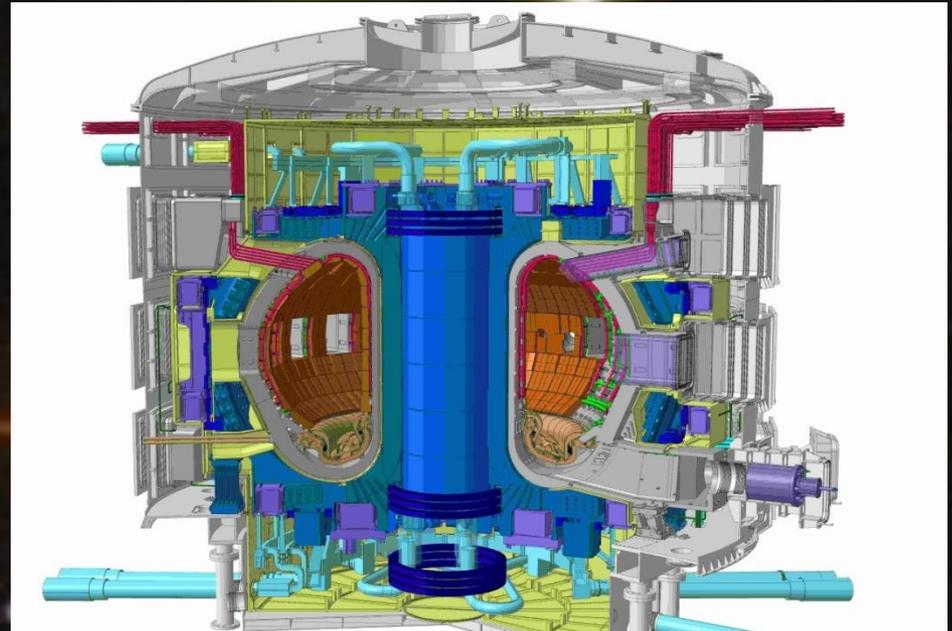


ITER

Recherches et perspectives



46 %



9 %



9 %



9 %



9 %



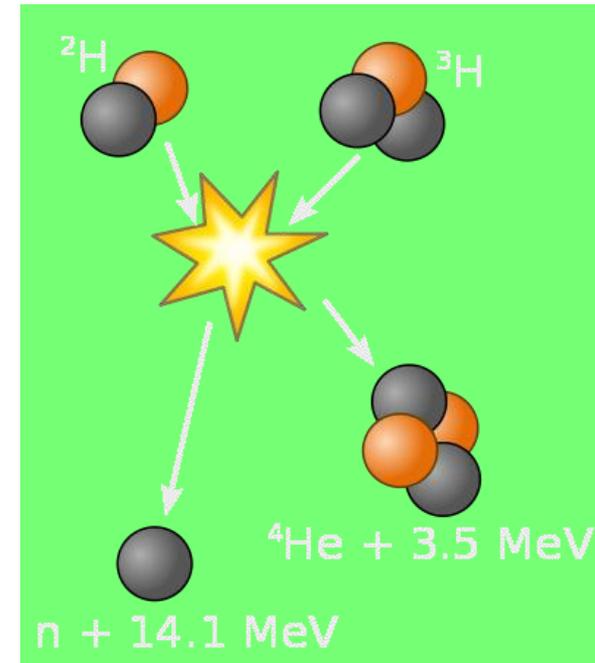
9 %



Enjeux d'ITER

*Démontrer la faisabilité et la sûreté de l'énergie de fusion
énergie sans effet de serre et sans accident nucléaire grave possible*

- Dimension scientifique et technique
 - Valider les principes physiques en vraie grandeur (500MW)
 - Physique des plasmas: systèmes complexes en interaction collective
 - Valider des technologies de la fusion
 - Supra conducteurs, Electrotechniques de puissance
 - Télémanipulation, contrôle et mesures, etc.
- Dimension sociétale
 - Contribution majeure à l'énergie
 - Accès pour tous à l'énergie → paix mondiale
 - Retombées
 - Économiques en Europe et en France
 - Domaine de la connaissance
 - **Spin off scientifiques et techniques**
 - **Formation**
 - Socio-culturel: travailler ensemble à 35 pays!



L'énergie: défi majeur du 21^{ème} siècle

~ 80 % de l'énergie primaire provient des ressources fossiles

Demandes des pays en voie de développement

Réserves fossiles plus ténues

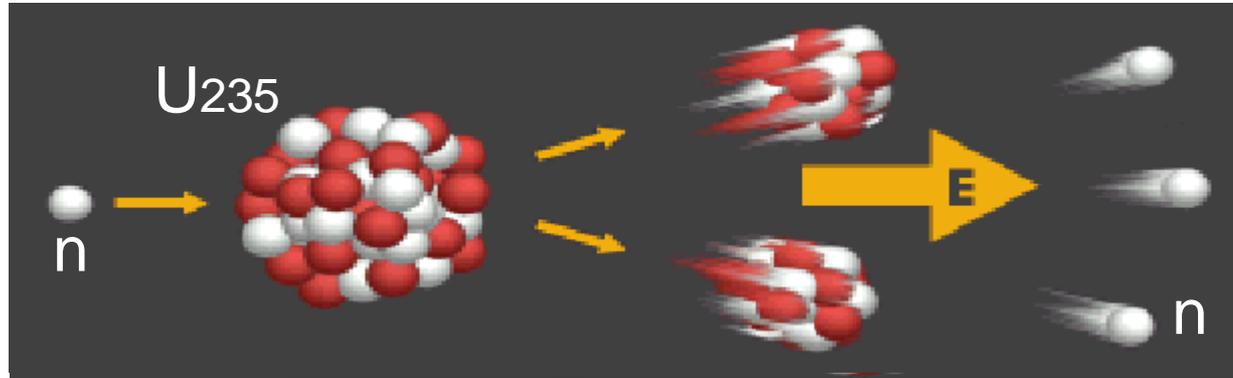
Gaz à effet de serre → impact majeur sur le climat

**Urgence de remplacer les énergies fossiles par
les renouvelables & les énergies nucléaires**

**Impossible pour les renouvelables d'y arriver seuls:
intermittence / stockage**

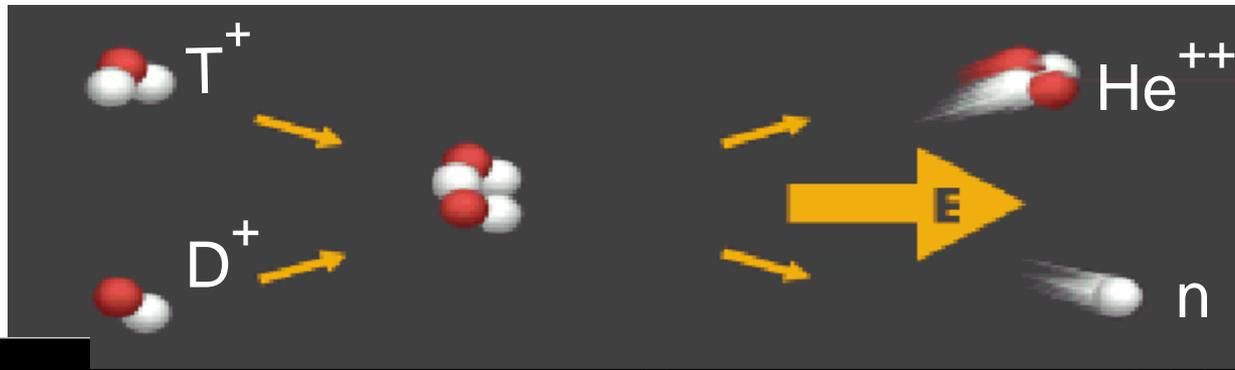
Fission / Fusion

Fission
Combustible:
Uranium
solide



Neutrons
→
réactions
en chaîne

Fusion
Combustible:
hydrogène
gaz



Hélium
maintient la
température
du gaz



$$E = \Delta mc^2$$

Combustible de la fusion: deutérium et tritium

Deutérium: se trouve dans les océans

Tritium: fabriqué in situ à partir du Lithium

→ **Confiner un gaz porté à 100 millions de degrés**

Une énergie très concentrée

**Un gramme de D/T= 8 tonnes de pétrole
ou encore:**

**Pour faire 15 ans de production d'électricité per
capita aux USA (200MW.H), il faut:**

Soit:

70 tonnes de charbon (produit 250 tonnes CO2 !!!!!)

Soit, pour la fusion,:

**le combustible extrait de 45 litres d'eau + le lithium
de l'accumulateur d'un ordinateur portable (pas de
CO2!)**

→ réserve en pratique illimitée!



Hans Bethe
CNO 1938

L'énergie de fusion: source d'énergie du soleil pour 5 milliards d'année
Peut-on la reproduire sur terre?

Ciel étoilé par les réacteurs à fusion

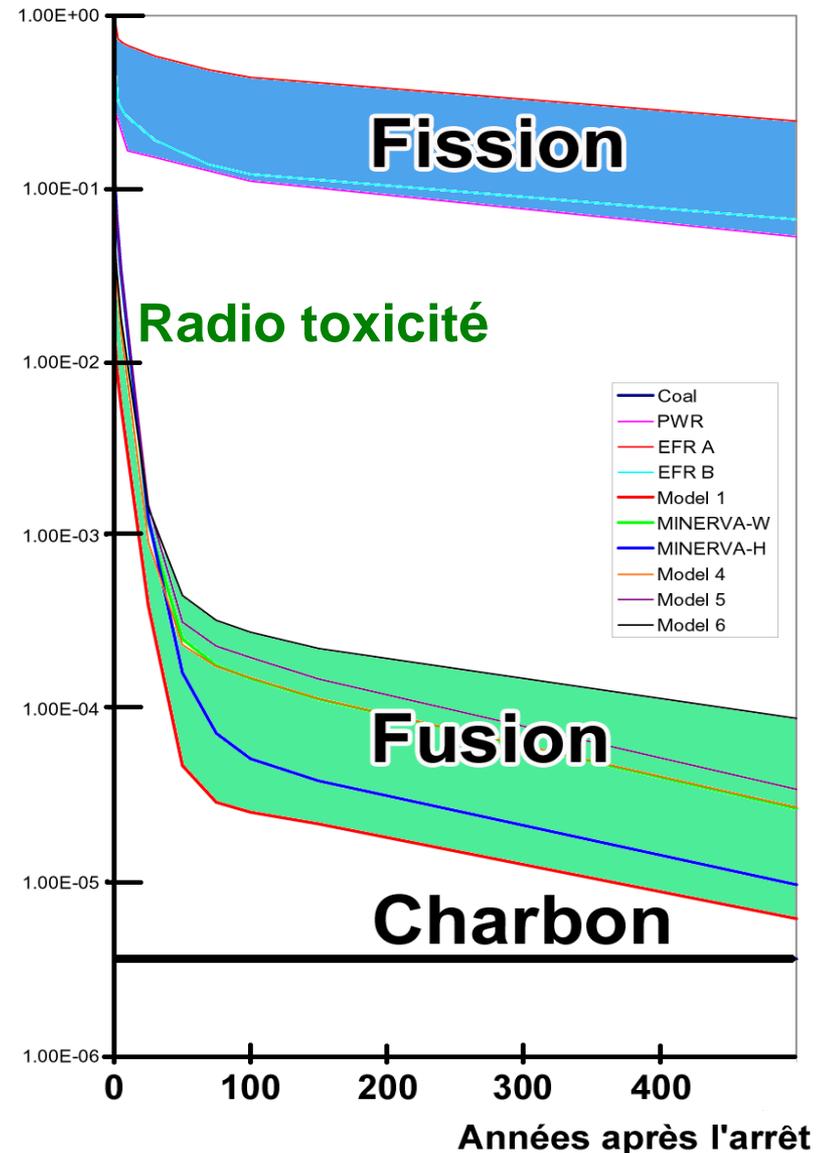


Galaxie d'Andromède 300 milliards de réacteurs à fusion

Photo JJ

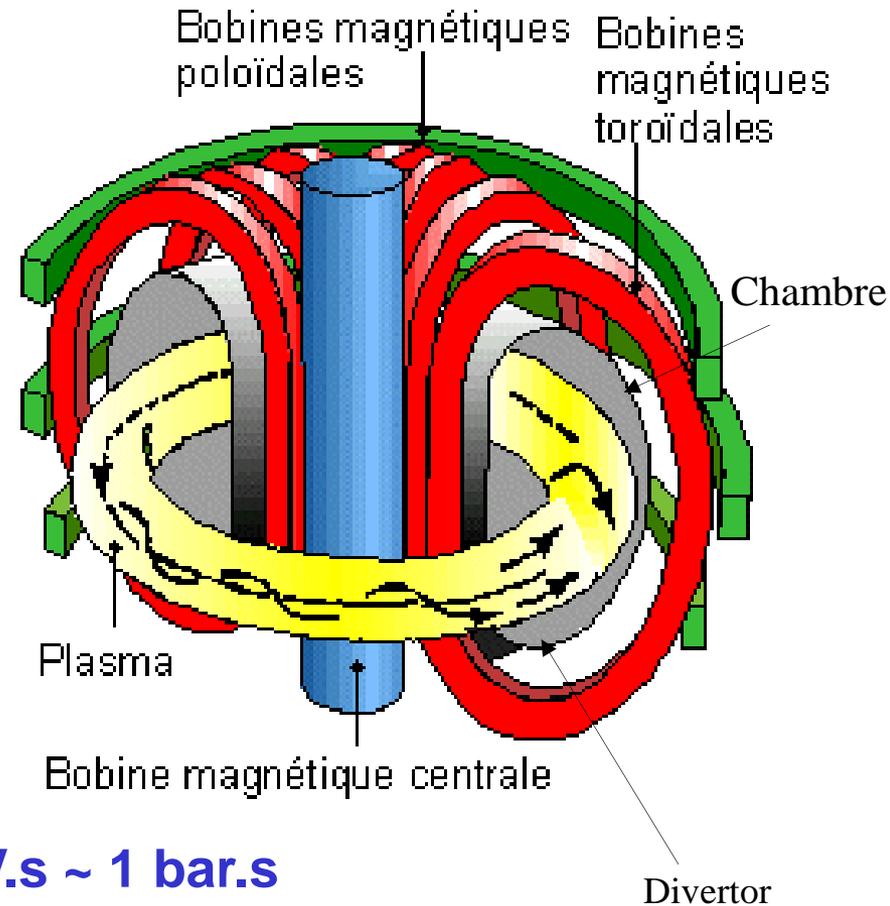
Pourquoi la Fusion ?

- Combustible (D & Li)
 - Abondant, bien distribué sur la planète:
 - Deutérium**: océans; **Tritium**: fabriqué in situ à partir du Lithium
 - Un gramme de D/T= 8 tonnes de pétrole
- Sûreté
 - Pas d’emballement ni combustible utilisé à refroidir
 - Pas de matières fissiles (prolifération)
- Déchets
 - Pas d’accumulation à très long terme (faible radio toxicité après < 100 ans)
- Mais:
 - Science compliquée: plasma chaud, matériaux, supraconducteurs etc ...



Confiner un gaz à 100 millions de degrés: le Tokamak

- Création du “plasma” puis chauffage
 - Allumage
- Le plasma est guidé autour du tore par le champ magnétique
 - Confinement du plasma
- L’hélium né de la fusion D/T entretient la température
 - Combustion

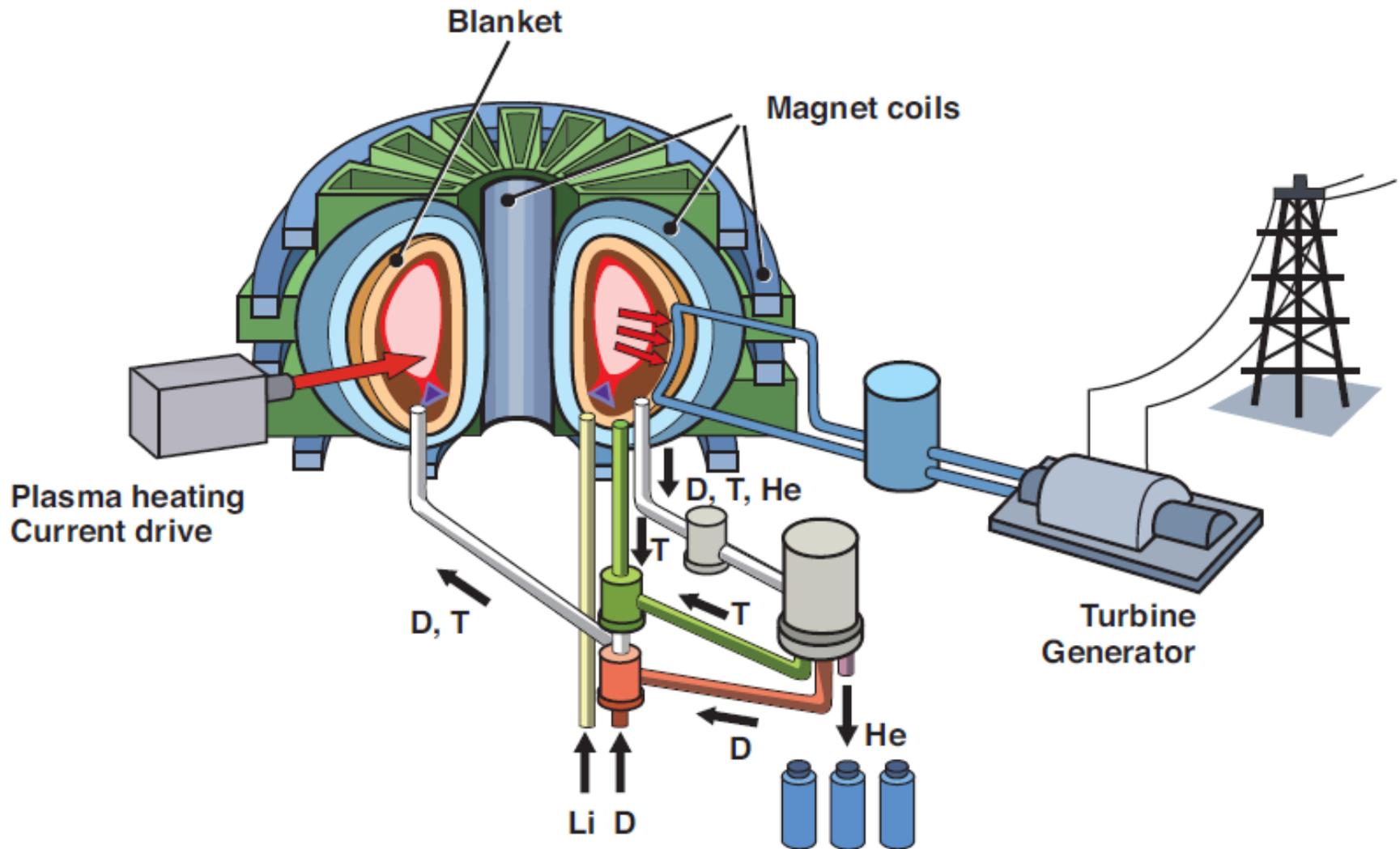


Gain d'énergie si: $nT\tau_E \sim 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s} \sim 1 \text{ bar} \cdot \text{s}$

- n (densité) = 10^{20} p/m^3 → facile!
- T (température) $\geq 10 \text{ KeV}$ (100 millions de degrés) → démontrée
- τ_E (temps de confinement de l'énergie) $\geq 4 \text{ s}$ → taille critique

Quelle taille faut-il pour un bon rendement? → ITER

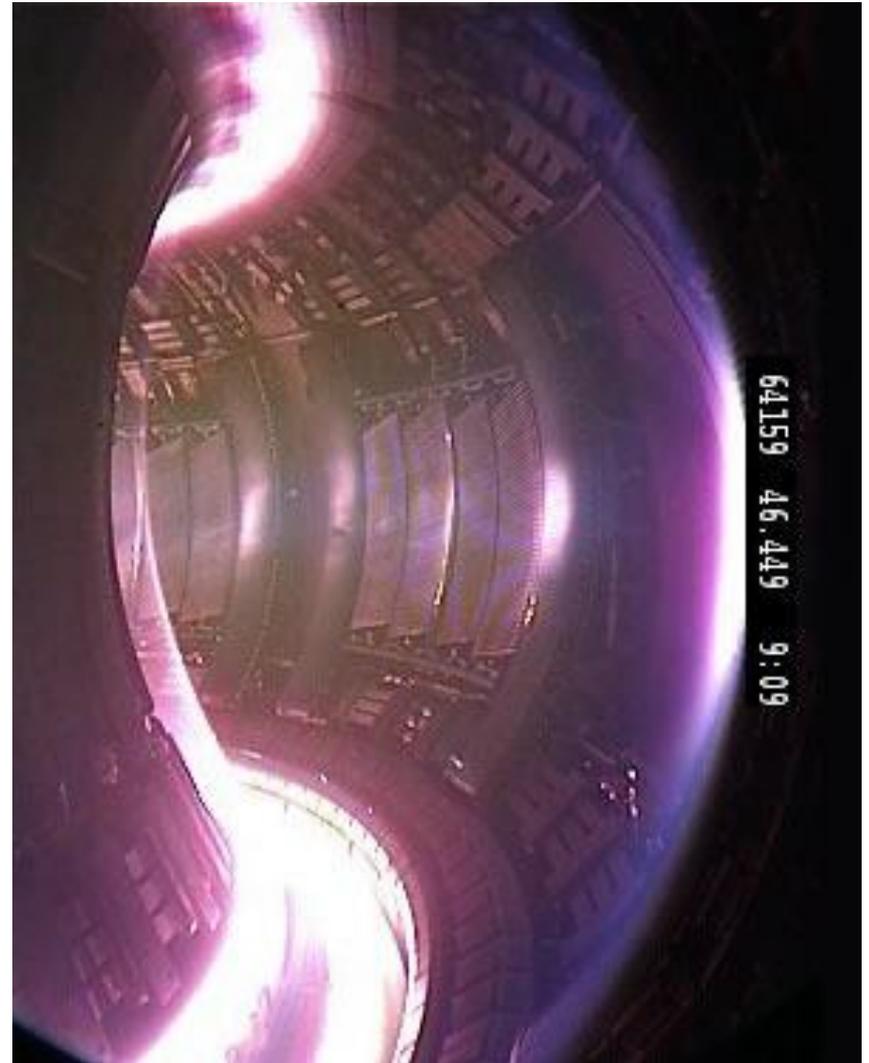
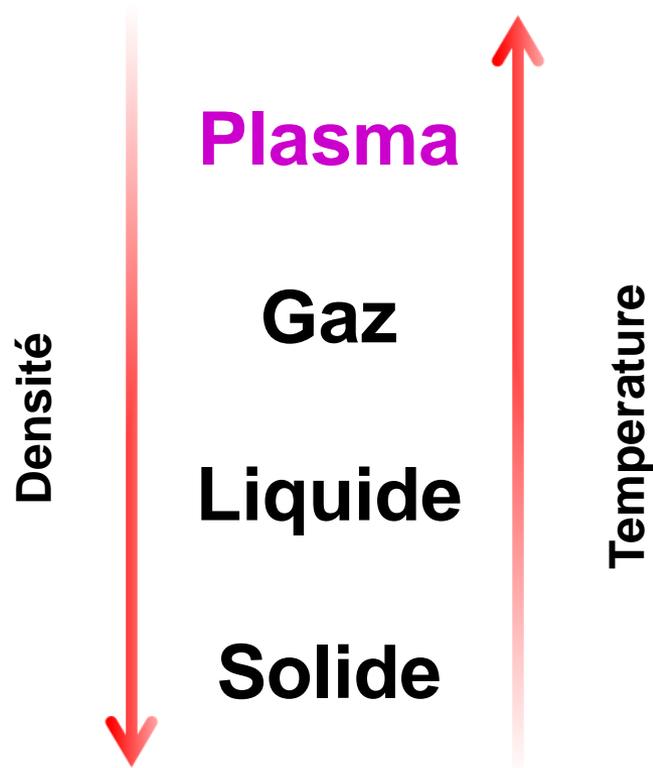
Réacteur à Fusion sur la planète Terre



Certains l'aiment chaud.....

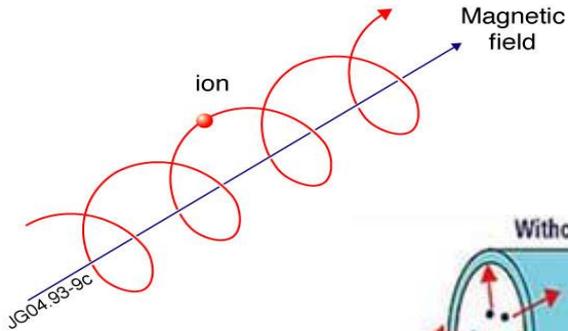
Plasmas:

4^{ème} état de la matière
Interactions collective

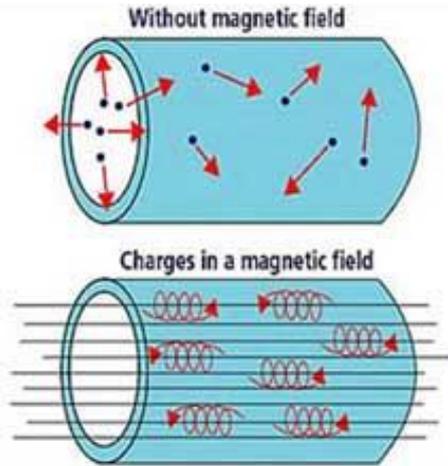


Plasma de JET

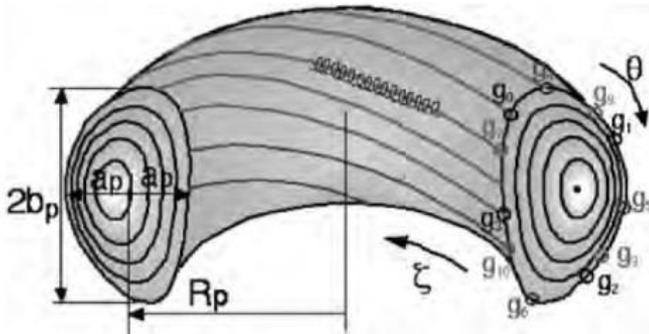
Magnetic Confinement



Electrons & ions spiral around field lines
 $R = (2mT)^{1/2}/ZeB \rightarrow 4\text{mm for } 10\text{keV Deuterium}$



Radial confinement is provided



Now close magnetic surfaces in a toroidal geometry \rightarrow
Longitudinal confinement is obtained

Early problems: large scale instabilities

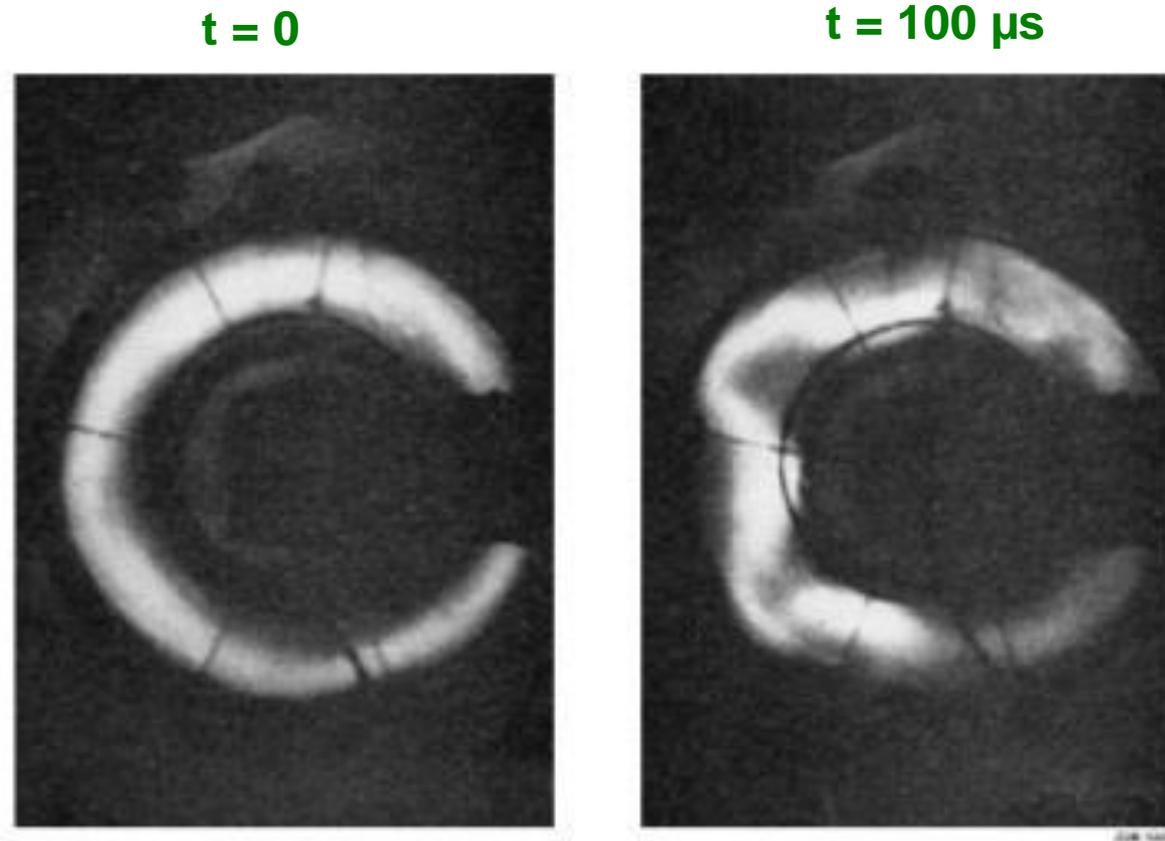


Figure 1.3. Photographs from early pinch experiments showing how the discharge initially forms a symmetric toroidal ring, but then develops a kink instability.

Very fast magneto-hydrodynamic instabilities with bad (convex) curvature of field lines → cured with the combination of B_t + plasma current

Creating a toroidal magnetic bottle

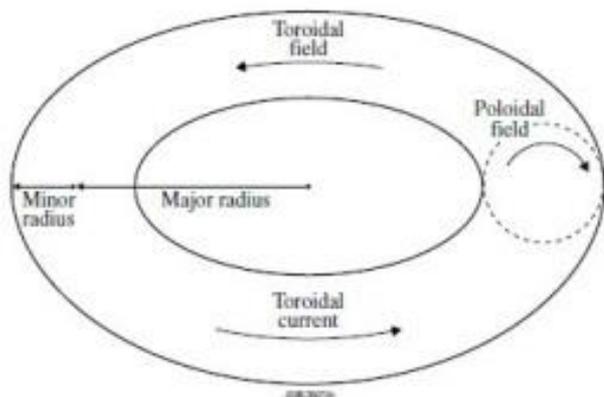


Figure 3.1. The currents and fields in a tokamak plasma.

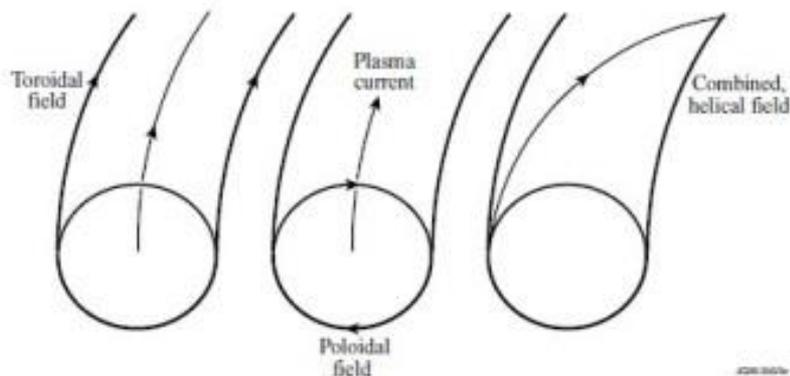
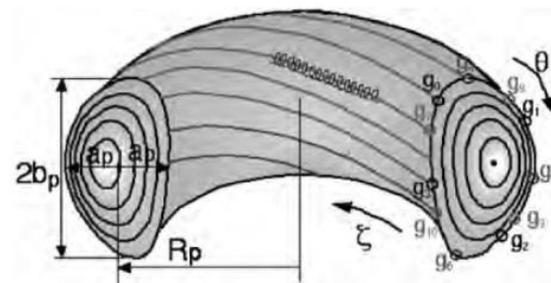
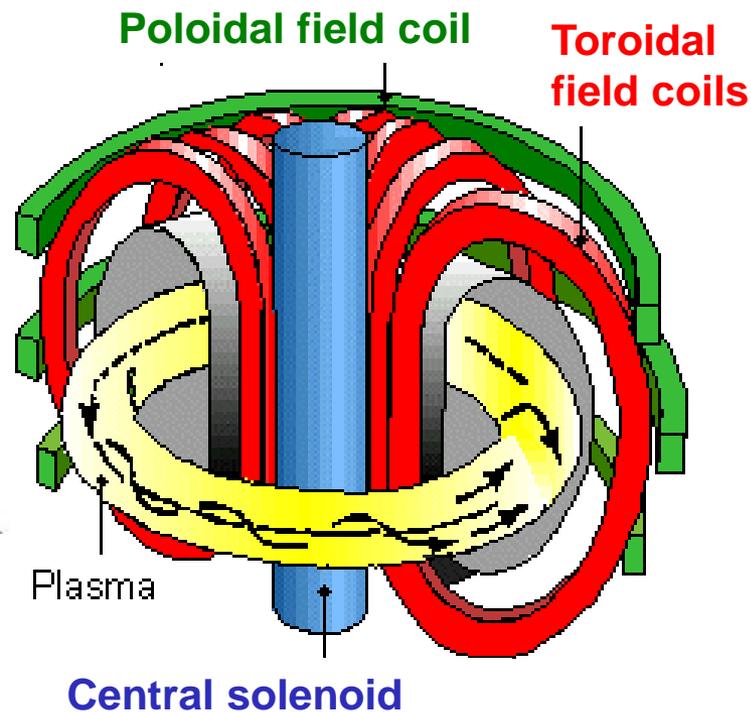


Figure 3.2. The tokamak's toroidal magnetic field combines with the poloidal field of the plasma current to produce a magnetic field with helical field lines.

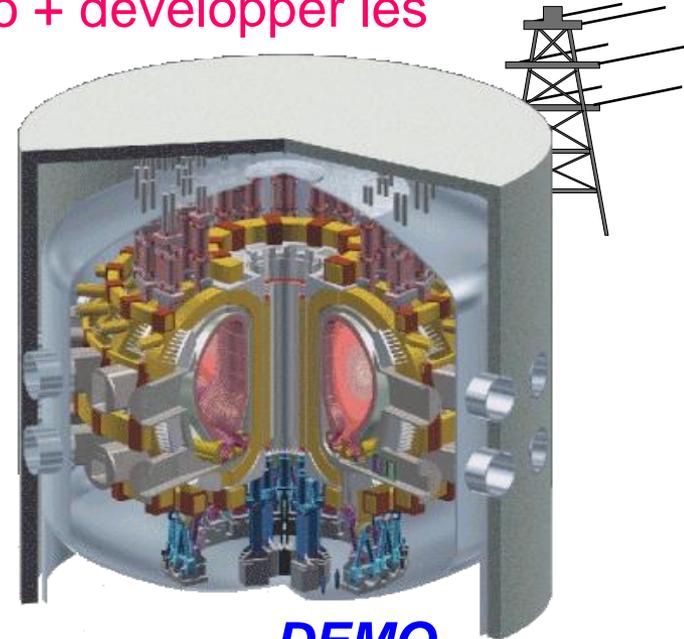
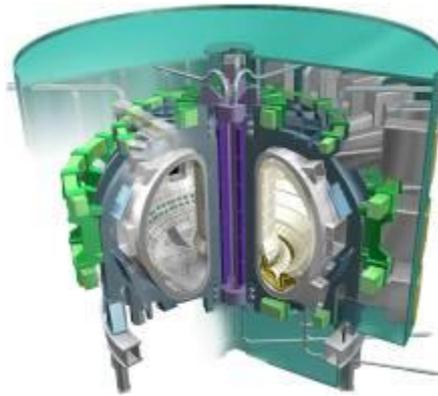
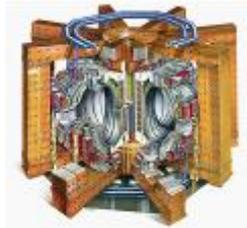


Tokamak magnetic bottle:

- Closed magnetic surfaces are created by $I_p + B_t$
- Plasma macroscopically stable if $q=r.B_t/RB_p > 2$

Les étapes essentielles vers le réacteur

Depuis 1970: progrès ~ 10000 sur n.T. τ_E et sur la durée des décharges
 Gagner encore un facteur 3 à 5 → ITER et Démo + développer les matériaux en parallèle



Tore Supra

JET

ITER

DEMO

25 m³

80 m³

800 m³

~ 1000 - 3500 m³

~ 0

~ 16 MW_{th}

~ 500 MW_{th}

~ 2000 - 4000 MW_{th}

Q ~ 0

Q ~ 1

Q ~ 10

Q ~ 30

6 minutes

10 sec

10' to CW

CW

0%

10 %

70 %

80 à 90 %



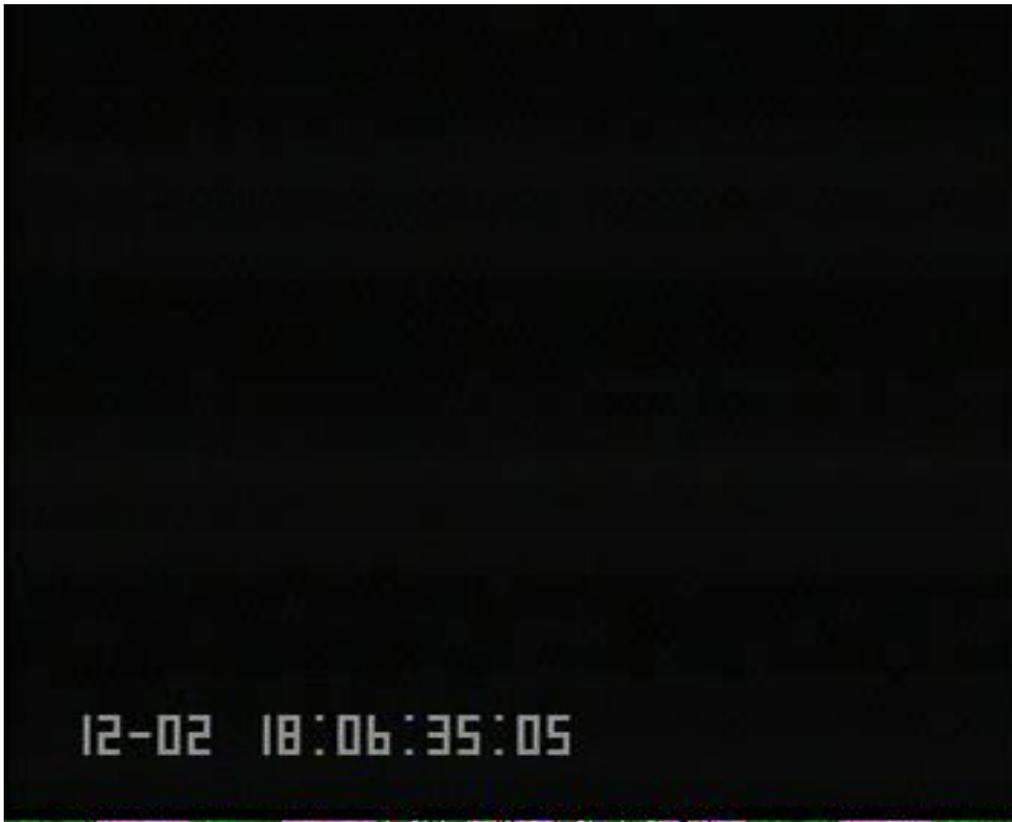
Auto chauffage

Développement sur 3 plans

- **Français:** environ 60 équipes dont Tore Supra (West)
- **Européen:** Le **JET** + programmes des pays membres (Associations/Consortium)
- **Mondial:** **ITER** + ‘broader approach’ + collaboration via AIEA et IEA avec labos US, Japon, Russie, Chine, Corée, Inde etc.

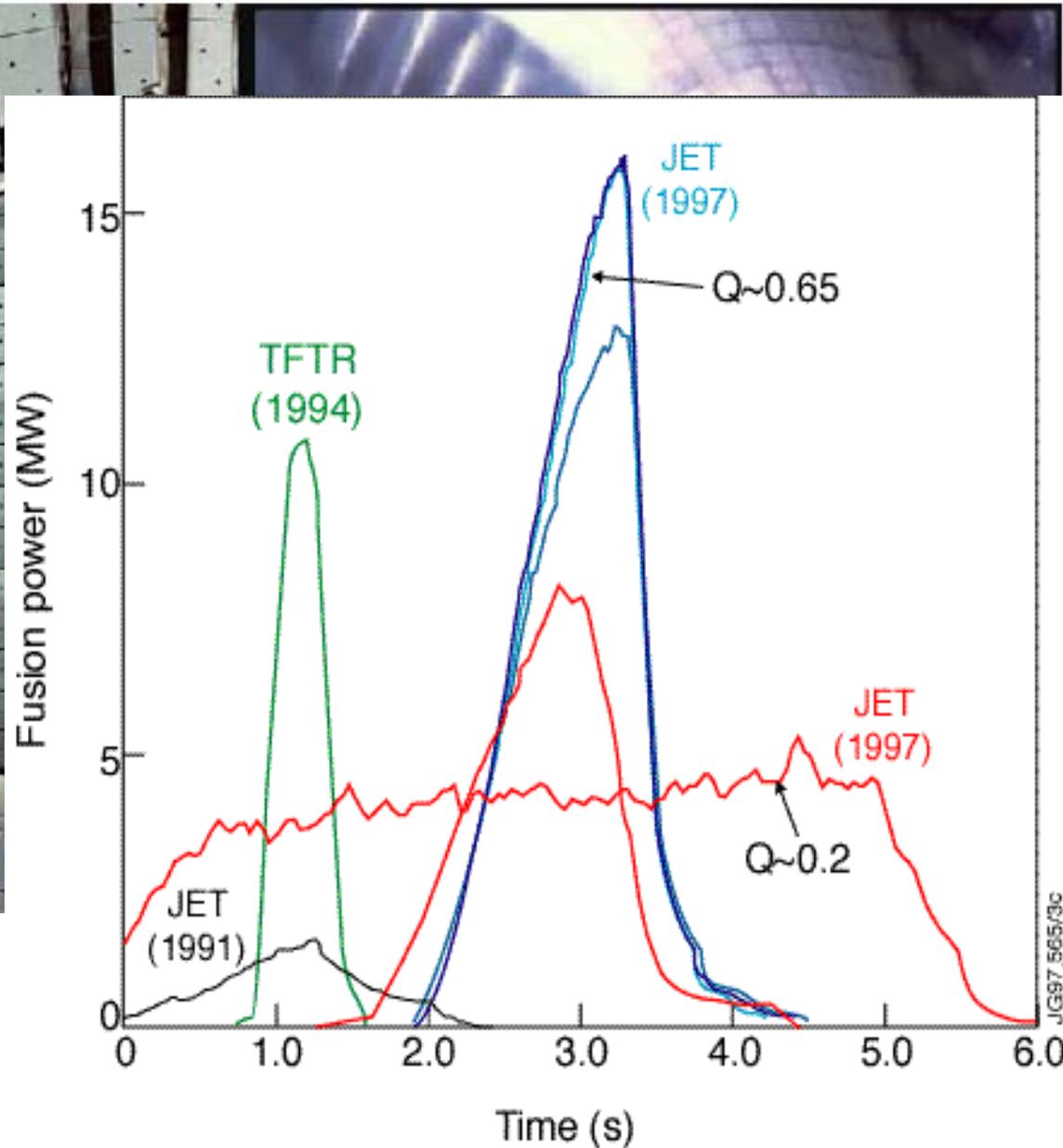
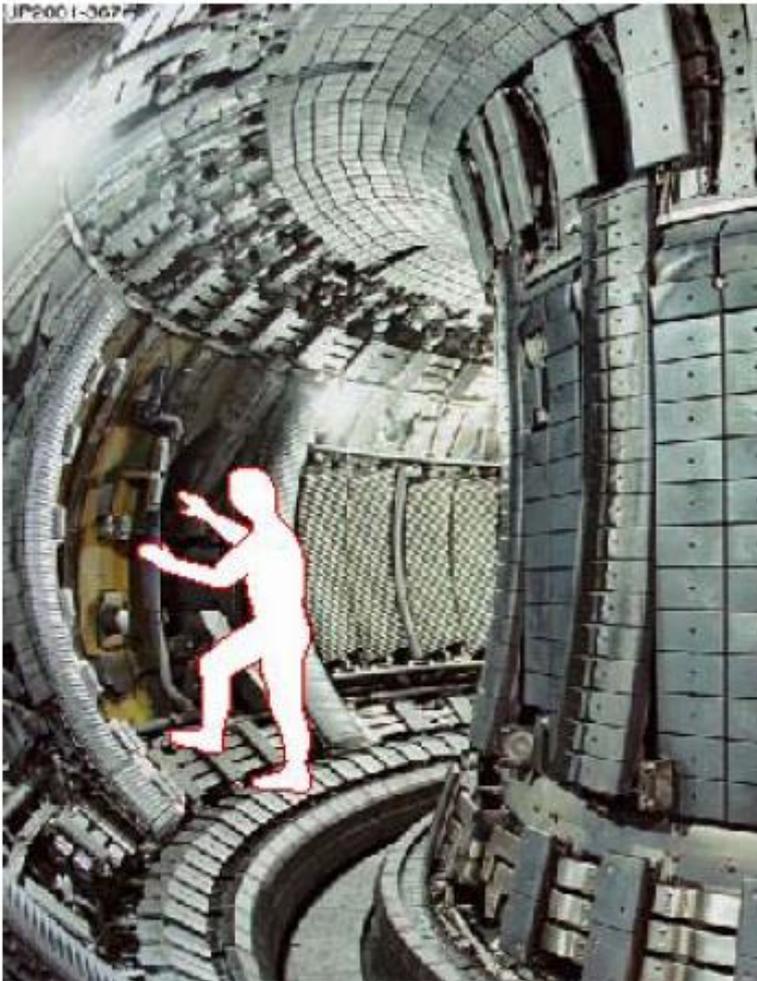
Tore Supra

(CEA Cadarache + collaborations)



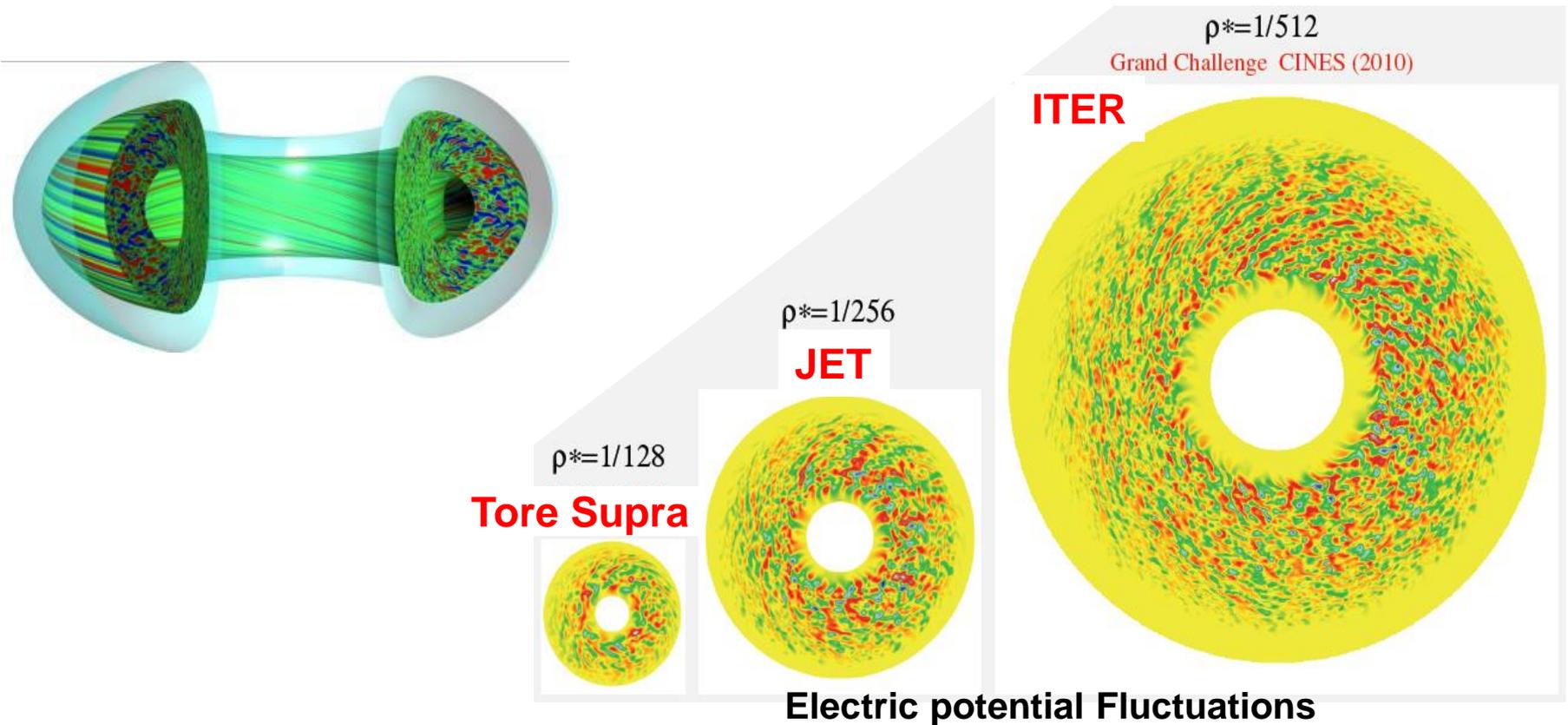
Supra conducteurs, composants face au plasma
→ longs pulses. Record d'énergie extraite
→ Transformation en plateforme ITER: WEST

JET (EU): performance & dimensionnement



- . Lois d'échelle
- . D/T, béryllium, télé-manipulation
- . Organisation Européenne depuis 1978, toujours en activité

Turbulence in tokamaks (computing)



Size of turbulent structures are independent of machine size

Confinement scales as: $\omega_c \tau_E \equiv [\rho_*]^{-3}$

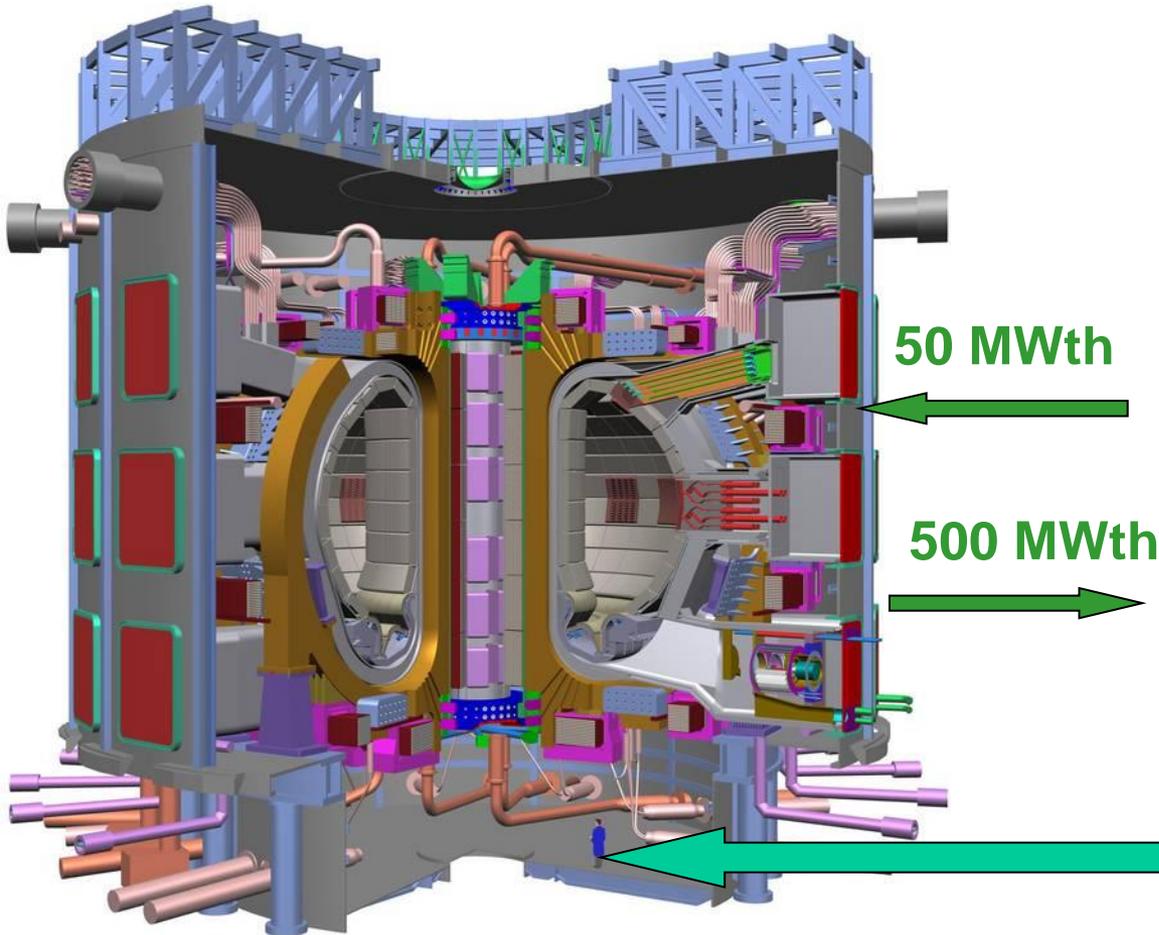
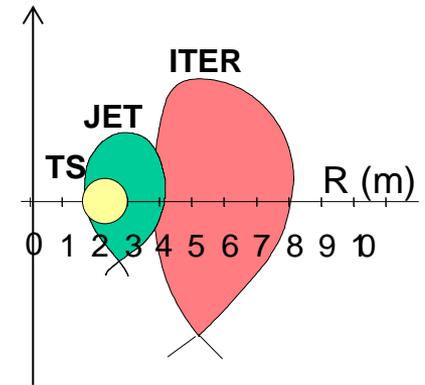
➤ Done with High Performance Computing:

8 192 processors for ~ 1 month

6.1 millions hours of computational time (~7 centuries on one processor !)

ITER: 500 MW_{th}

Environ 2 fois plus grand
en taille que JET



Auto-chauffage

par l'hélium produit
par les réactions de
fusion

Technologies de la fusion

Homo sapiens sapiens

ITER: partage des coûts

Construction (2010 – 2025): 2,7 Mrd€ pour EU en 2001
Révisé et plafonné juillet 2010 à 6,6 Mrd€ pour EU
Coordination, design, matières premières, personnel

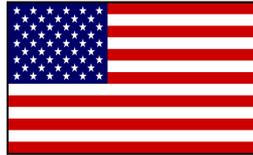
46 %



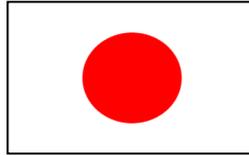
9 %



9 %



9 %



9 %



9 %



9 %



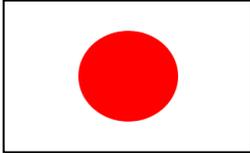
Exploitation > 20 ans (2025 – 2045)

Recherche ouverte

34 %



13 %



13 %



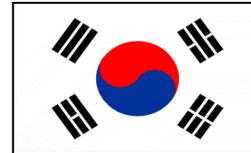
10 %



10 %



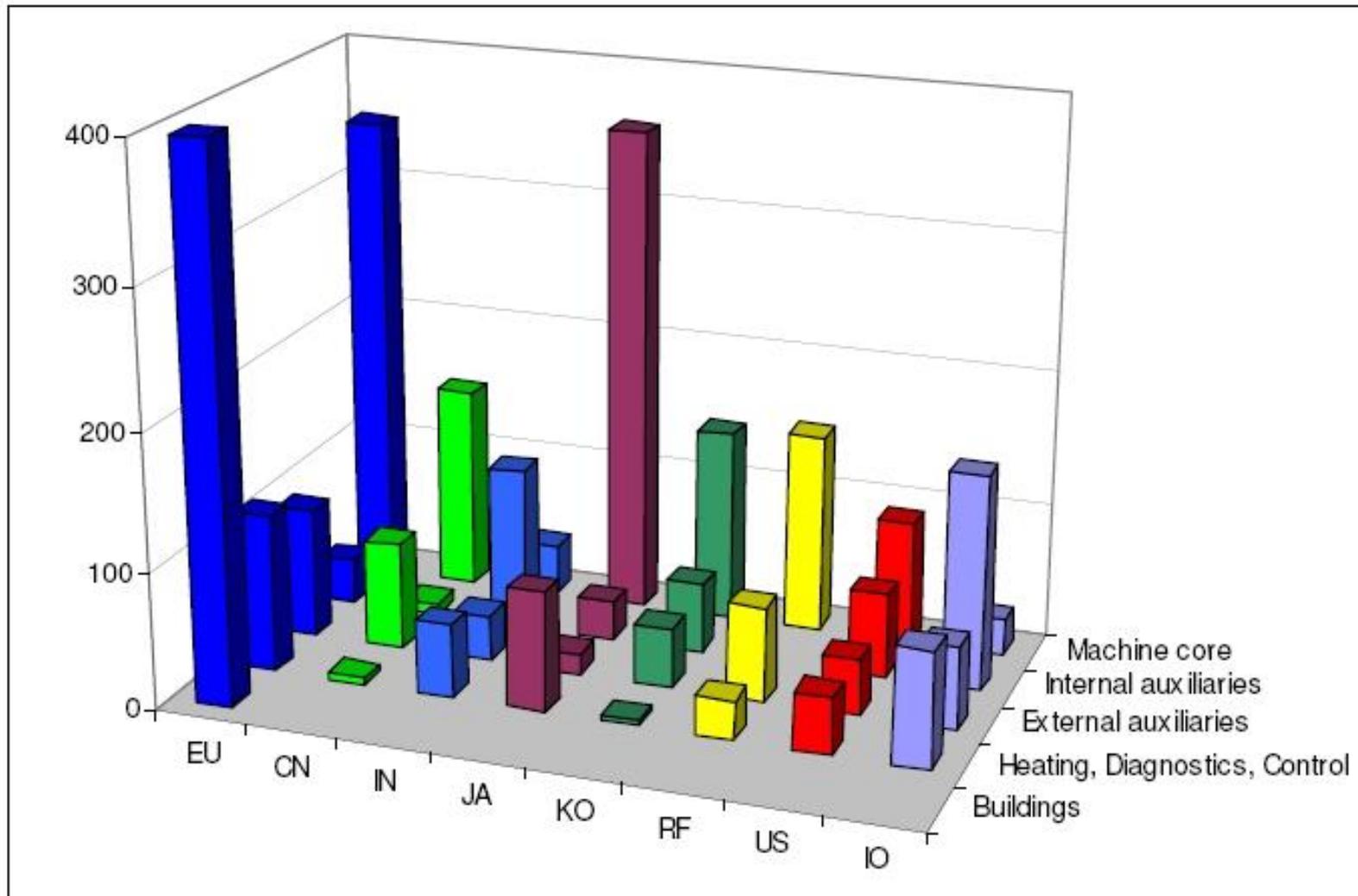
10 %



10 %

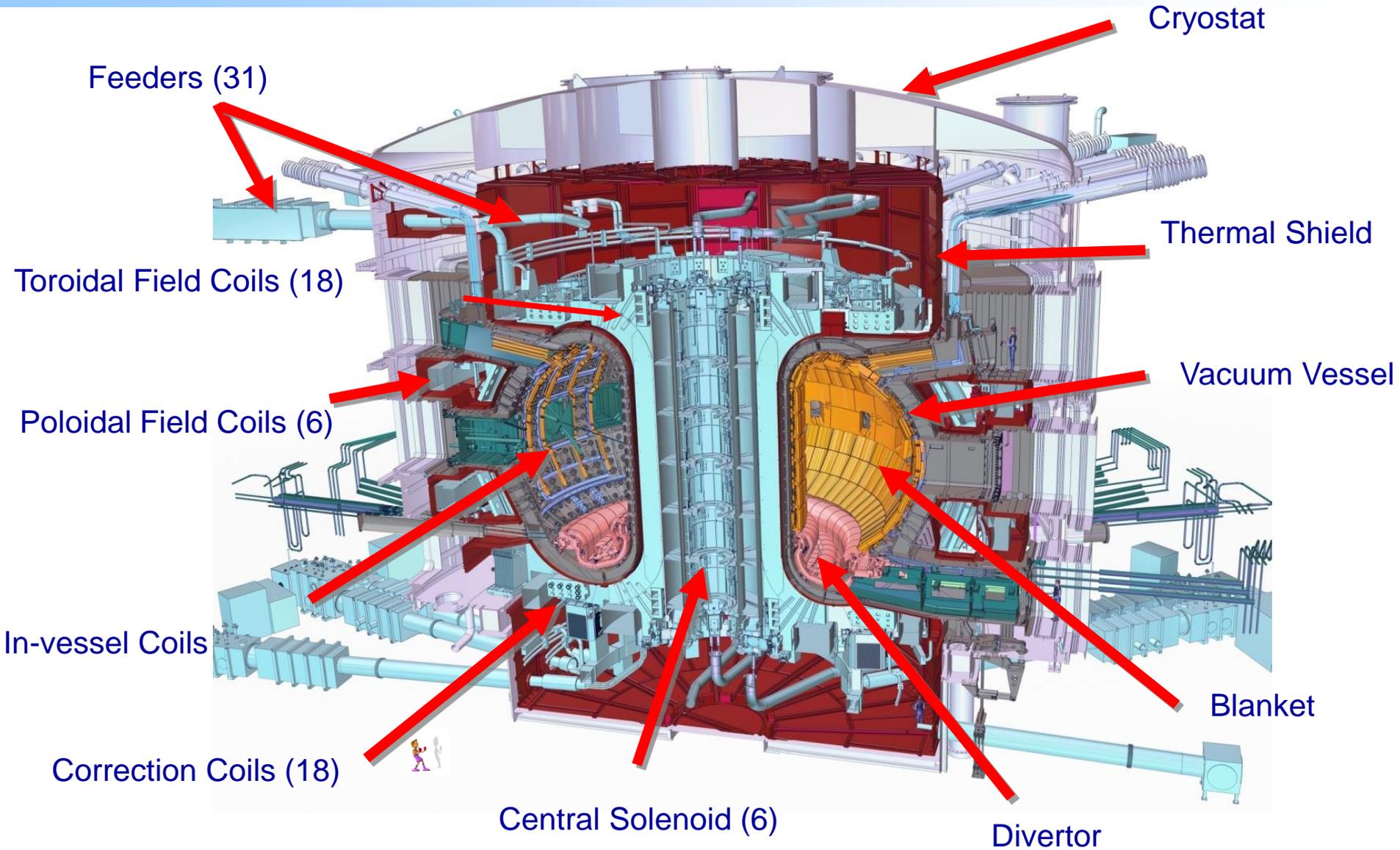


Contributions en nature des 7 partenaires



Chacun des 7 partenaires doit fournir une partie de la machine

ITER Tokamak

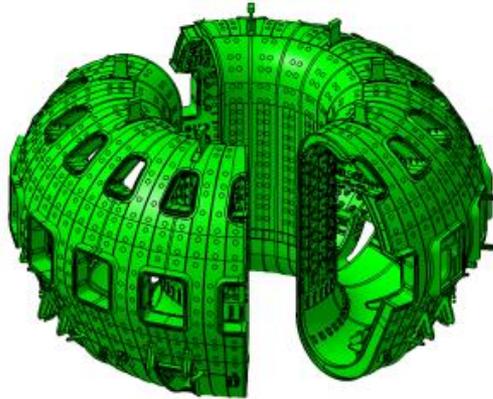


Fourniture de la chambre à vide

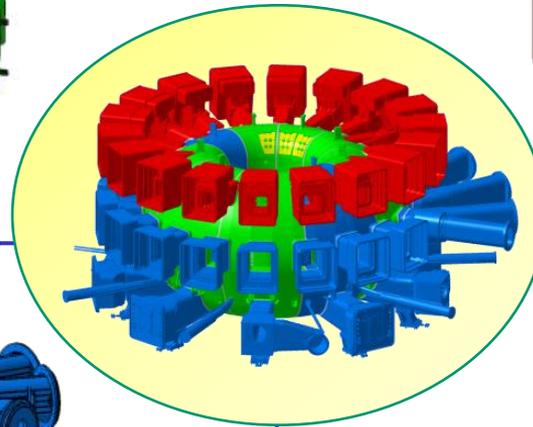
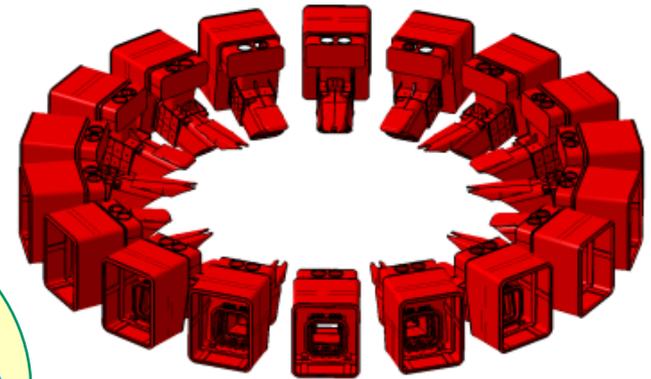
Bak et al



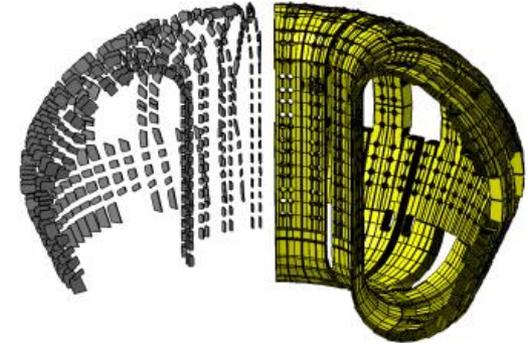
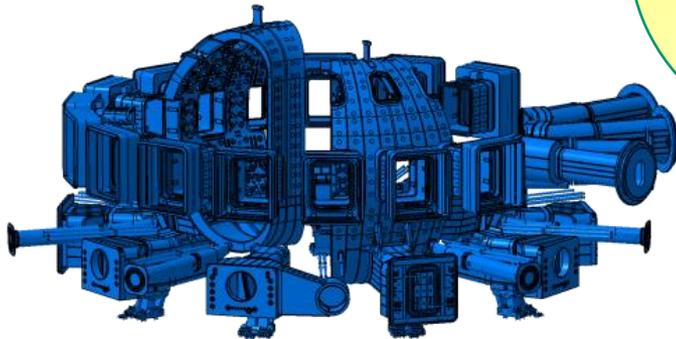
EU	Description
Items	7 Sectors of Main Vessel
Total Cost	92.06 kIUA (39%)



RF	Description
Items	18 Upper Ports
Total Cost	20.86 kIUA (9%)



Total 234.28 kIUA
8% of total In-kind

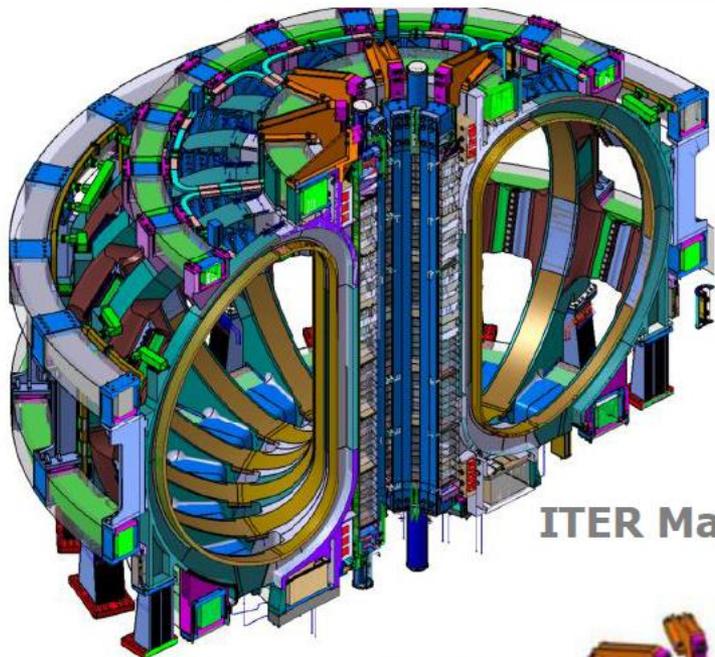


KO	Description
Items	2 Sectors of Main Vessel 17 Eq. & 9 Lower Ports
Total Cost	84.06 kIUA (36%)



IN	Description
Items	In-Wall Shields/ribs
Total Cost	37.30 kIUA (16%)

ITER Magnet System



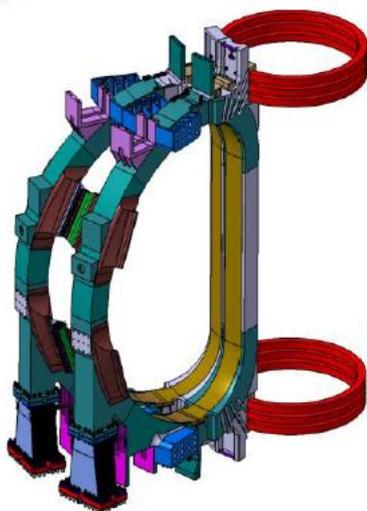
- The ITER magnet system is made up of
 - **18 Nb₃Sn Toroidal Field (TF) Coils,**
 - a 6-module Nb₃Sn Central Solenoid (CS),
 - **6 Nb–Ti Poloidal Field (PF) Coils,**
 - **9 Nb–Ti pairs of Correction Coils (CCs).**

ITER Magnet System

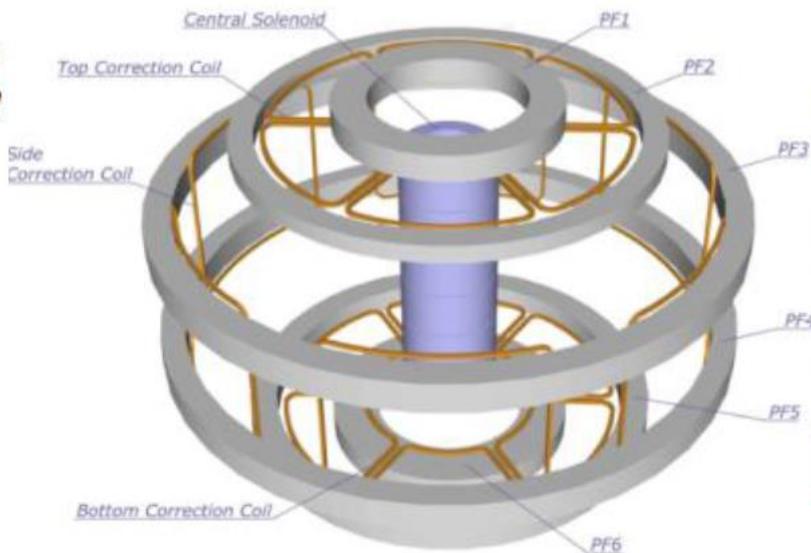
A.D. ITER Cond. & Mag. Status 190315 4/50



Pair of TF Coils



CS Coil



(PF1)



PF Coils



(PF2-6)

CCs

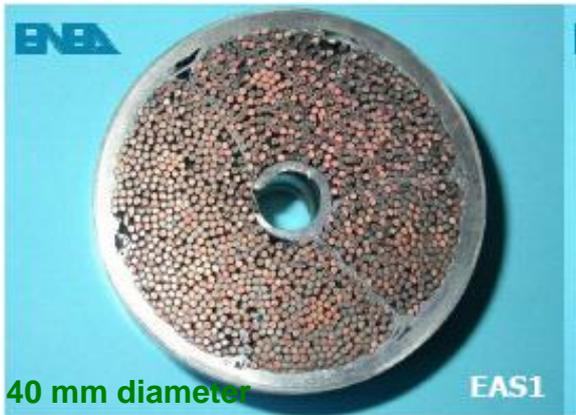


TF Conductor Procurement

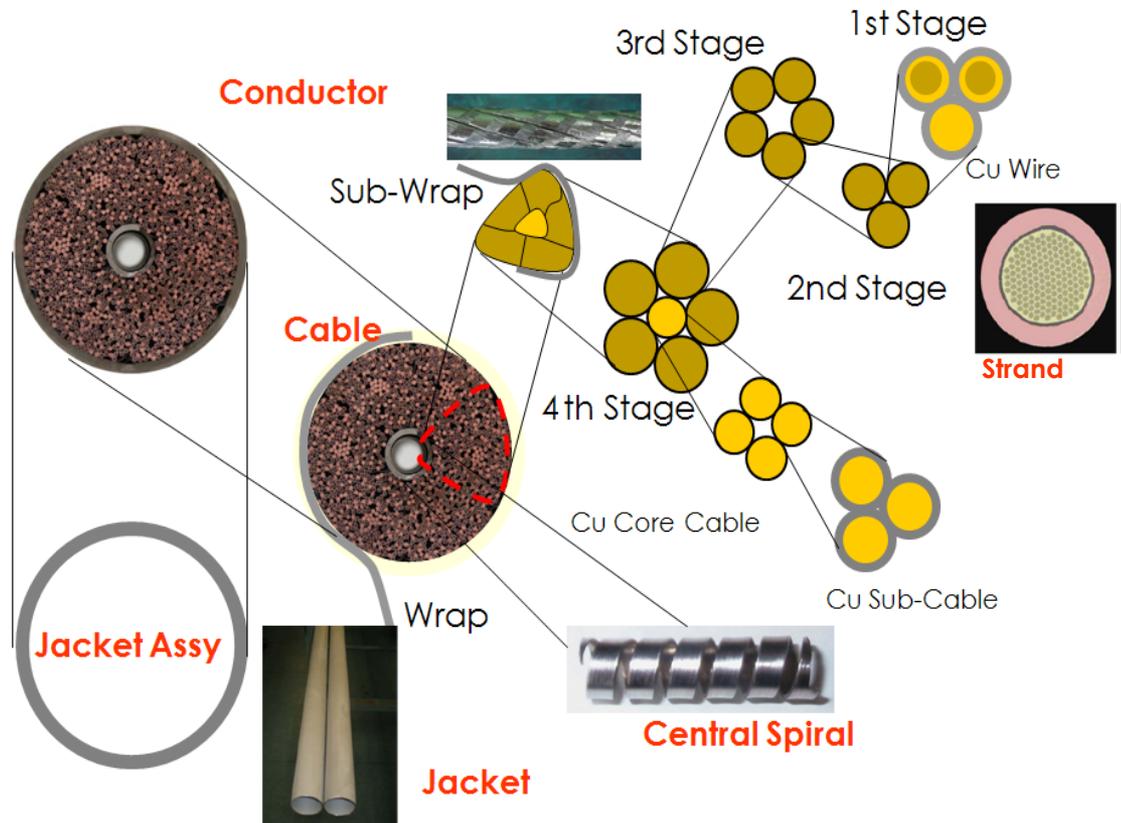
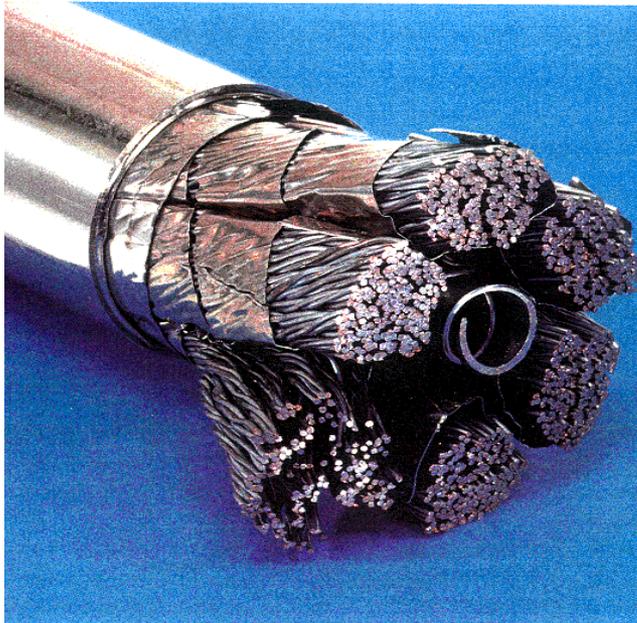
~90 km / 450 t of Nb₃Sn conductor have been manufactured by EU, JA, RF, KO, & US

95% of the strand needs are procured

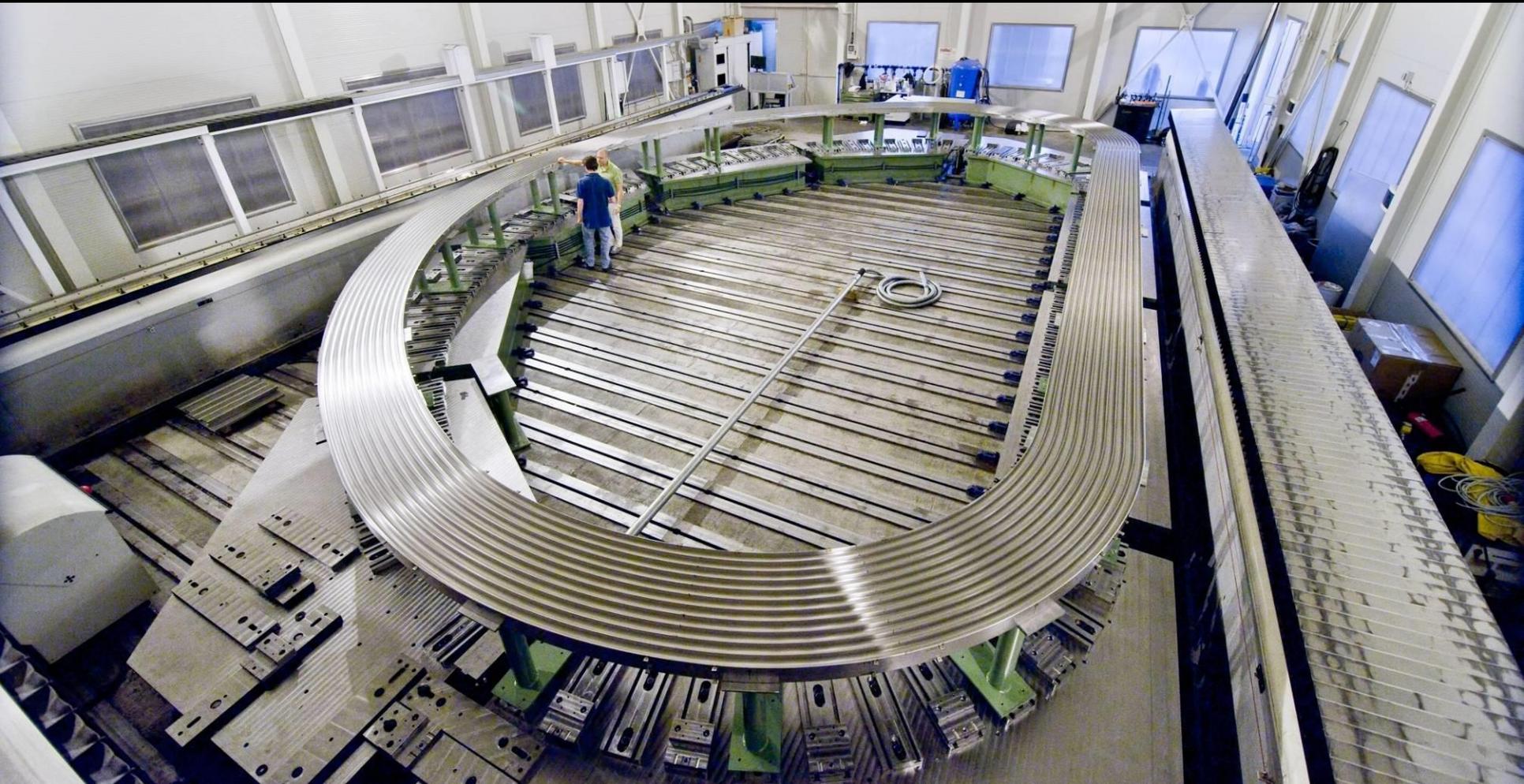
The biggest Nb₃Sn conductor procurement in history



ITER TF Conductor



La production est lancée...



A Toulon (CNIM) et à Camerana, en Italie (SIMIC), on usine les structures de support destinées aux bobines de champ toroïdal (TF Coils) du tokamak.

...dans le monde entier



**Un des aspects de la contribution russe à ITER:
une unité de gainage des câbles conducteurs au
centre de recherches JSC VNIKP de Moscou.**

Progress on TF Coils: EU – Tooling 2

(Courtesy of
A. Bonito-Oliva, F4E)



Wrapping tooling for turn insulation of double pancake
during assembly at Elytt (Bilbao, Spain)

Progress on the ITER platform



The 42-hectare ITER platform is located 35 km to the north of Aix-en-Provence, France.

Bâtiment Tokamak et hall d'assemblage, début 2015





Un pôle scientifique mondial en France

- **Sur ITER à Cadarache:** ~ 1000 personnes déjà sur place et > 1000 scientifiques pendant l'exploitation
- **Associés à ITER:**
 - **Universités, CEA, INRIA: Fédération de recherche** labos renforcées ~ 40 labos, 60 équipes et ~ 200 scientifiques
 - **« WEST » au CEA (modification de TS) plateforme pour préparer l'exploitation d'ITER (divertor en W, fonctionnement continu)**
 - **De par le monde:** 7 agences domestiques (une par partenaire); plusieurs milliers de collaborateurs scientifiques
 - **Formation:** voir plus loin

Formation



Ecole internationale (Manosque): 9 (11) langues, 450 (900) élèves

Master Sciences de la fusion: 10 univ + 6 écoles d'ingénieurs.

Erasmus Mundus: participation française et d'ITER au Master EP et collège doctoral

En résumé



La fusion: une solution long terme
ITER: organisations en place, en construction
Un programme de 30 ans:
Enjeux considérables et retombées multiples