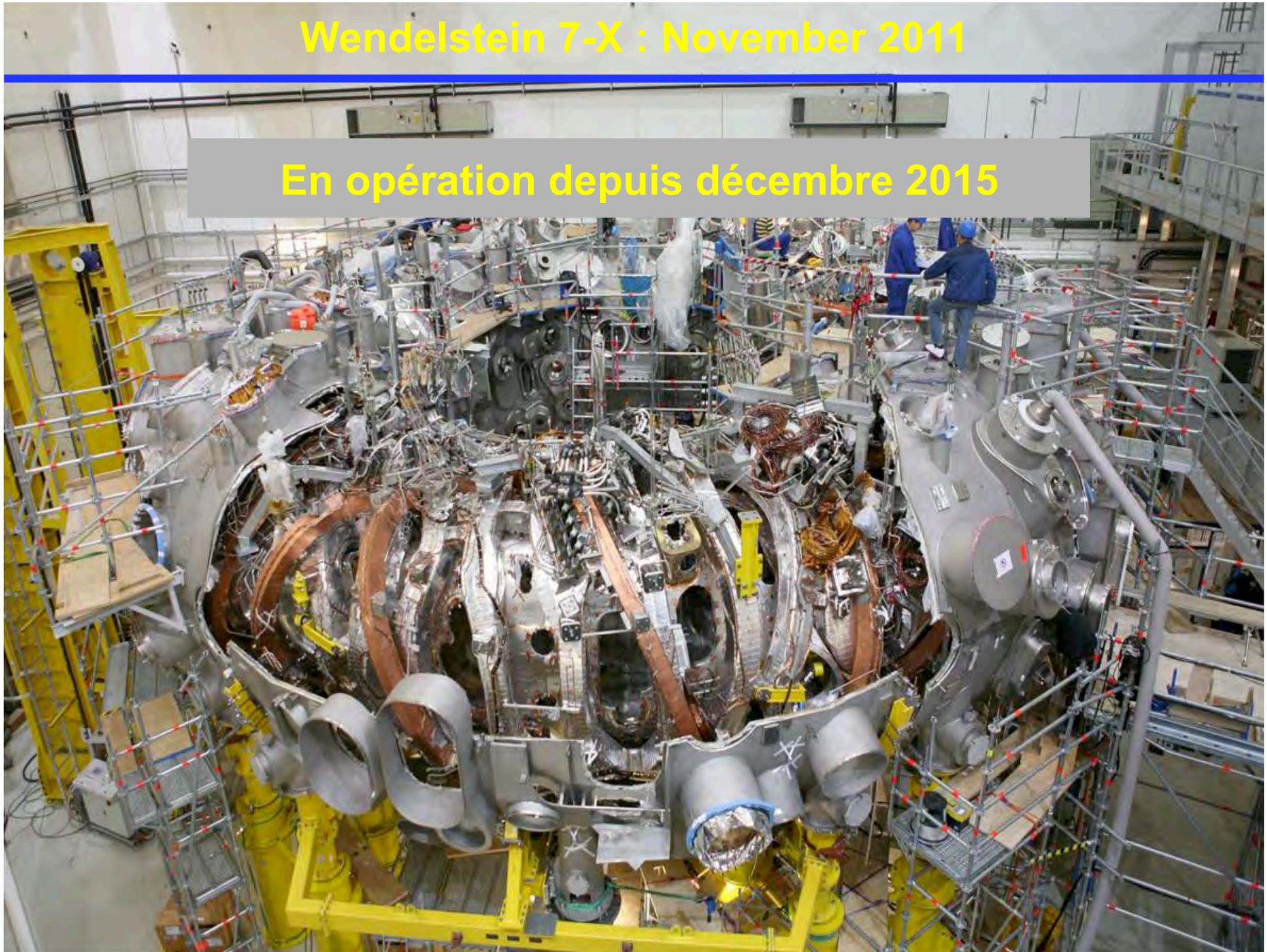
Nombre de bobines magnétiques: 70

Durée de la décharge: 30 min.

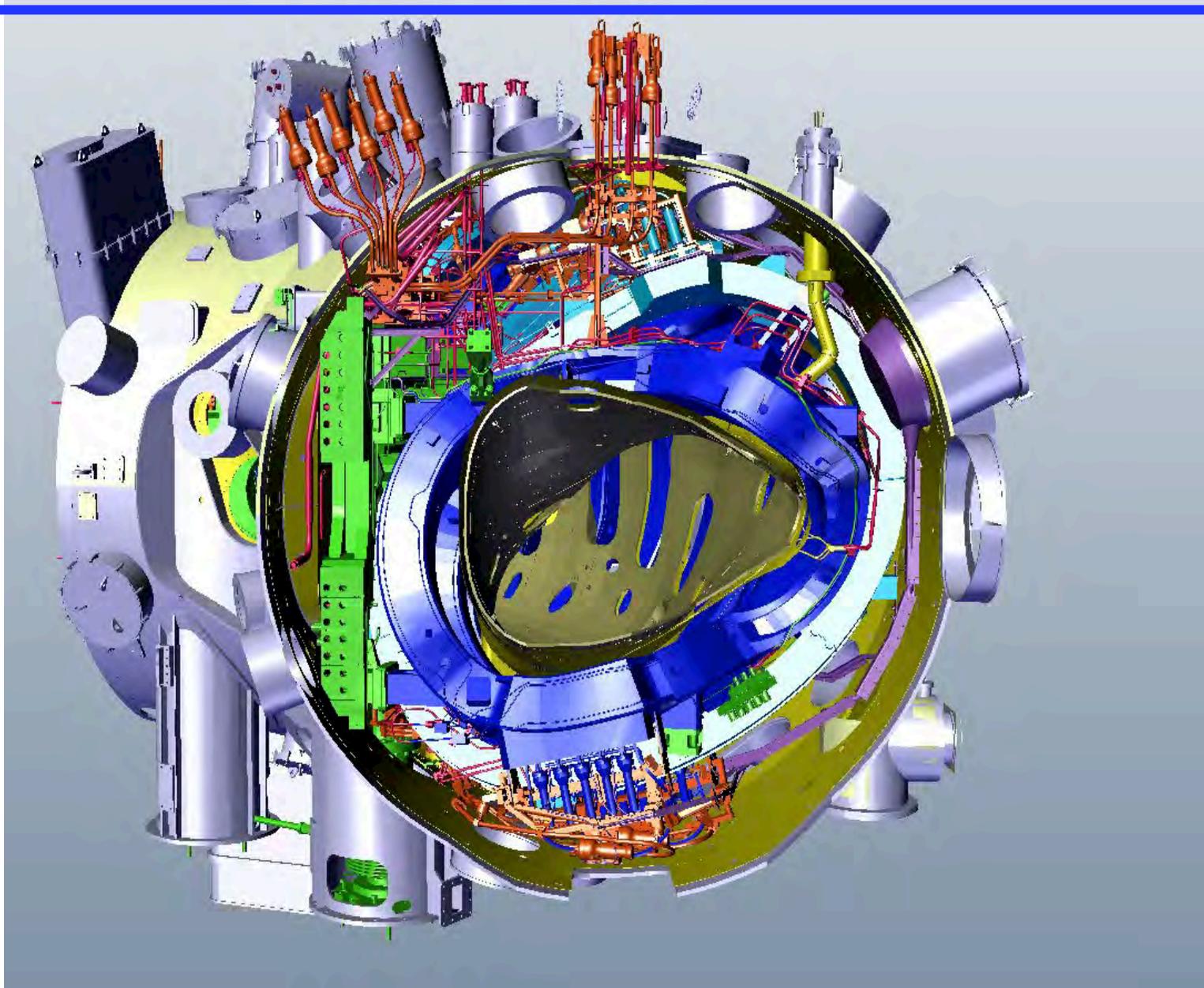


Wendelstein 7-X : November 2011

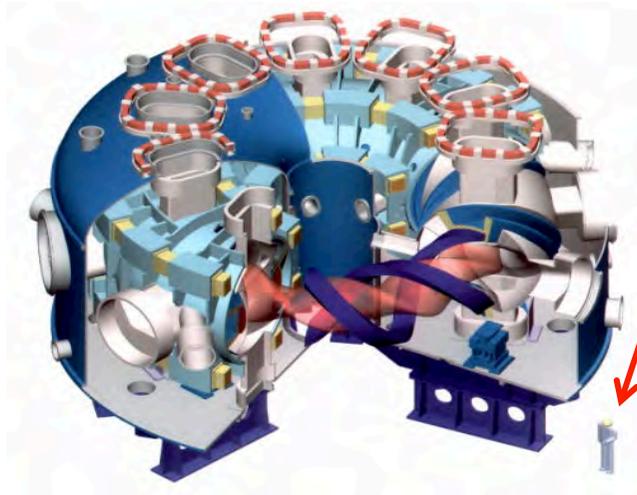
En opération depuis décembre 2015



Wendelstein 7-X : le plus grand Stellarator du monde



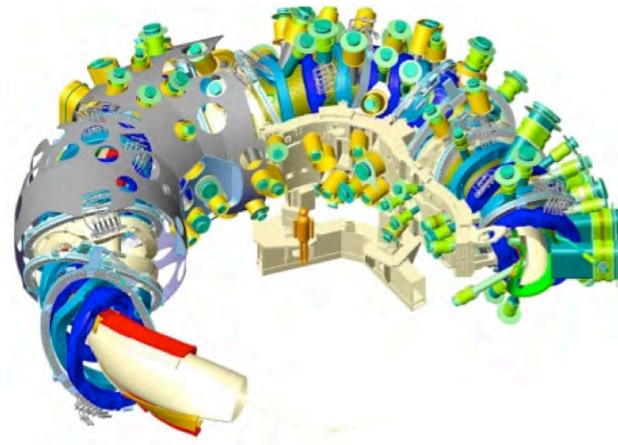
Stellarators dans le monde



Personne



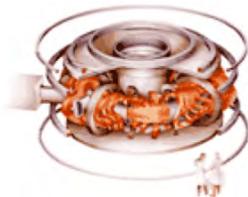
LHD
Toki (JA)



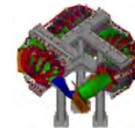
Wendelstein 7-X
Greifswald (D)



TJ-II Madrid (E)



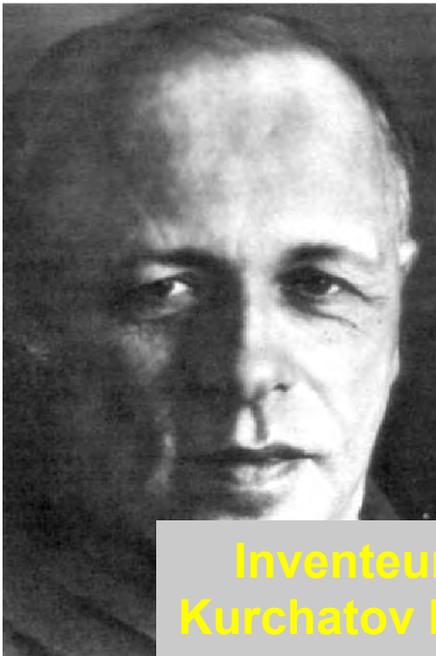
Wendelstein 7-AS
Garching (D)



HSX
Madison (USA)

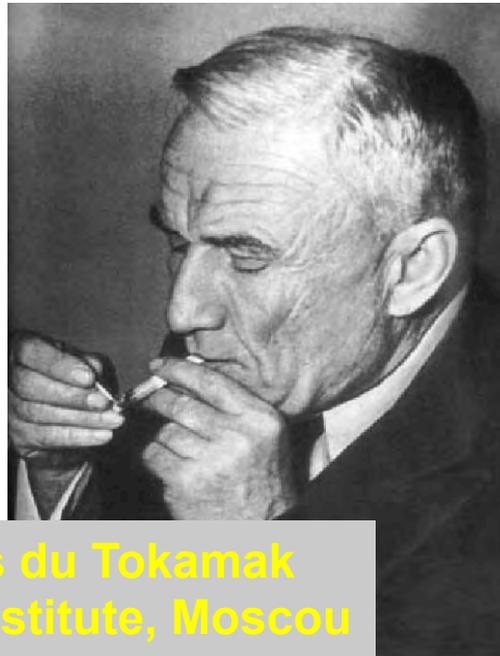
Confiner un plasma de 100 millions de degrés

- Gain d'énergie si : $nT\tau_E \sim 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s} \sim 1 \text{ bar} \cdot \text{s}$
- n (densité) = $10^{20} \text{ particules/m}^3$ → facile!
- T (température) $\geq 10 \text{ keV}$ → réalisé
- τ_E (temps de confinement) $\geq 4\text{s}$ → difficile, taille machine



Inventeurs du Tokamak
Kurchatov Institute, Moscou

A.D. Sakharov



I.E. Tamm



Inventeur du Stellarator
Princeton University, USA

Lyman Spitzer

Principi

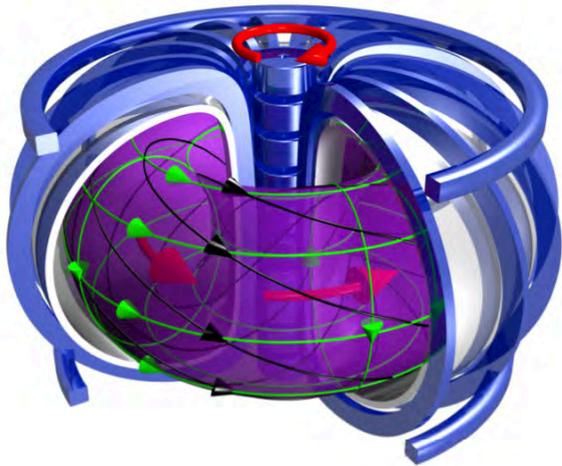
fusion research

VUB, 16 september 2016

Comparaison: Stellarator / Tokamak

Tokamak (symétrique)

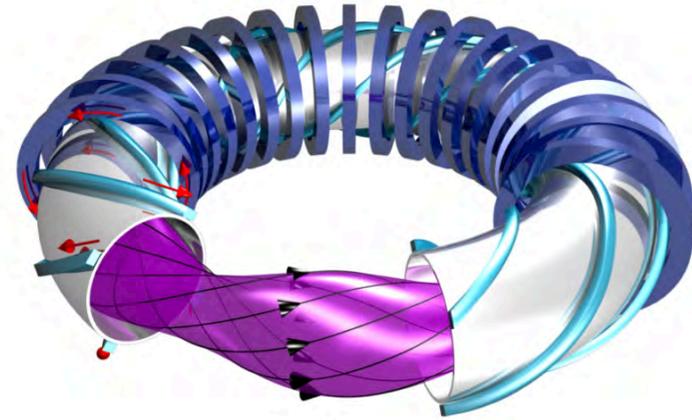
Courant de plasma



- + Bobines simples
- Durée de décharge limitée
- Instabilités dues au courant de plasma
- + Performances nettement meilleures
- + Plasmas D-T
- + 16 MW (JET) envisagé 500MW (ITER)

Stellarator (3D)

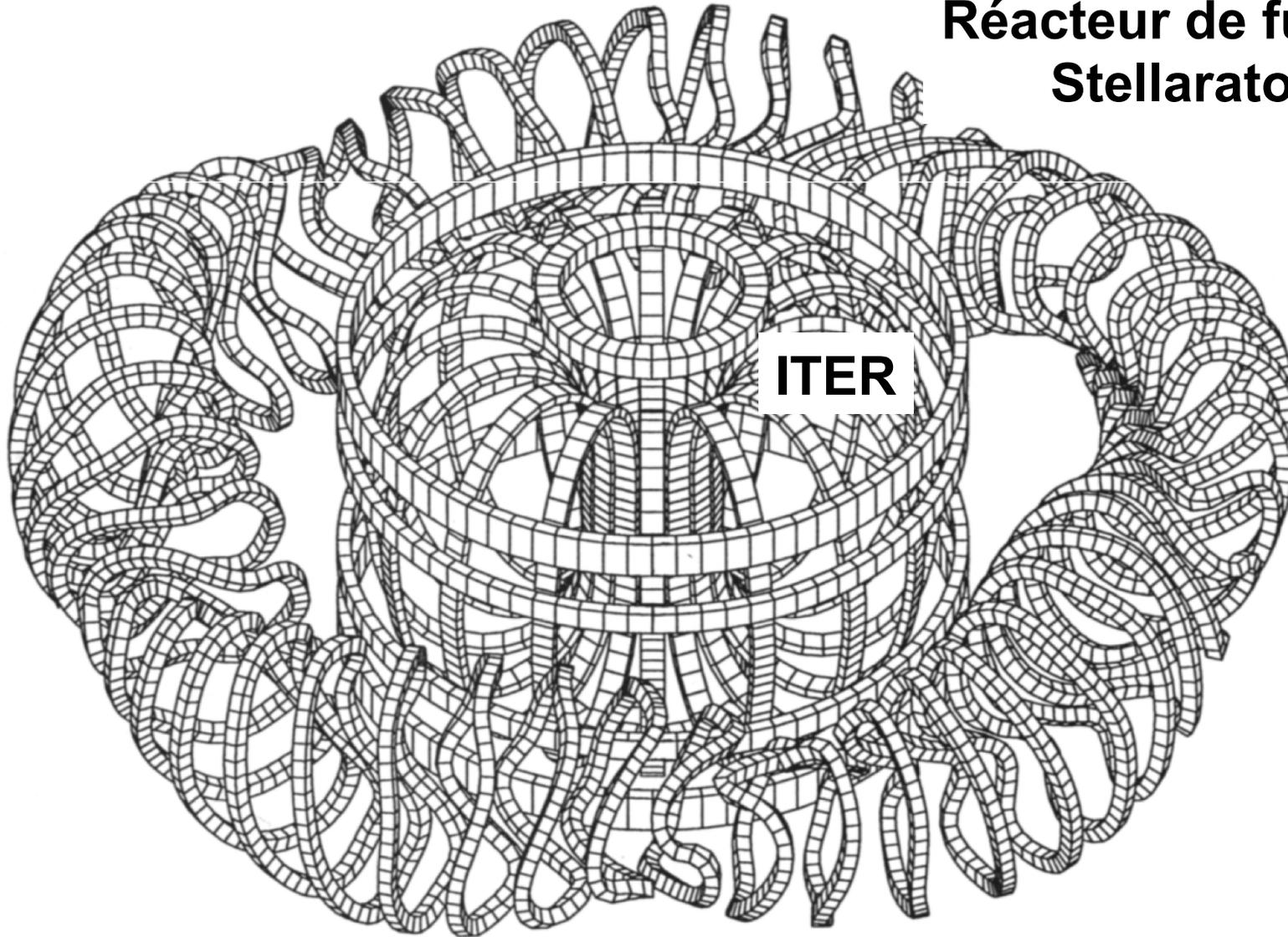
Absence de courant de plasma



- Bobines complexes (3D)
- + Opération en continu
- + Plasma stable
- 1 ½ génération après les tokamaks
- Plasmas H, envisagé D
- Pas de puissance de fusion encore

Comparaison: ITER / Stellarator-reactor

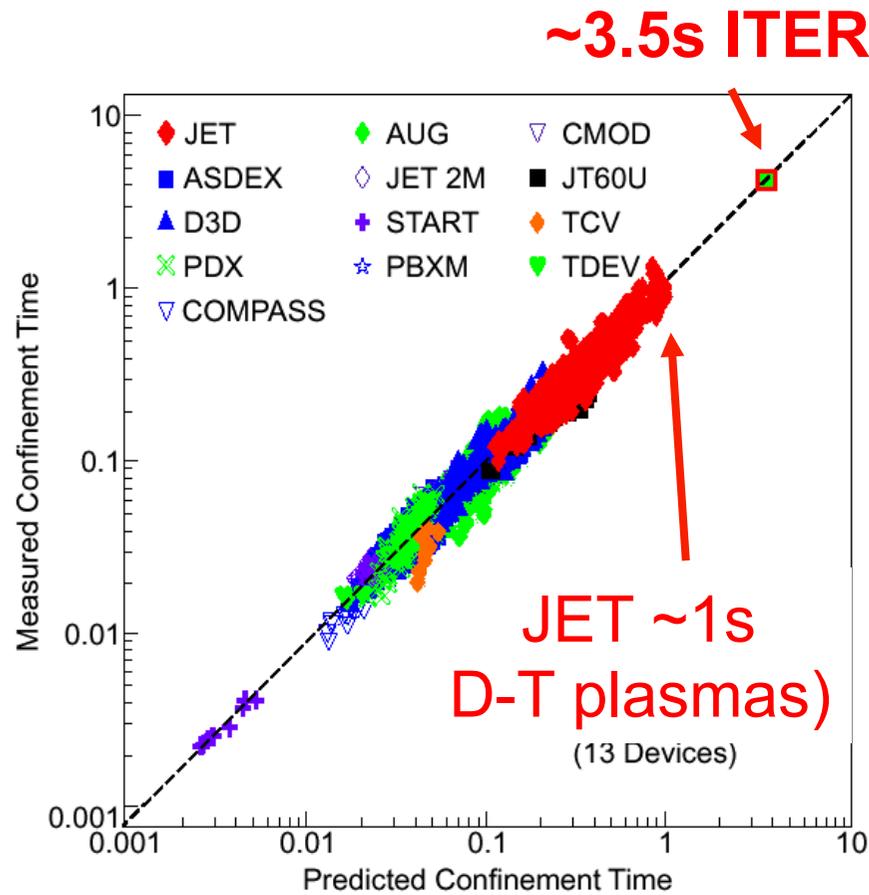
Réacteur de fusion
Stellarator



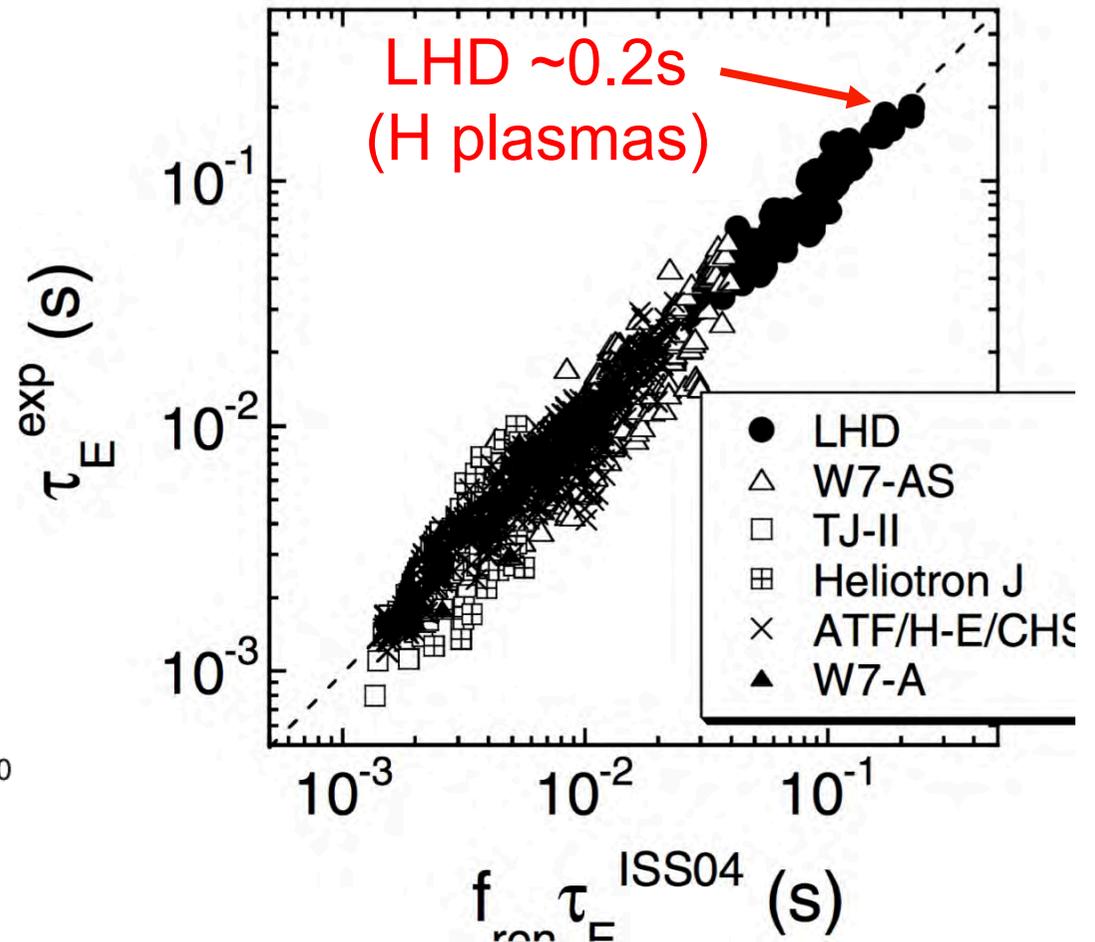
Comparaison: Temps de confinement réalisé

~ 10x plus grand pour les tokamaks

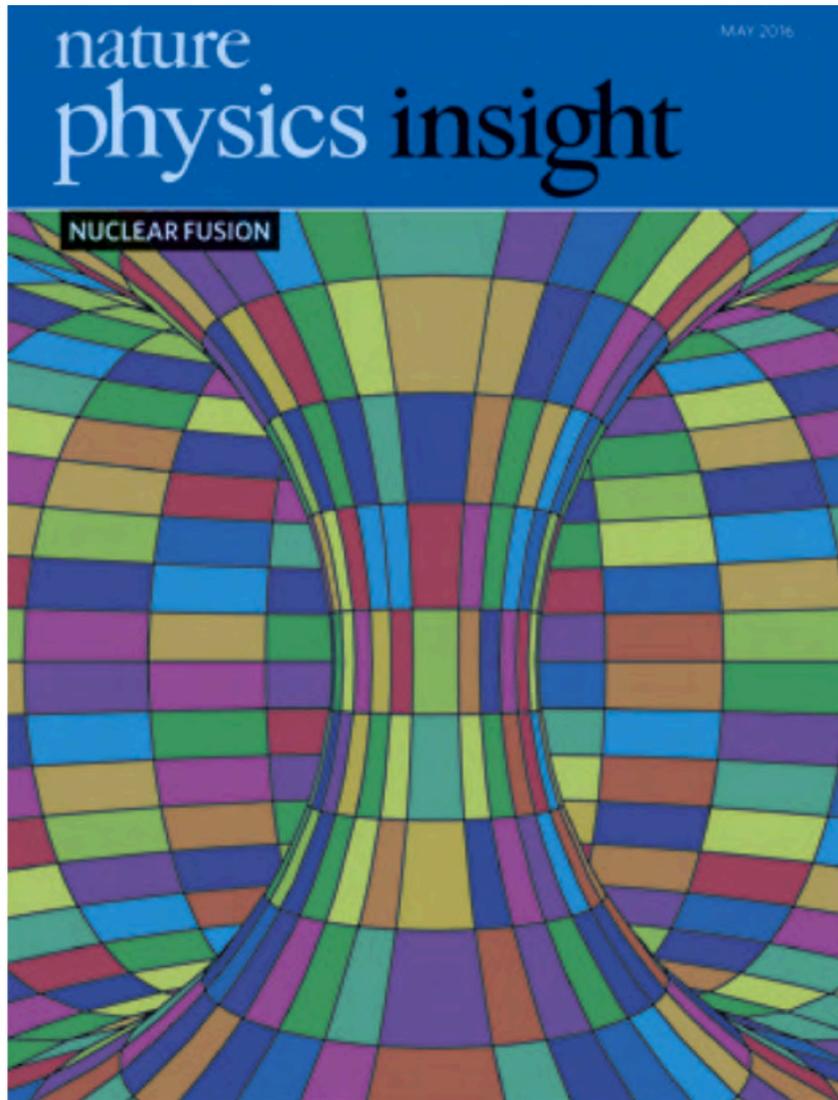
Tokamaks



Stellarators



Pour en savoir plus



Nature Physics,
May 2016

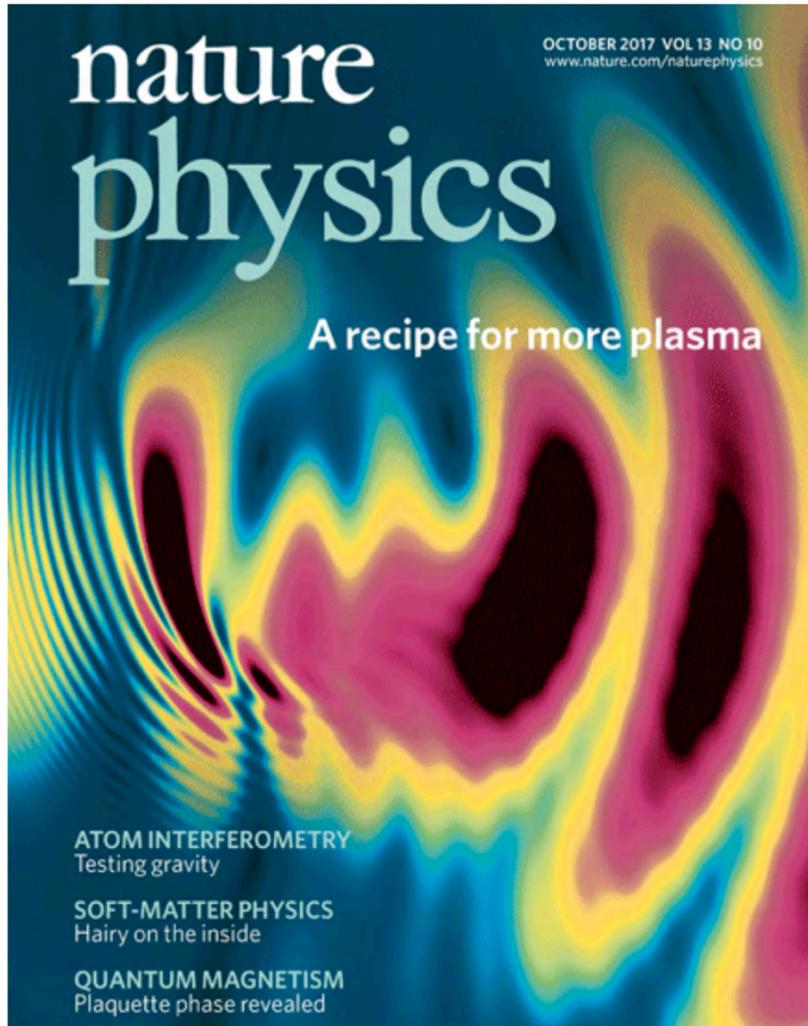
“Insight Section”
Sur la fusion nucléaire

66 pages des
dernières développements dans:

- La fusion magnétique
- La fusion inertielle
- Recherches sur les matériaux
- Simulations avancées

<http://www.nature.com/nphys/journal/v12/n5/index.html>

Le dernier article de notre laboratoire



Nature Physics
Octobre 2017

Apparu aujourd'hui

Nouvelle méthode de chauffage
des machines à confinement
magnétique.

Page de couverture:
La propagation des ondes
électromagnétiques
dans un plasma de fusion

<http://www.nature.com/nphys/journal/v13/n10/covers/index.html>

WATCH OUT! MY
TOKAMAK IS PULSED.
-BANG! BANG!

WELL, MY STELLARATOR
NEVER STOPS:
-you WATCH OUT!



Keoll -