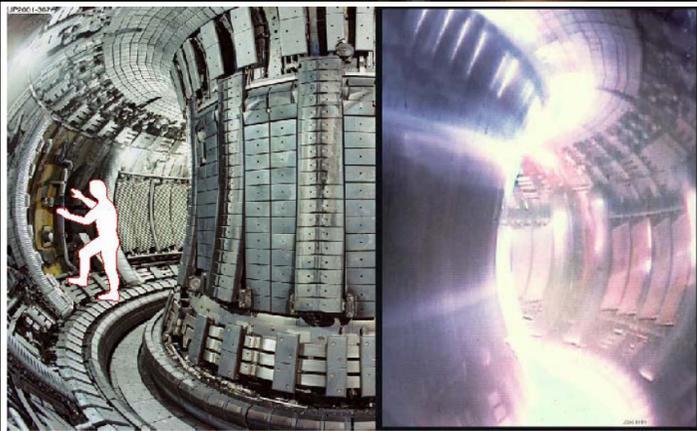


ITER

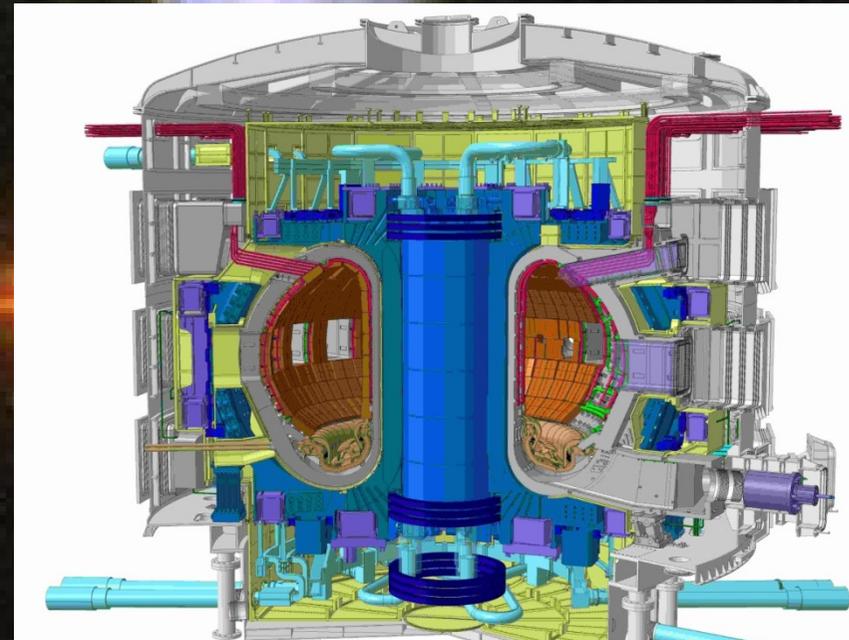
et les recherches sur la fusion par confinement magnétique



JET



Tore Supra / West



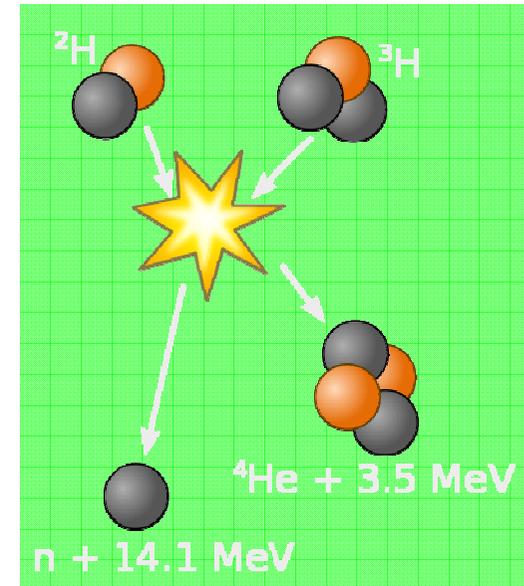
ITER

ITER, enjeux et défis

Démontrer la faisabilité et la sûreté de l'énergie de fusion

énergie sans effet de serre et sans accident nucléaire grave possible

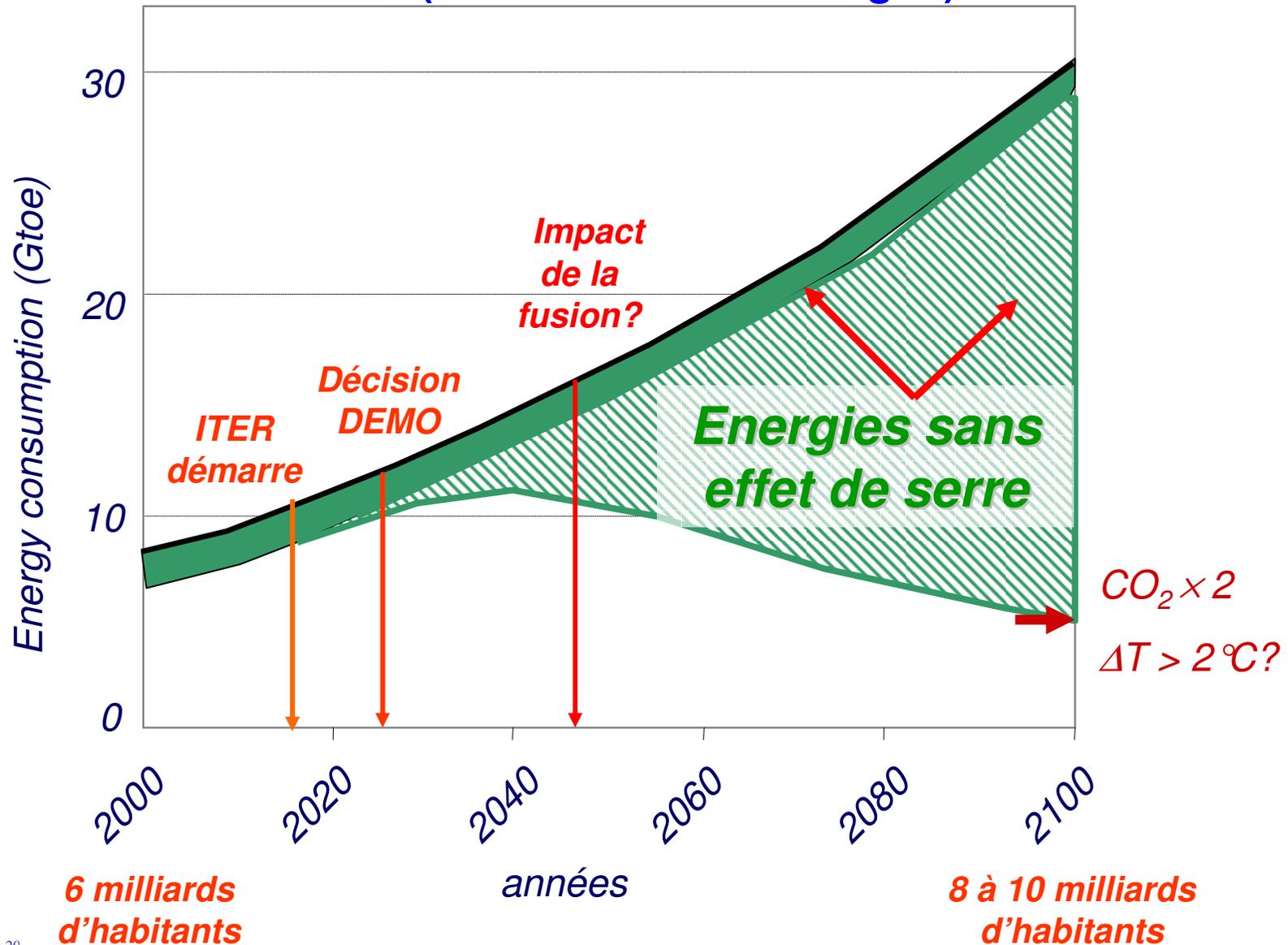
- Une expérience de la taille du CERN (10 G€, 30 ans, 35 pays) construite en France pour:
 - Valider les principes physiques en vraie grandeur (500MW)
 - Physique des plasmas en combustion (stabilité de la population alpha)
 - Valider des technologies de la fusion
 - Supra conducteurs, matériaux (mais pas ceux sous flux de neutrons élevé), télémanipulation, électrotechniques de puissance, contrôle (disruptions), mesures,
 - Retombées économiques et scientifiques
 - Être aux premières loges de l'exploitation
 - Contrats depuis 2007: France (~50%), PACA (~30%)
- Défis (autre que scientifiques) à la hauteur des enjeux!
 - Interfaces (7 partenaires, 35 pays!!)
 - Coûts, planning, stabilité des partenariats
 - Début expérimentation 2022



Les énergies du futur: limiter le CO2

Multiplier par 20 la part des énergies sans effet de serre!

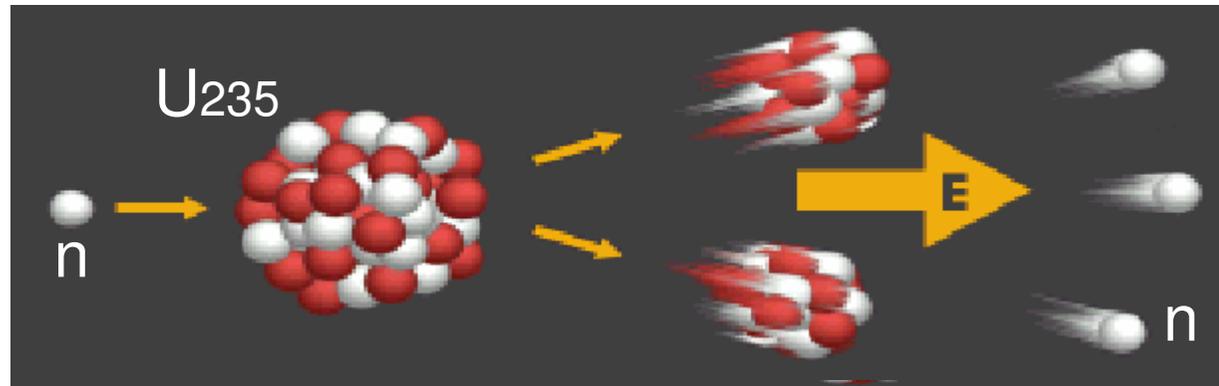
→ Renouvelables (intermittence: stockage?) + nucléaire



Fission / Fusion

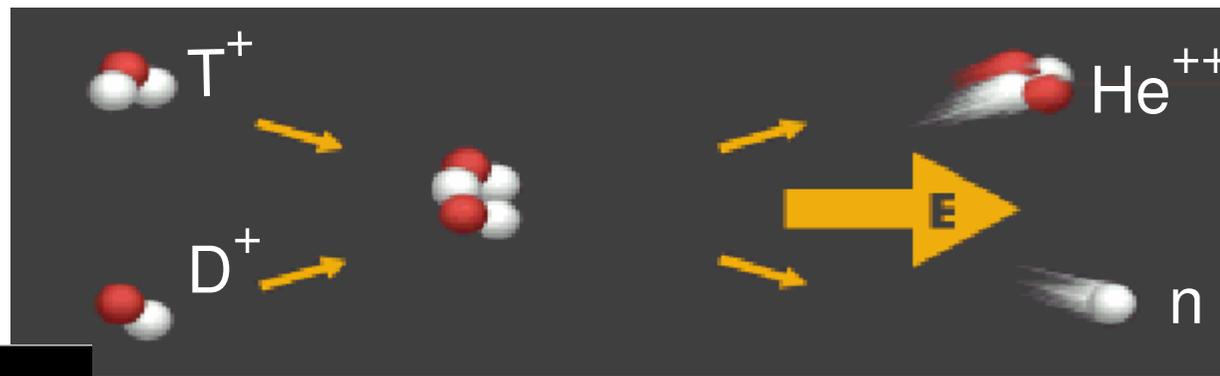
Produits de fission

Fission
Combustible:
Uranium
solide

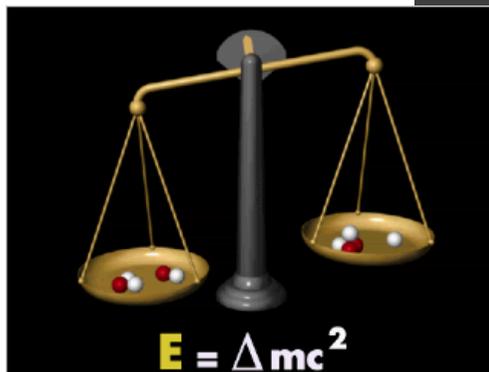


Neutrons
→
réactions
en chaîne

Fusion
Combustible:
hydrogène
gaz



Hélium
maintient la
température
du gaz



Combustible de la fusion: deutérium et tritium

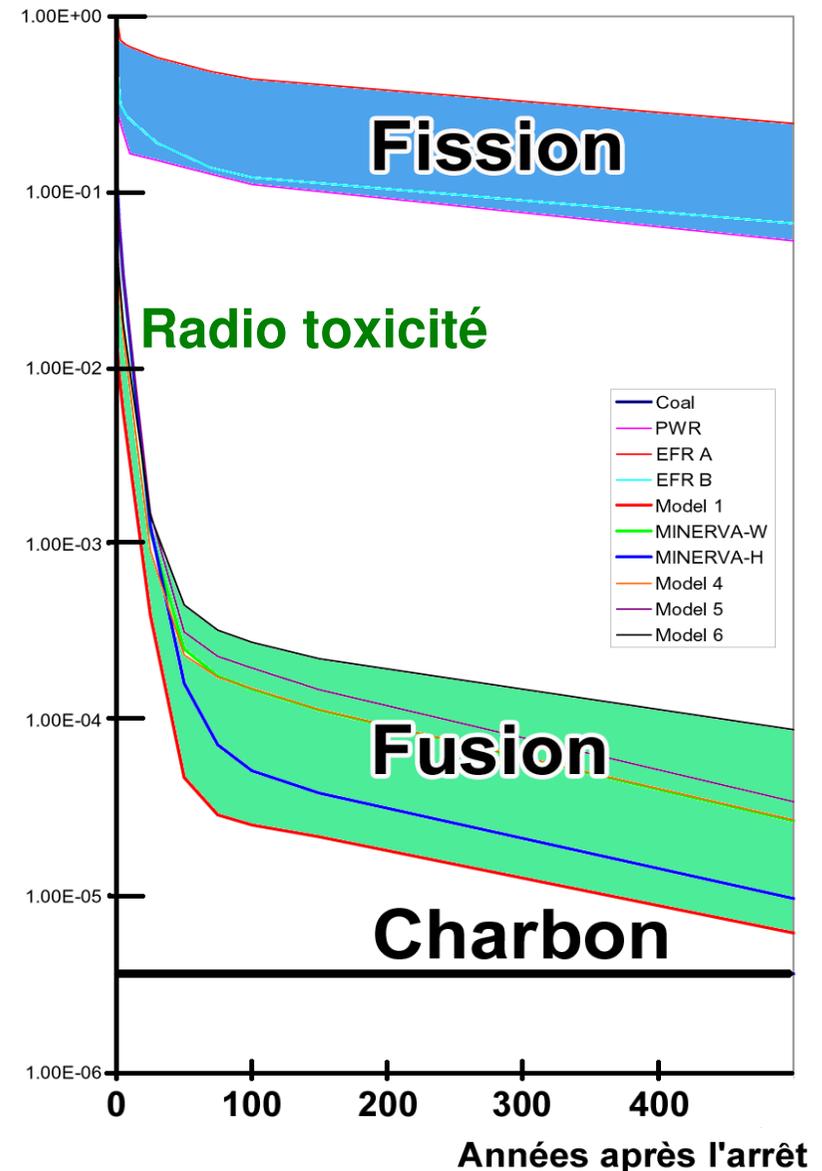
Deutérium: se trouve dans les océans

Tritium: fabriqué in situ à partir du Lithium

→ Confiner un gaz porté à 100 millions de degrés

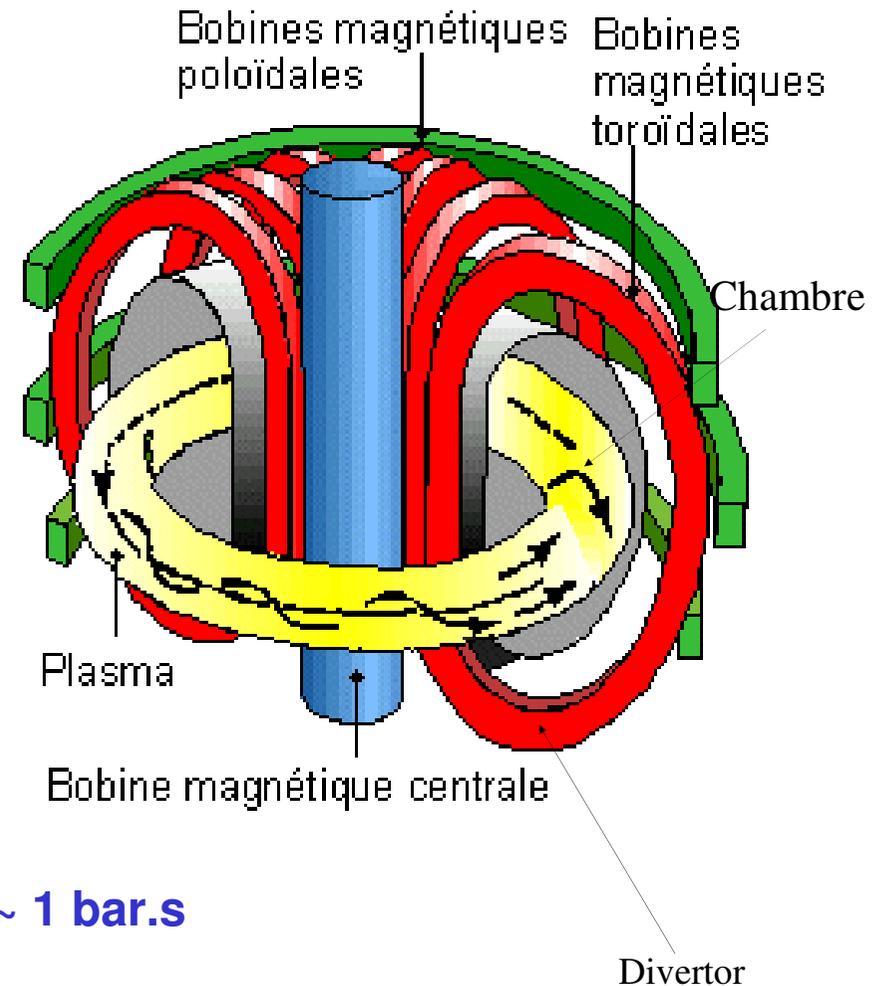
Pourquoi la Fusion ?

- 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” et 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



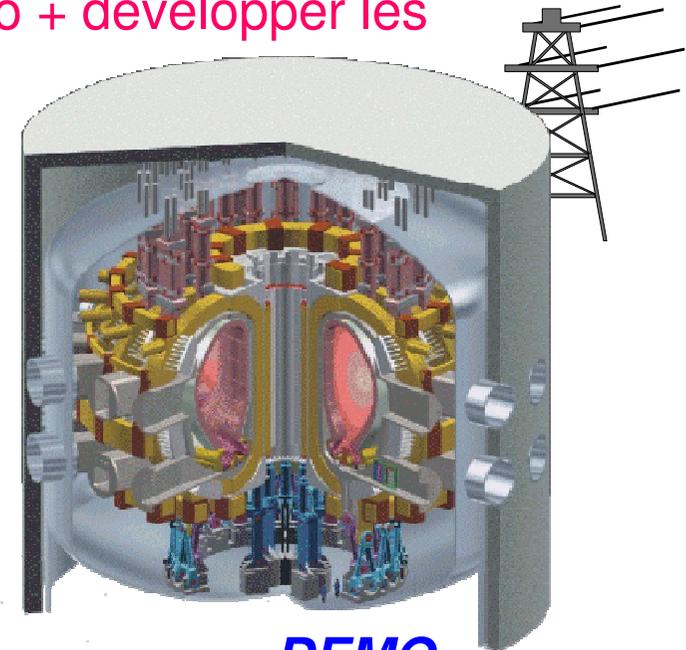
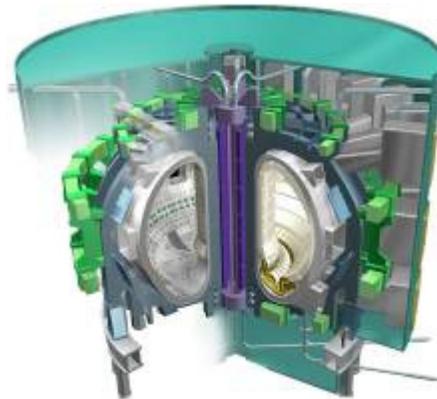
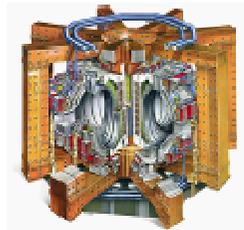
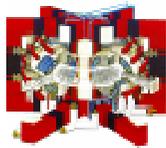
Gain d'énergie si: $nT\tau_E \sim 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s} \sim 1 \text{ bar} \cdot \text{s}$

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

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

ITER : étape essentielle 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 %

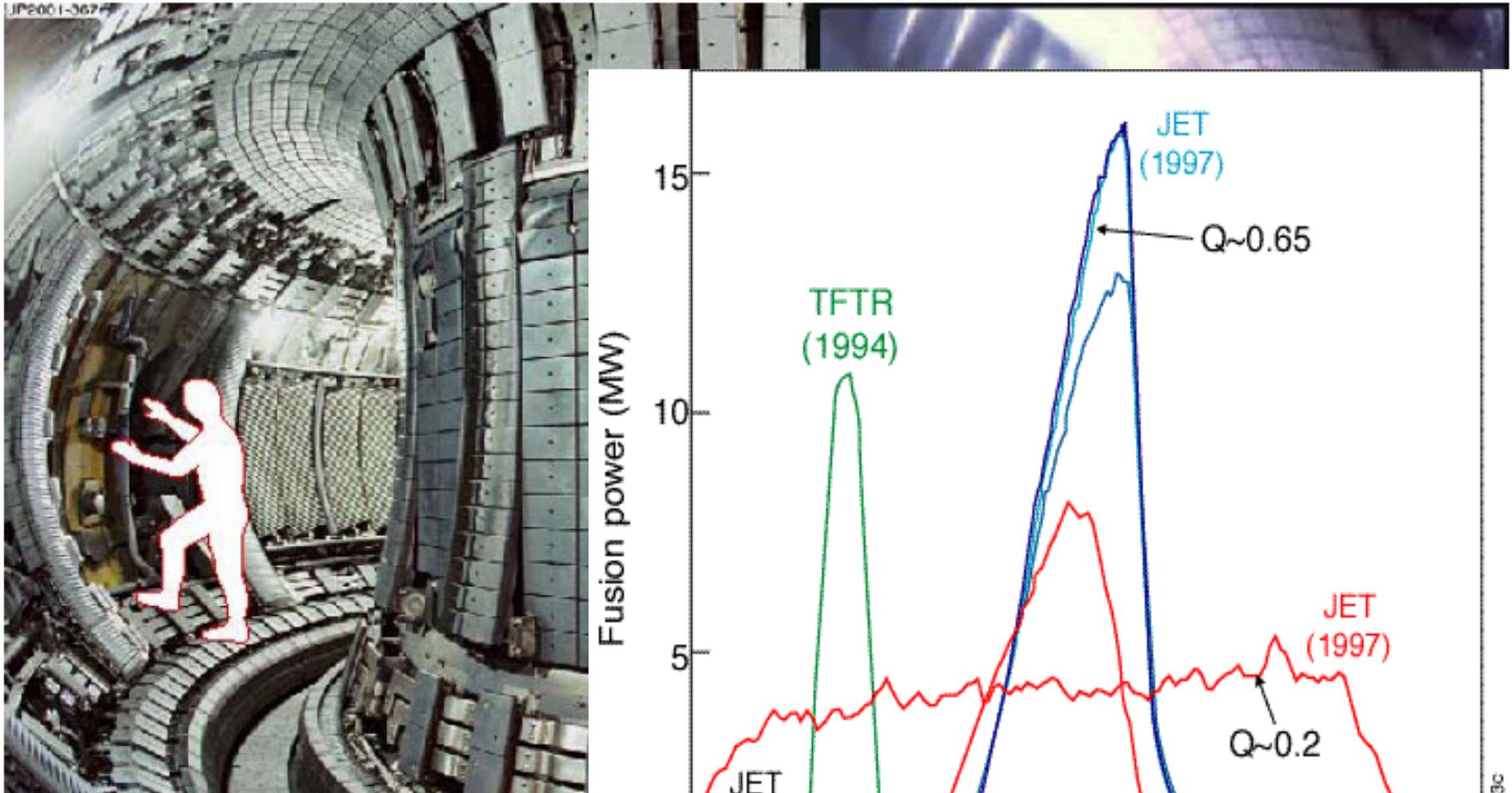
70 %

80 à 90 %



----- Auto chauffage -----

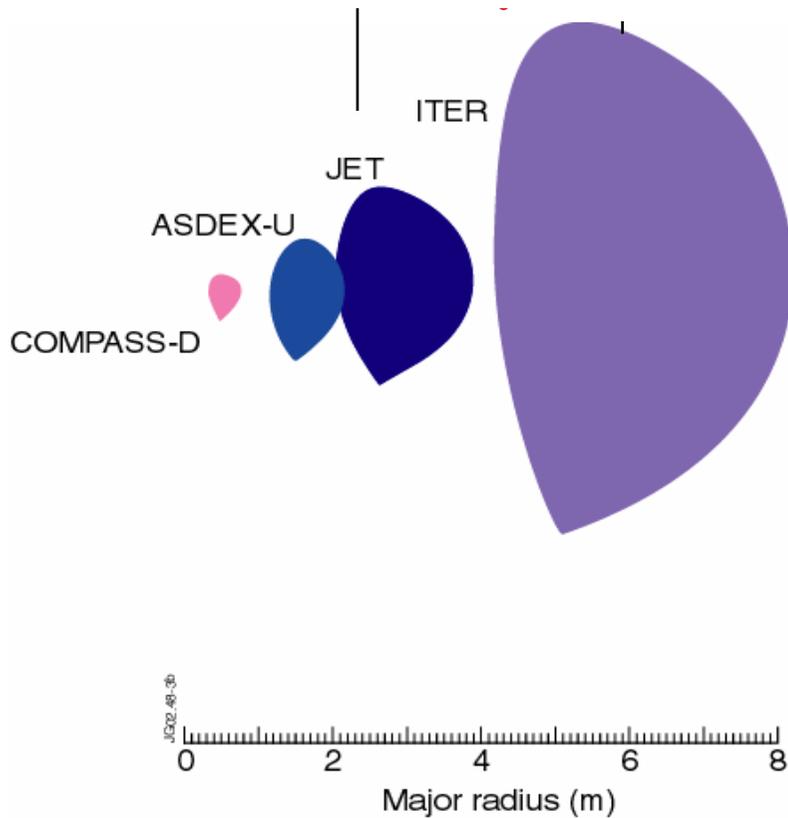
JET: performance & dimensionnement



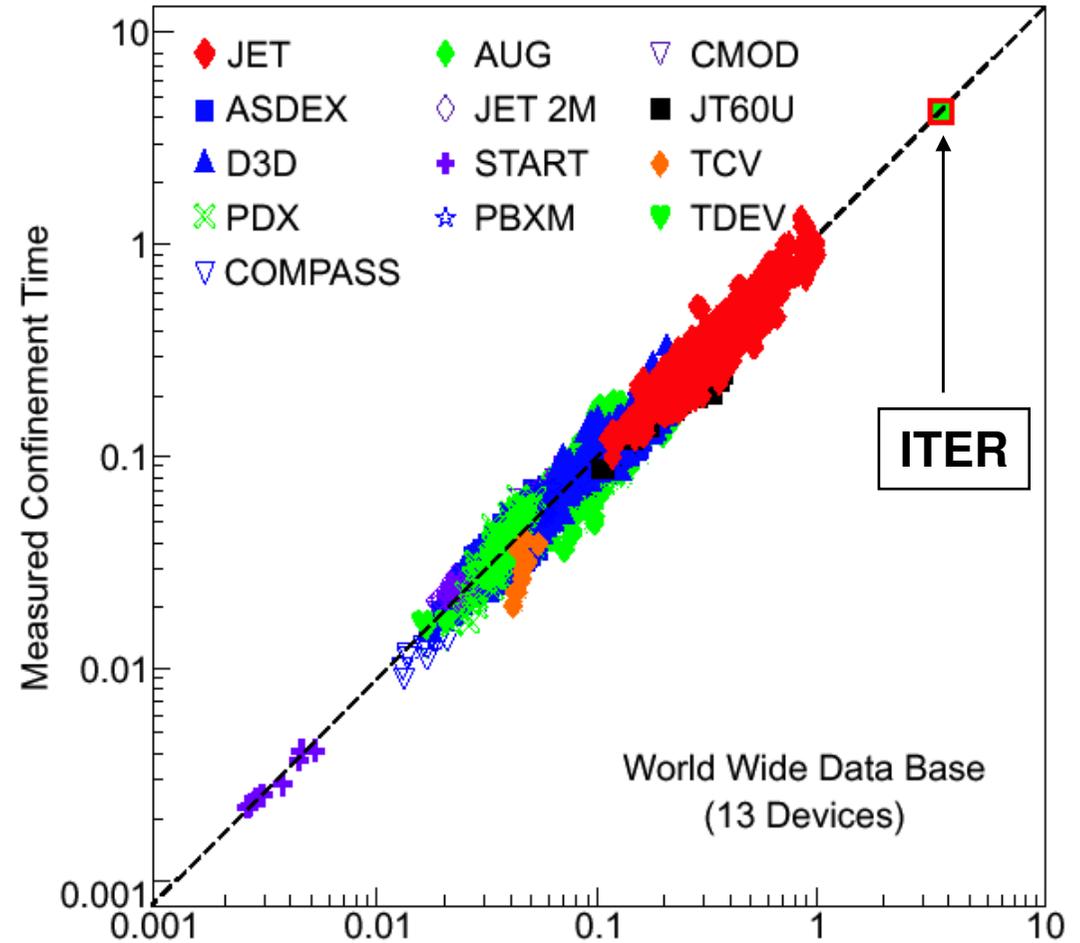
- . D/T, béryllium
- . Télé-manipulation
- . Organisation Européenne depuis 1978, toujours en activité

Lois d'échelle du confinement: méthode soufflerie

→ Gyro Bohm → $\omega_c \tau_E \equiv [\rho_*]^{-3}$



Section droite de Tokamaks Européens comparés à ITER

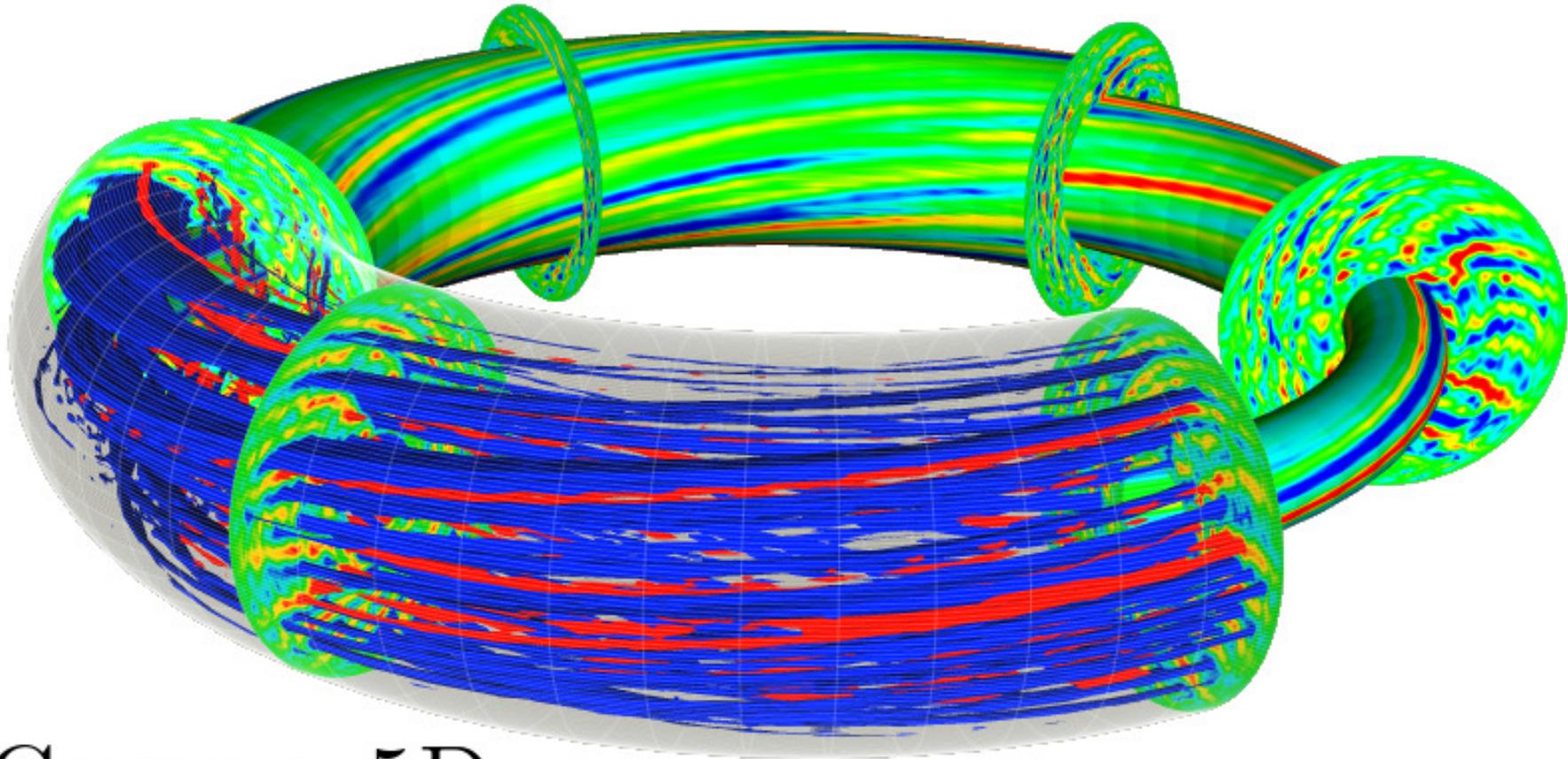


Loi du confinement:

3 paramètres principaux: ρ^* , n^* , β_N

Simulation du transport turbulent

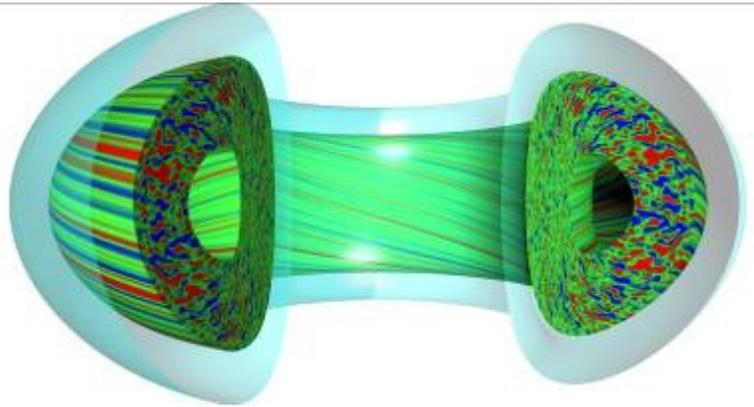
(par la fédération de recherche)



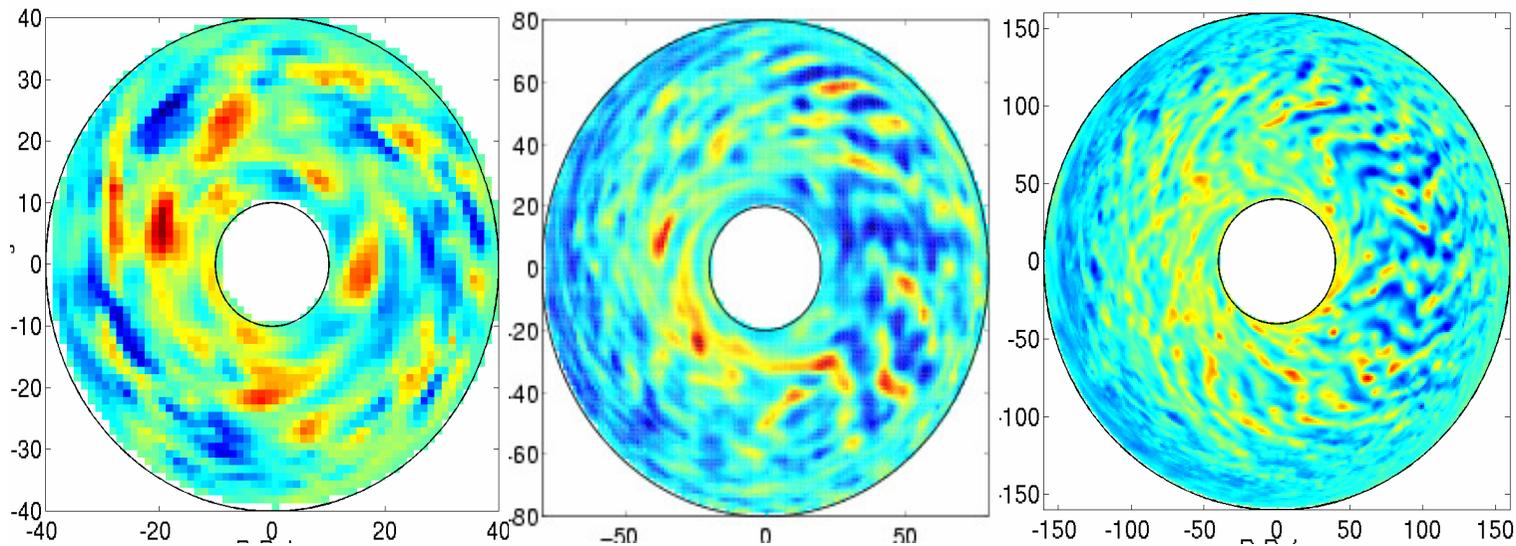
GYSELA 5D

Transport par cellule de convection
Intermittence, effet du cisaillement des flux de matière
Auto-organisation

First principle simulations: also gives the gyro-Bohm scaling law



$$\omega_c \tau_E \equiv [\rho_*]^{-3}$$



$\rho_* = 2 \cdot 10^{-2}$

$\rho_* = 10^{-2}$

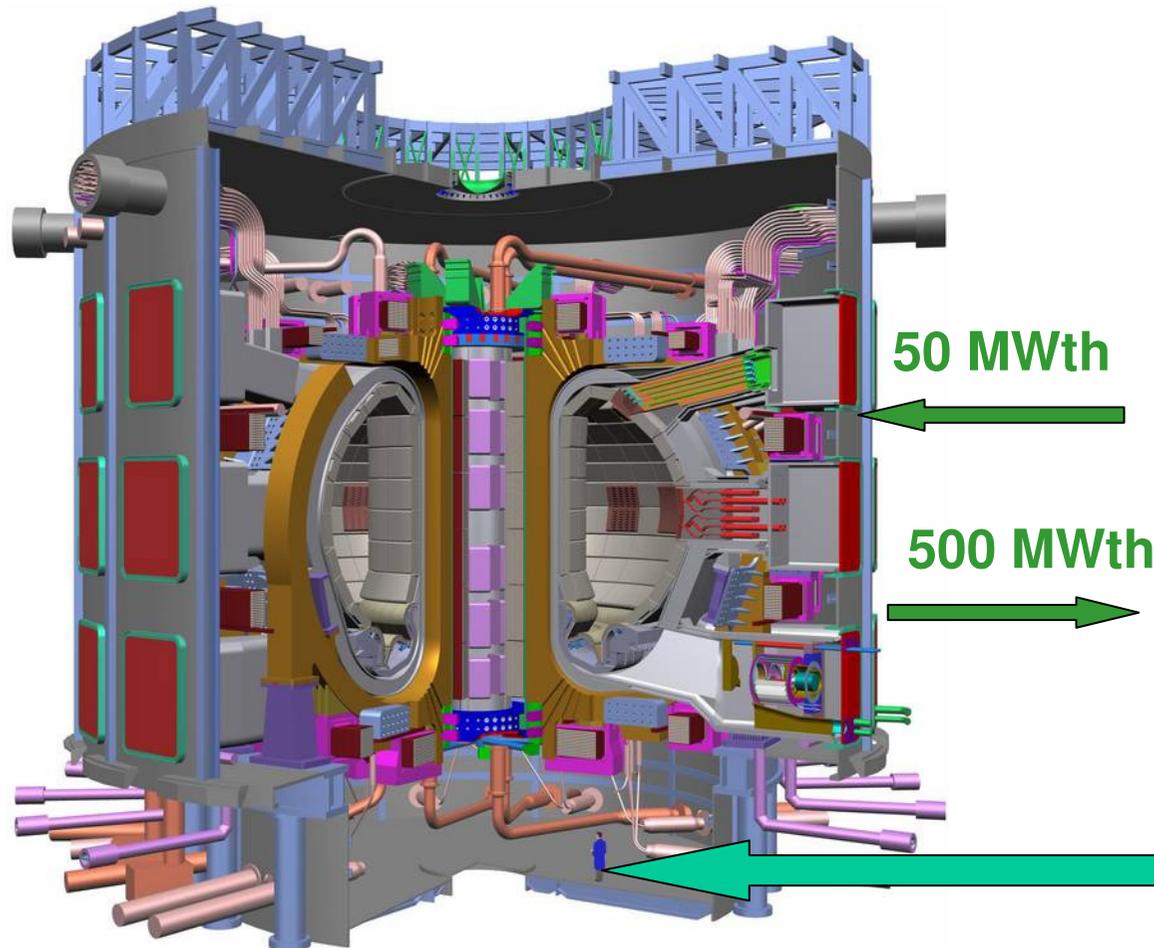
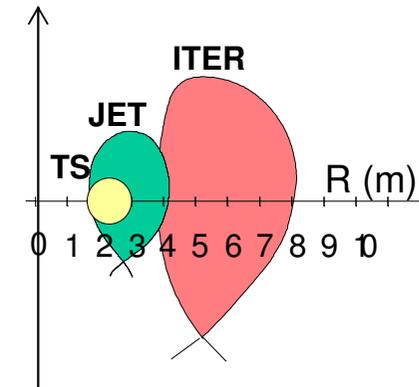
$\rho_* = 5 \cdot 10^{-3}$

$1/\rho_*$

At fixed β and v^*

Objectif d'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

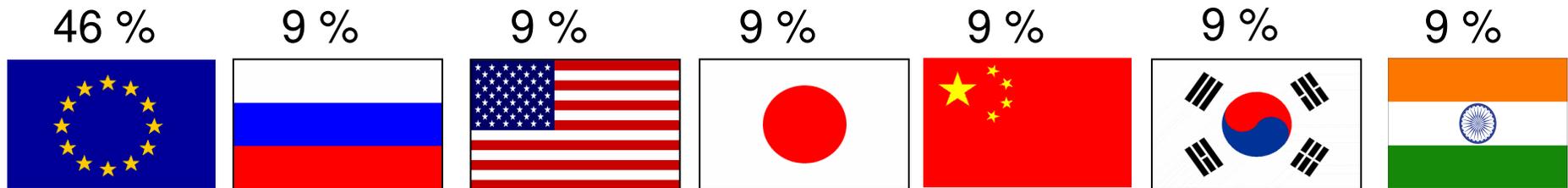
Homo sapiens sapiens

ITER: partage des coûts

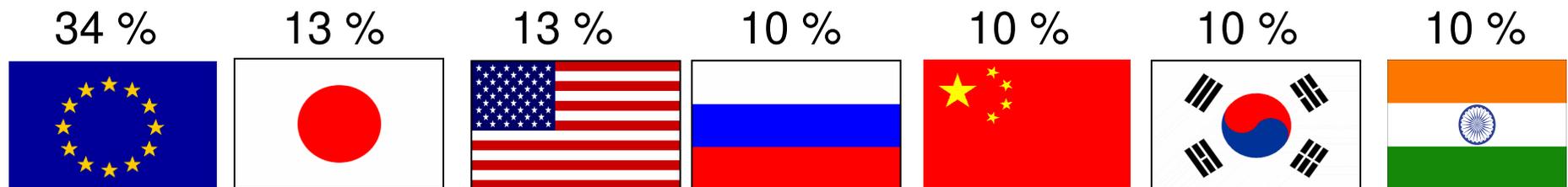
Construction (2010 – 2022): 2,7 Mrd€ pour EU en 2001

Révisé et plafonné juillet 2010 à 6,6 Mrd€ pour EU

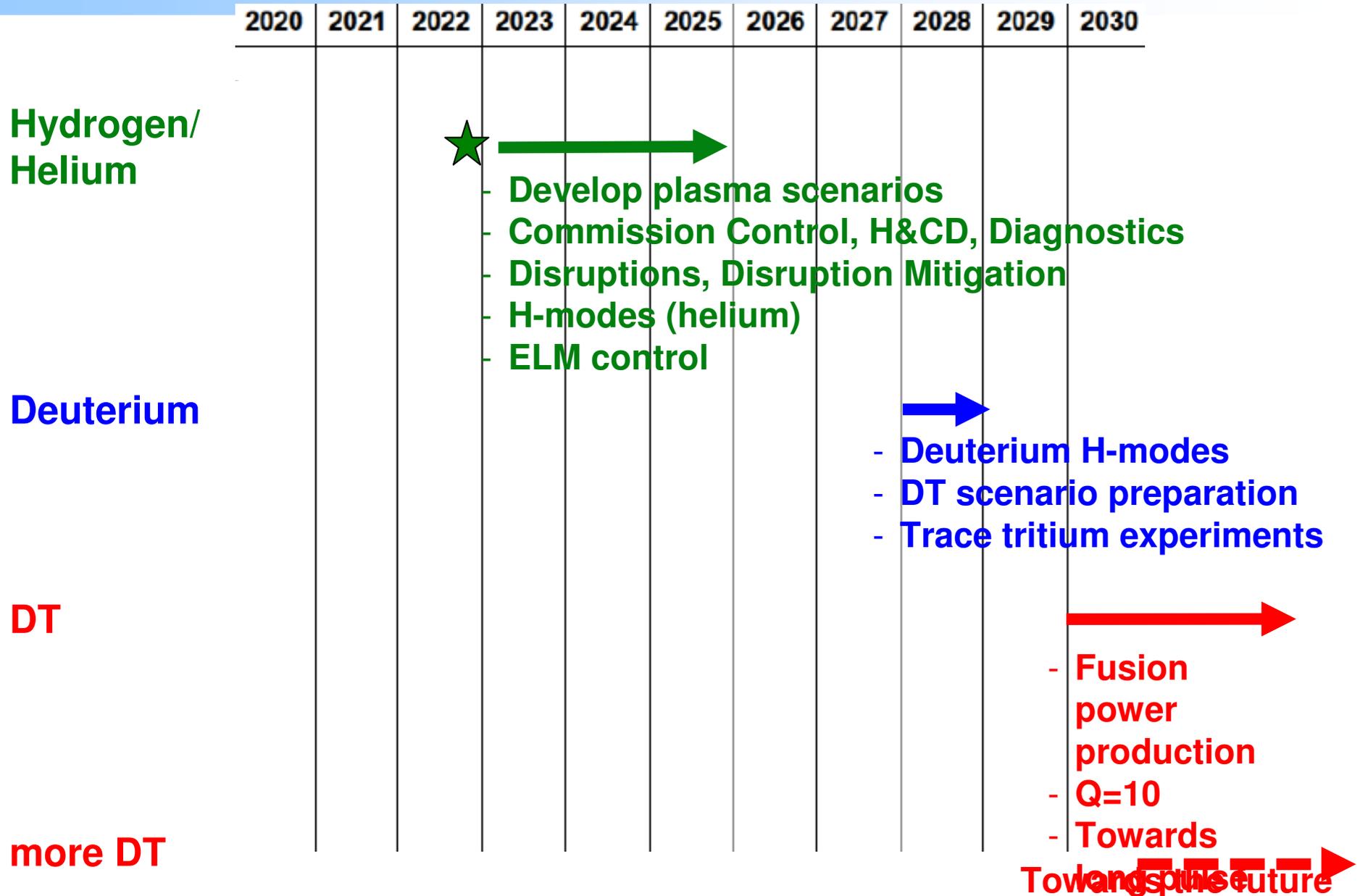
Coordination, design, matières premières, personnel



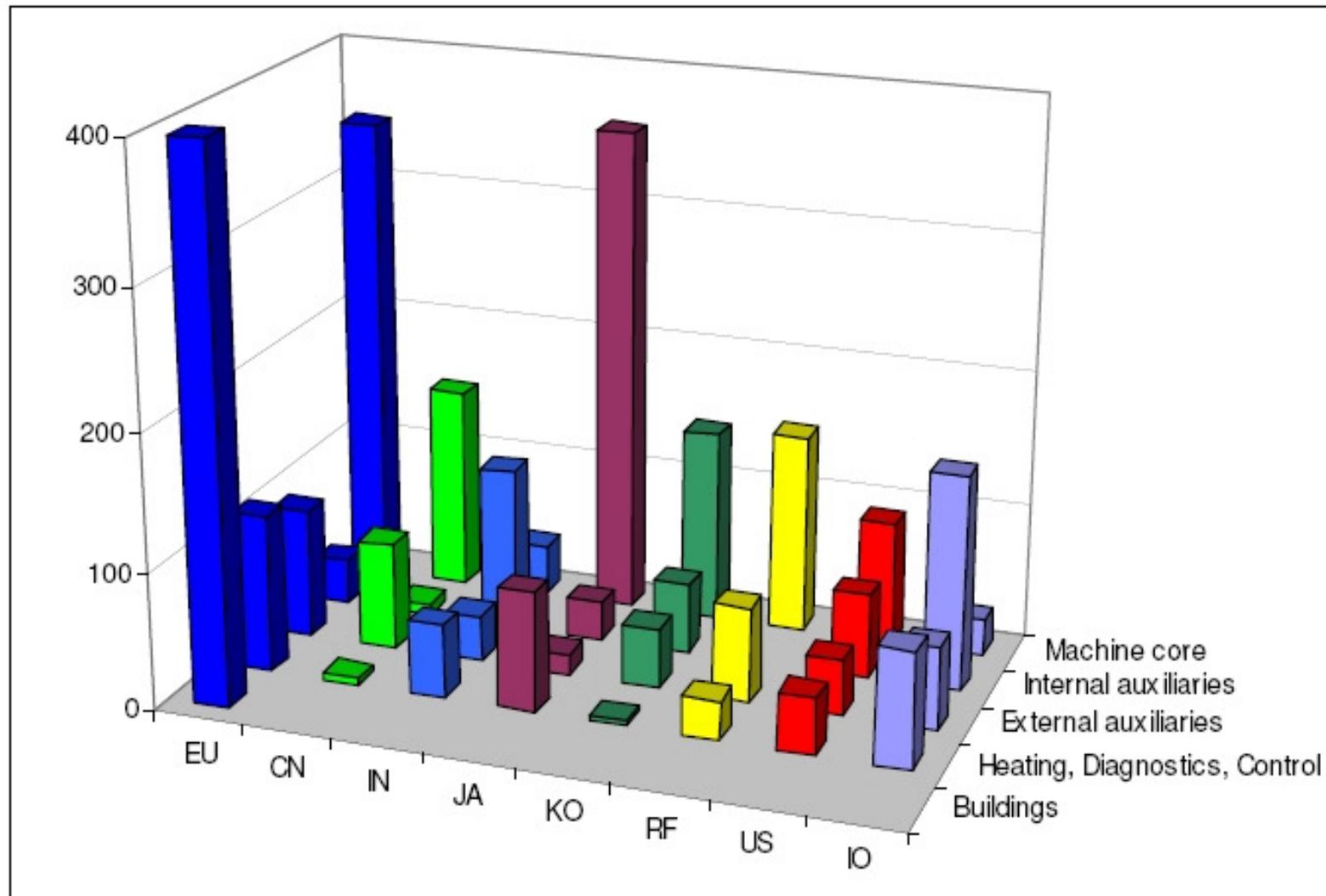
Exploitation >20 ans (2022 – 2042)



ITER Research Plan – Structure

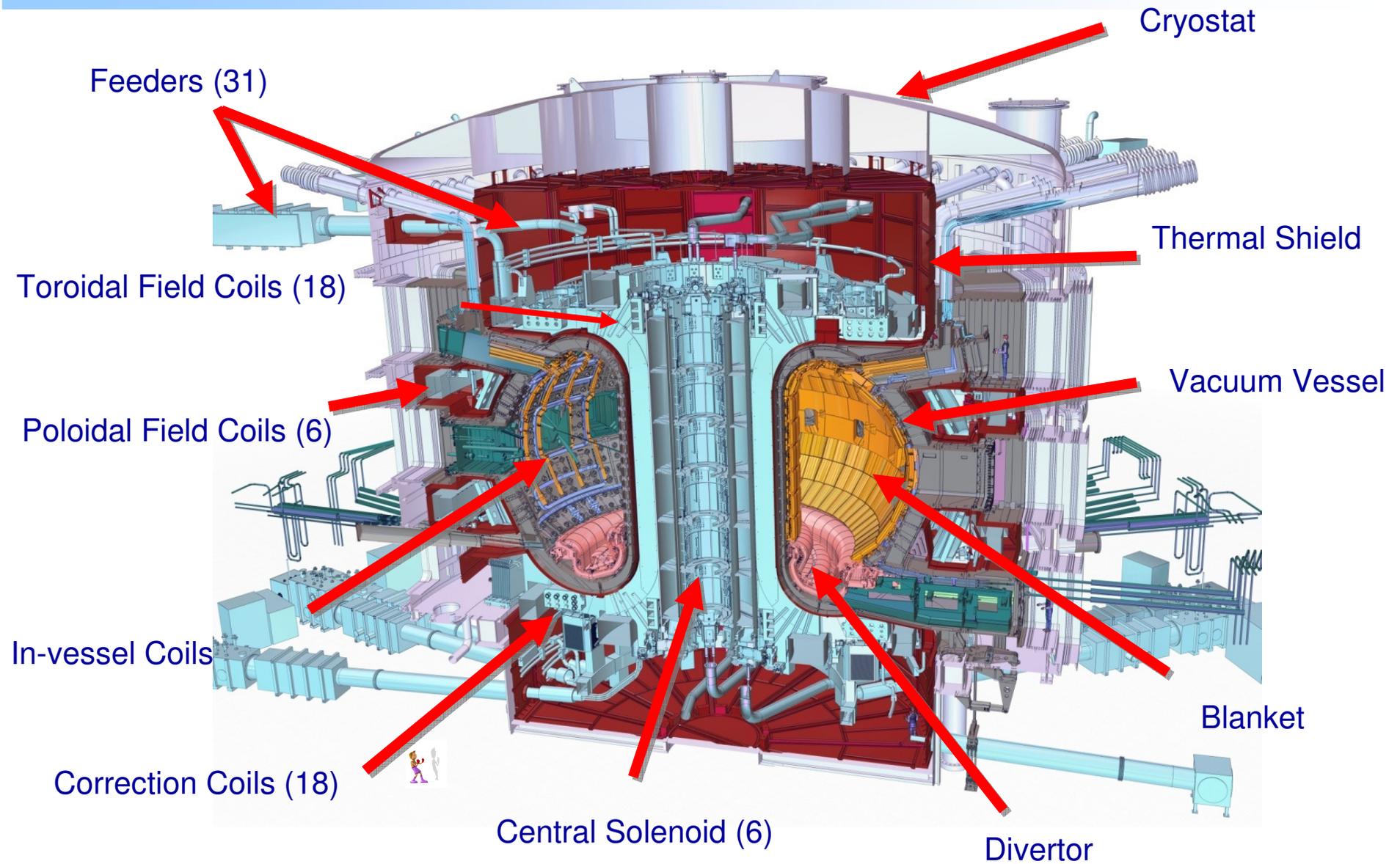


Contributions en nature des 7 partenaires



Chacun des 7 partenaires doit fournir une partie de la machine

ITER Tokamak

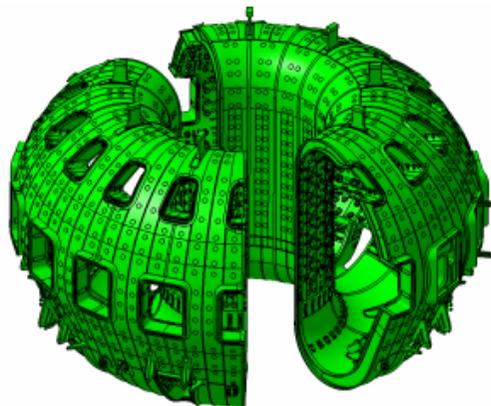


Fourniture de la chambre à vide

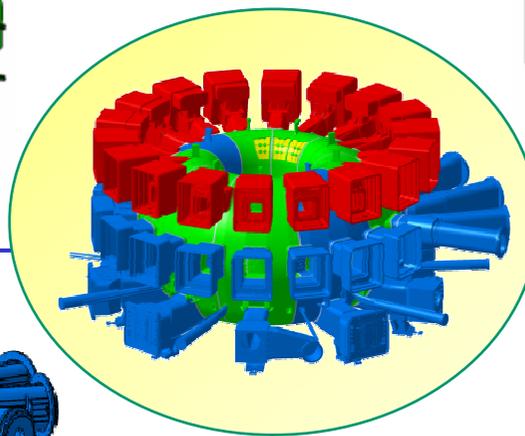
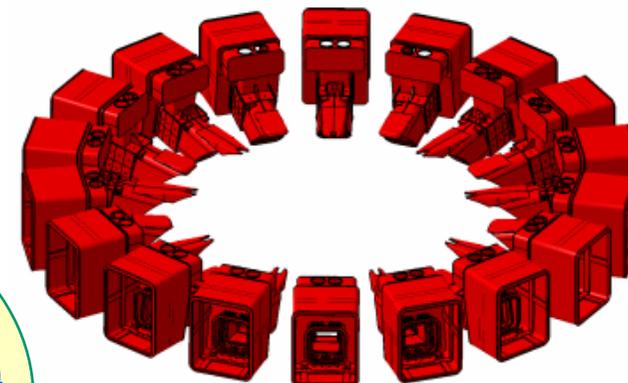
Bak et al



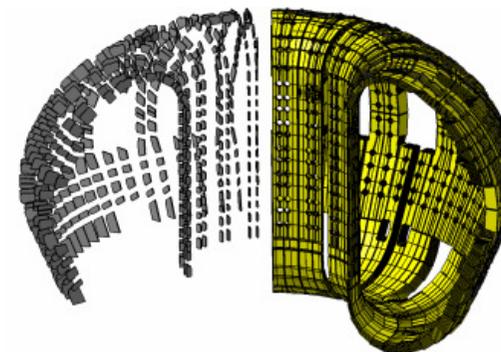
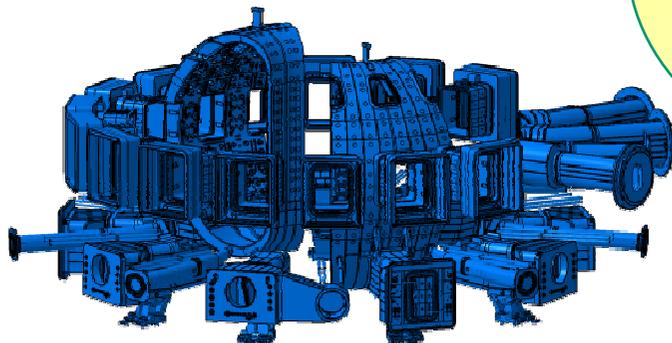
EU	Description
Items	7 Sectors of Main Vessel
Total Cost	92.06 kIUA (39%)



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%)



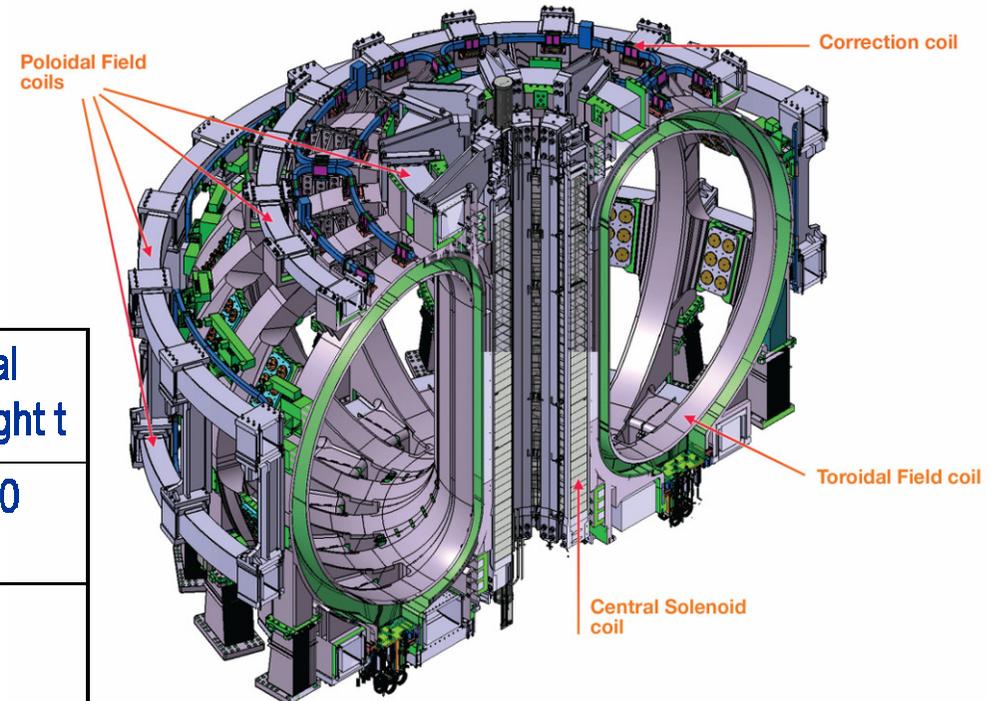
IN	Description
Items	In-Wall Shields/ribs
Total Cost	37.30 kIUA (16%)

Le système magnétique d'ITER

48 bobines supraconductrices 4,5 °K:

- 18 bobines (champ toroïdal)
- 6 modules du solénoïde central
- 6 bobines (champ poloïdal)
- 9 paires champ correctif
- Connexions HTC

System	Energy GJ	Peak Field T	Total MAT	Cond length km	Total weight t
Toroidal Field TF	41	11.8	164	82.2	6540
Central Solenoid	6.4	13.0	147	35.6	974
Poloidal Field PF	4	6.0	58.2	61.4	2163
Correction Coils CC	-	4.2	3.6	8.2	85



Le plus grand aimant du monde

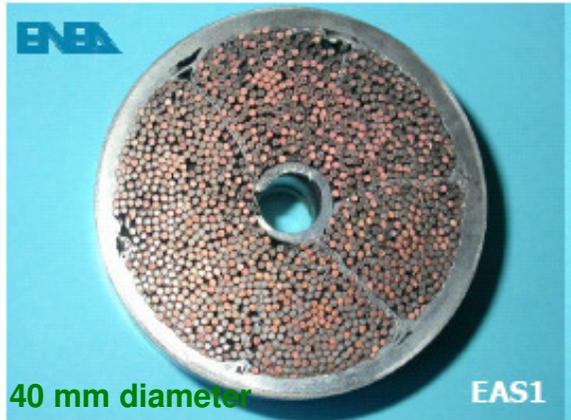
A comparer aux 10.5 GJ d'énergie magnétique dans les 27 km du tunnel du Large Hadron Collider (CERN)

TF Conductor Procurement

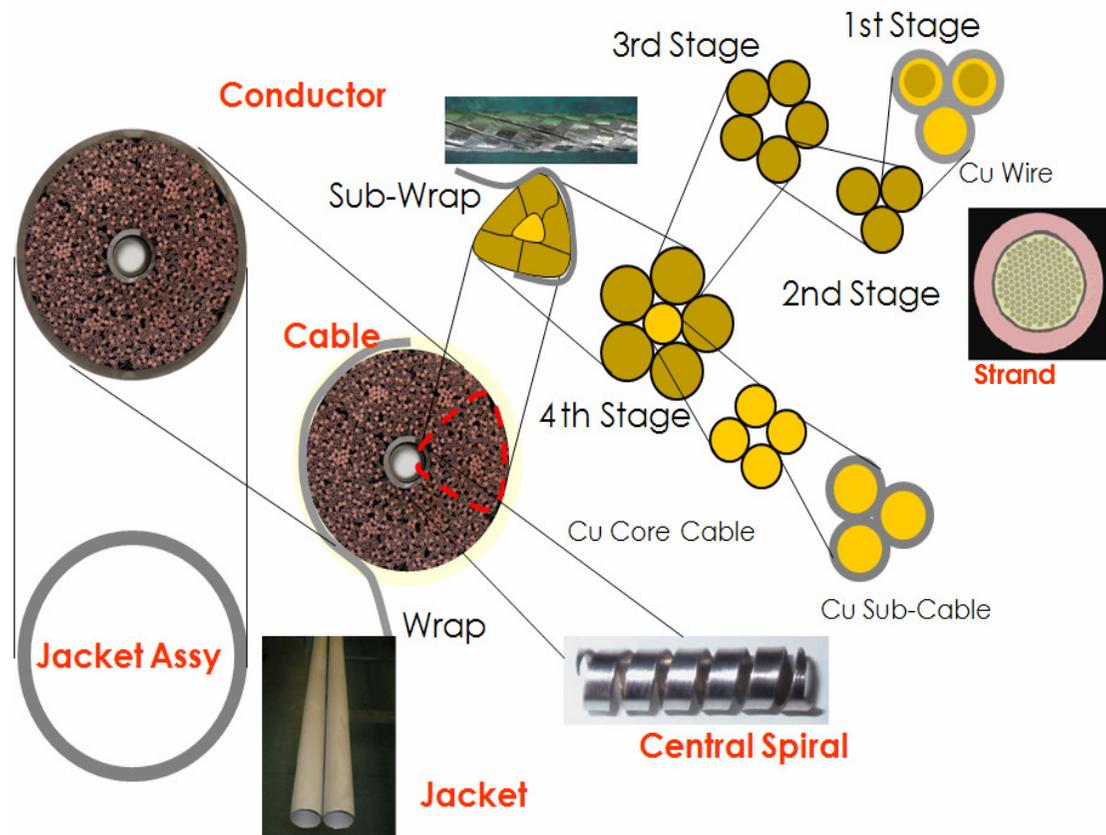
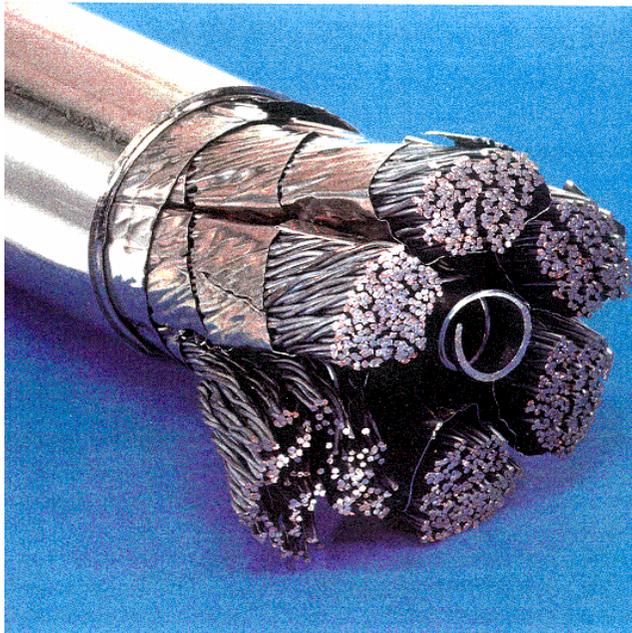
~90 km / 450 t of Nb_3Sn conductor have been manufactured by EU, JA, RF, KO, & US

90% of the needs

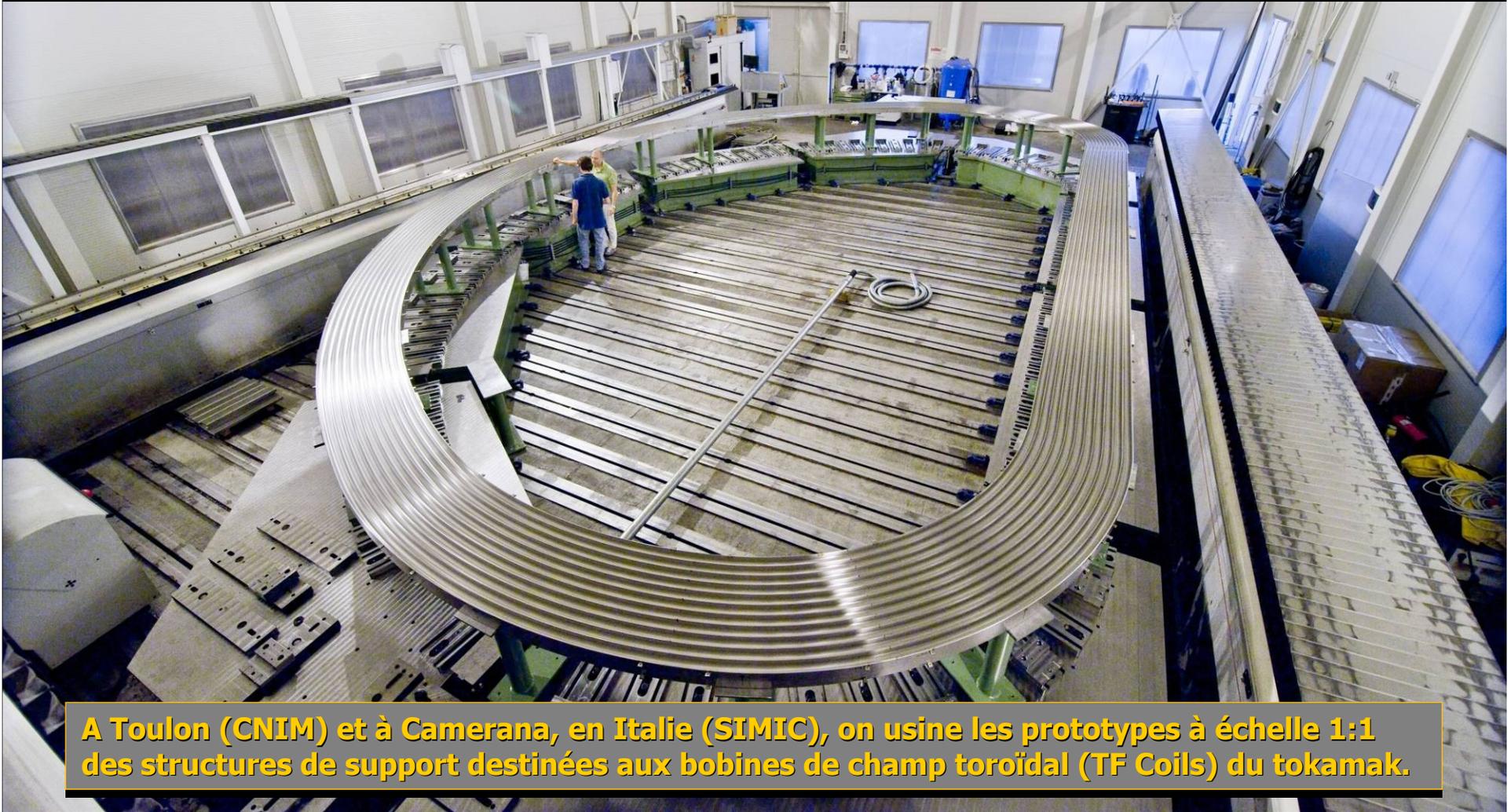
The biggest Nb_3Sn conductor procurement in history



ITER TF Conductor



La production est lancée...



A Toulon (CNIM) et à Camerana, en Italie (SIMIC), on usine les prototypes à échelle 1:1 des structures de support destinées aux bobines de champ toroïdal (TF Coils) du tokamak.

...dans le monde entier

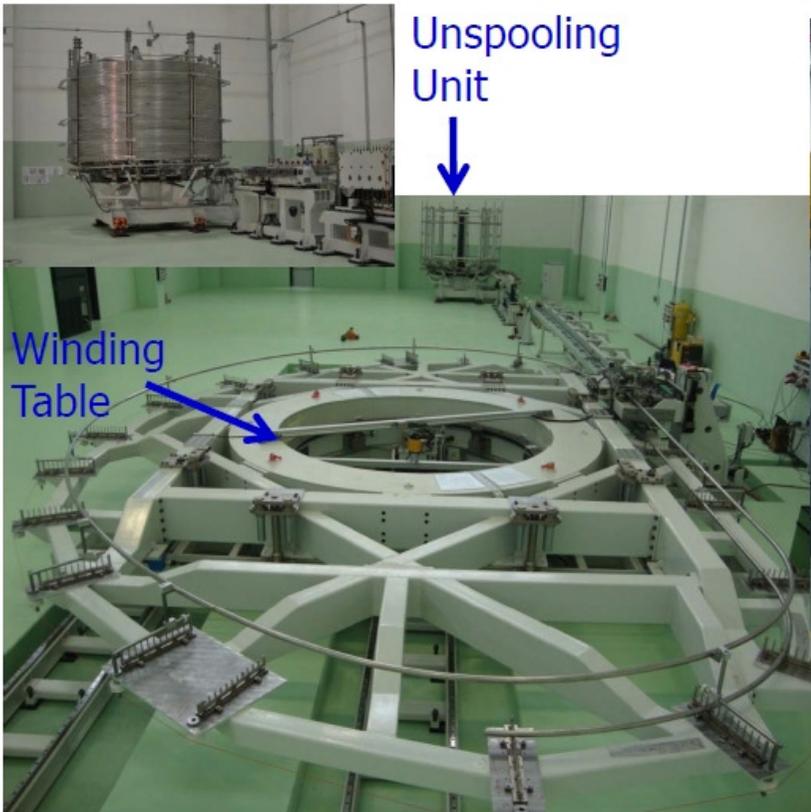


Un des aspects de la contribution russe à ITER: une unité de gainage des câbles conducteurs au centre de recherches JSC VNIKP de Moscou.

Progress on TF Coils: EU – Tooling 1



- EU is commissioning **the winding line**



Unspooling Unit

Winding Table

Winding line at ASG



Heat Treatment Oven at ASG

(Courtesy of
A. Bonito-Oliva, F4E)

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)

ITER site - September 2011



Le chantier progresse



Dans la fosse d'isolation sismique du Tokamak les murs de soutènement ont atteint leur hauteur maximale (15 mètres), le radier est finalisé, et le dispositif antisismique est en place.

Radier inférieur et patins antisismiques

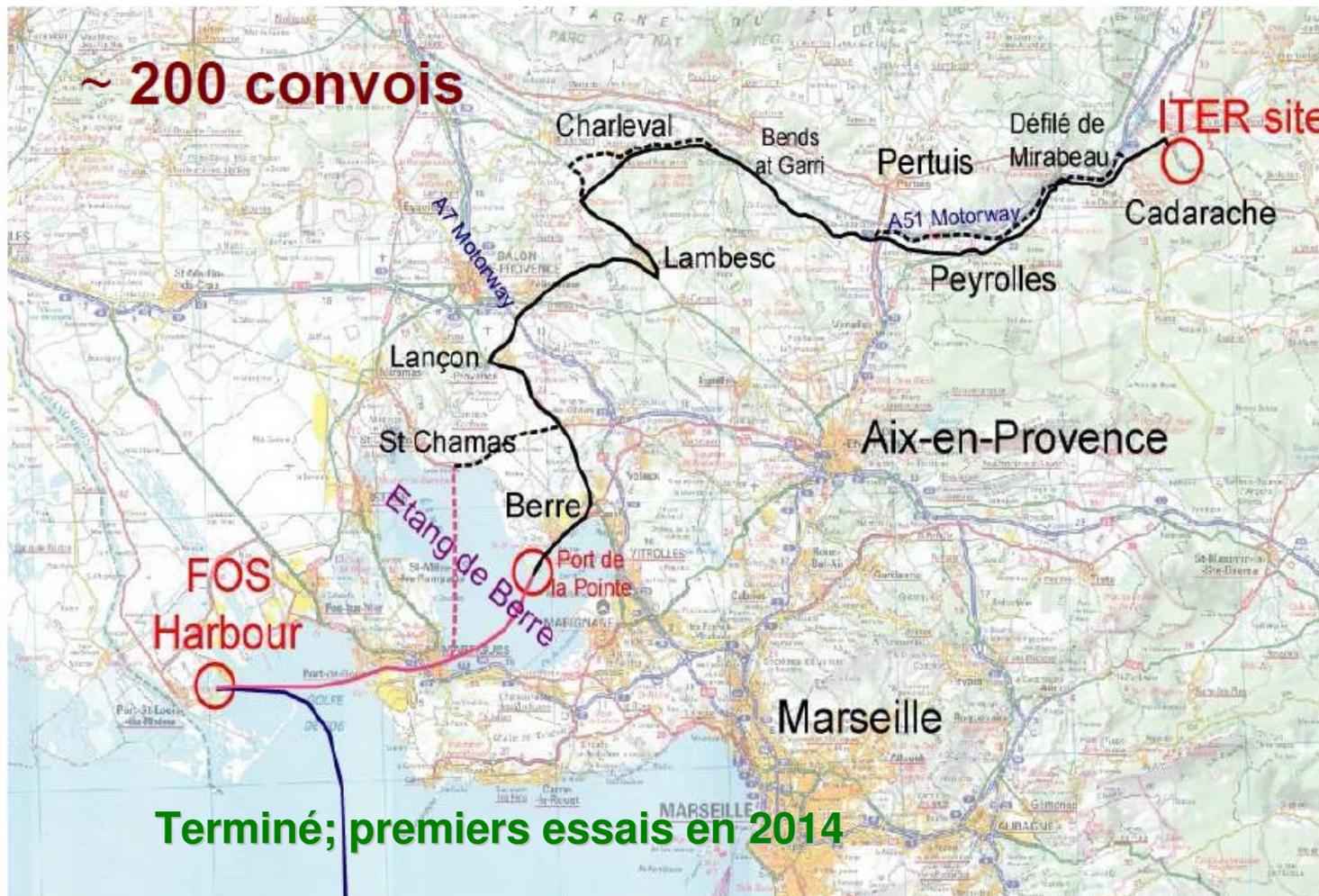


Le chantier progresse



Palonnier et pont-roulant sont installés dans le bâtiment d'assemblage des bobines "PF".

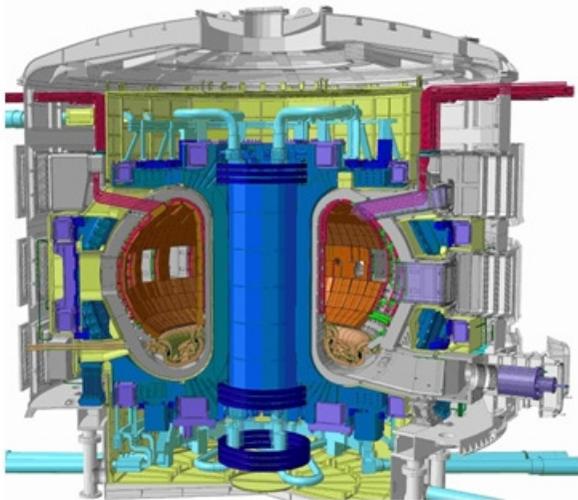
Itinéraire des composants très exceptionnels d'ITER



Un pôle scientifique mondial en France

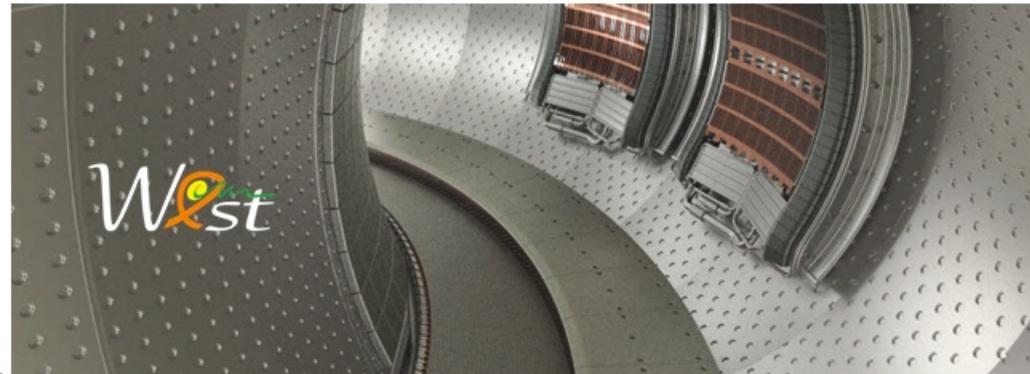
- **Sur ITER à Cadarache:** ~ 500 permanents déjà sur place et > 1000 scientifiques pendant l'exploitation
- **Associés à ITER:**
 - **Universités, CEA, INRIA: Fédération de recherche** labos renforcées ~ 40 labos, 60 équipes et ~ 200 scientifiques
 - **« WEST » (modification de TS) plateforme pour préparer l'exploitation d'ITER (diverteur en W, fonctionnement continu)**
 - **De par le monde:** 6 agences domestiques (une par partenaire); plusieurs milliers de collaborateurs scientifiques
 - **Formation:** voir plus loin

Le CEA se structure pour offrir au tissu scientifique, technique et industriel local une plateforme complète d'accès à ITER:



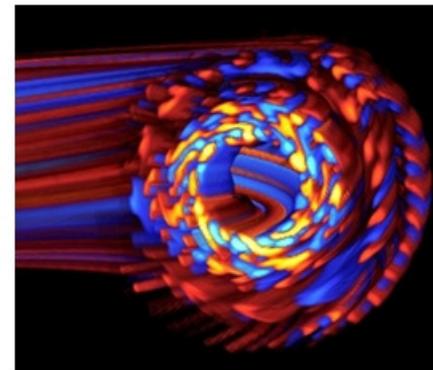
<- Technologies pour ITER

Plateforme Plasmas
Tore SUPRA-WEST->



Projet lancé en début 2013

Modélisation Intégrée
Théorie et Simulation haute performance->
Education et Formation



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

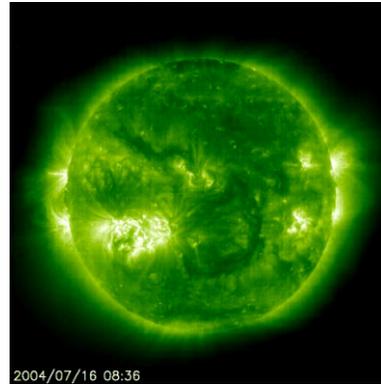
En résumé



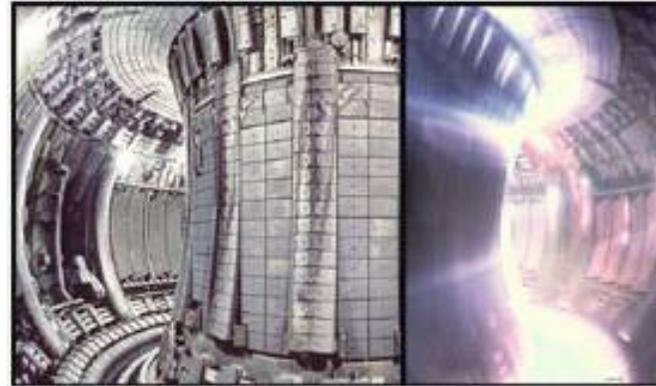
La fusion: une solution long terme
ITER: organisations en place, en construction
Un programme de 30 ans:
retombées scientifiques et économiques en France!

Comment faire la fusion?

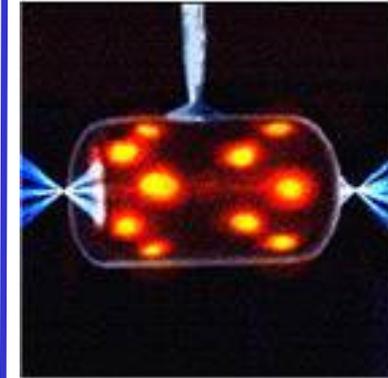
Soleil



Tokamak (ITER)



Lasers



Confinement:	gravitation :	magnétique :	inertiel :
Dimension:	$1.3 \cdot 10^9 \text{ m}$	$\sim 10 \text{ m}$	$\sim 10^{-2} \text{ m}$
Durée:	$\sim 5 \cdot 10^9 \text{ années}$	400 s / continu	10^{-8} s
Pression:	10^9 atm	2 atm	10^{11} atm

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

- n (densité) = $10^{20} \text{ particules/m}^3 \rightarrow$ facile!

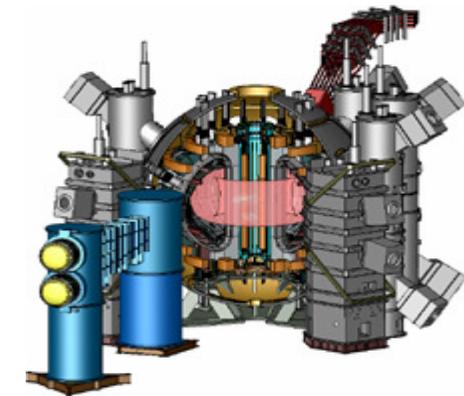
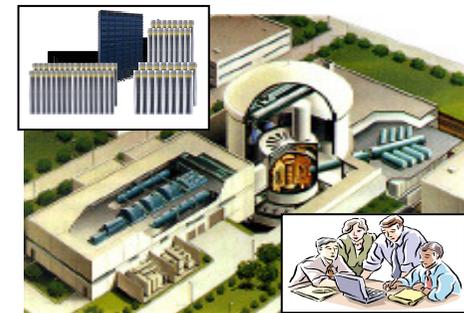
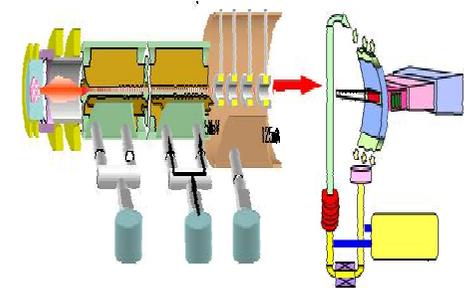
- T (température) = 100 millions de degrés \rightarrow démontré!

- τ_E (temps de confinement de l'énergie) = 4 s \rightarrow difficile \rightarrow taille

ITER doit obtenir ces valeurs simultanément pour la 1^{ère} fois

Broader Approach Activities (2007-2017) comprise three Projects

- 1) **Engineering Validation and Engineering Design**
Activities for the International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF/EVEDA)
- 2) **International Fusion Energy Research Centre (IFERC),**
 - a) DEMO Design and R&D coordination Centre
 - b) Computational Simulation Centre
 - c) ITER Remote Experimentation Centre
- 3) **Satellite Tokamak Programme**
Participation to upgrade of JT-60 Tokamak to JT-60SA and its exploitation.

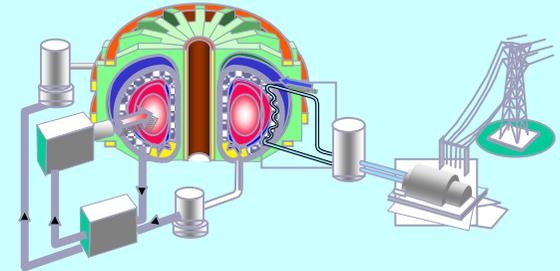


Broader Approach for Realization of Fusion

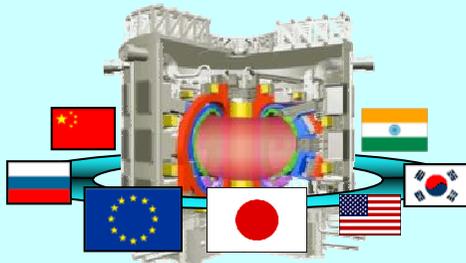
- (1) Taking Initiative of Fusion Research
- (2) Development of Fundamental Fusion Technology
- (3) Human Resource Development

DEMO

Demonstration of Fusion Power Plant



ITER : Demonstration of Scientific and Technological Feasibility of Fusion Energy



$Q = 10$
DT Burning 300-500s

Broader Approach Activities



Rokkasho, Aomori

IFERC

IFMIF/EVEDA

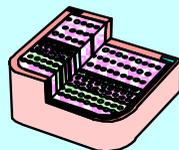
Naka, Ibaraki

Satellite Tokamak



JT-60

$Q = 1.25$
 $T_i(0) = 45\text{keV}$

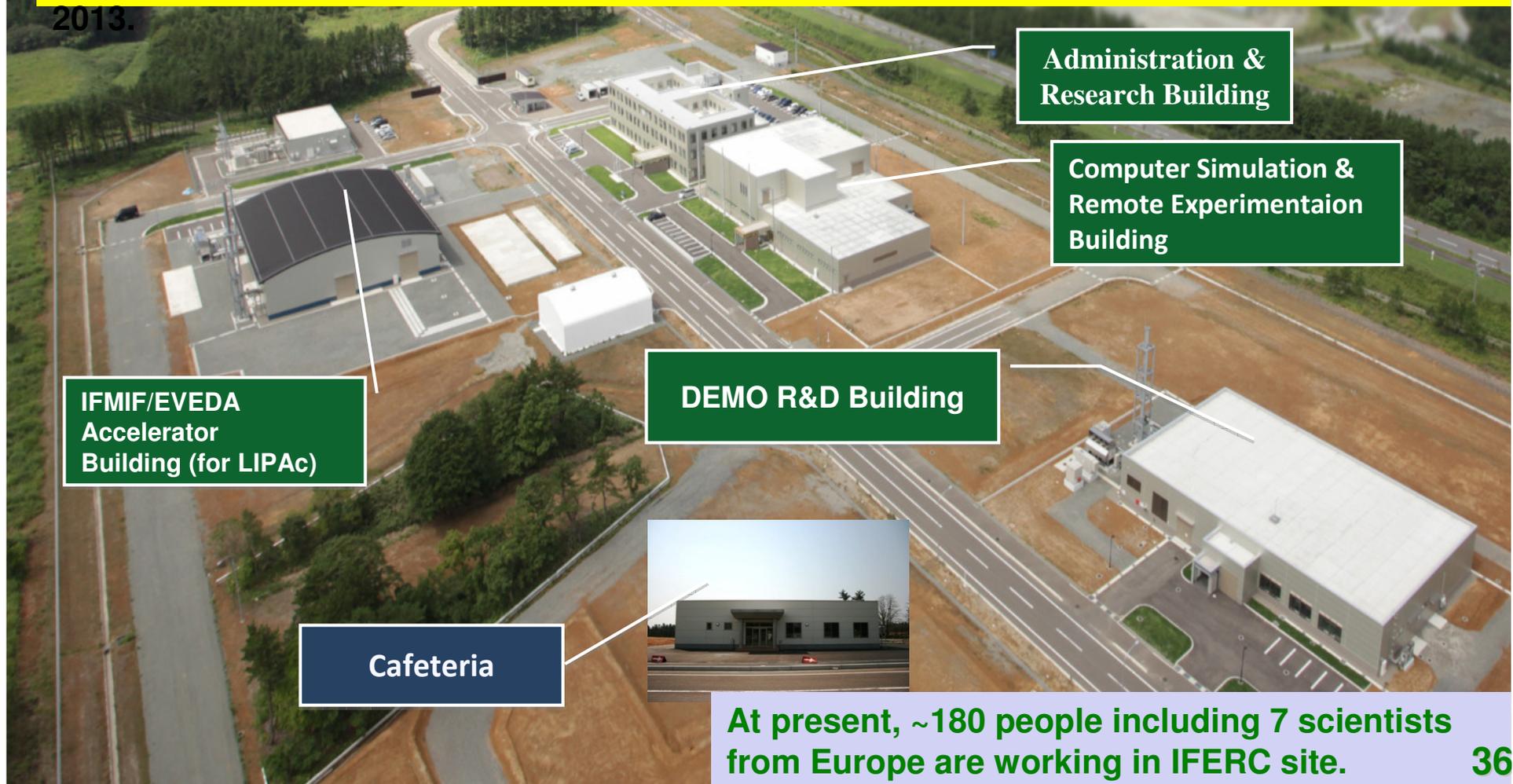


Fusion Technology

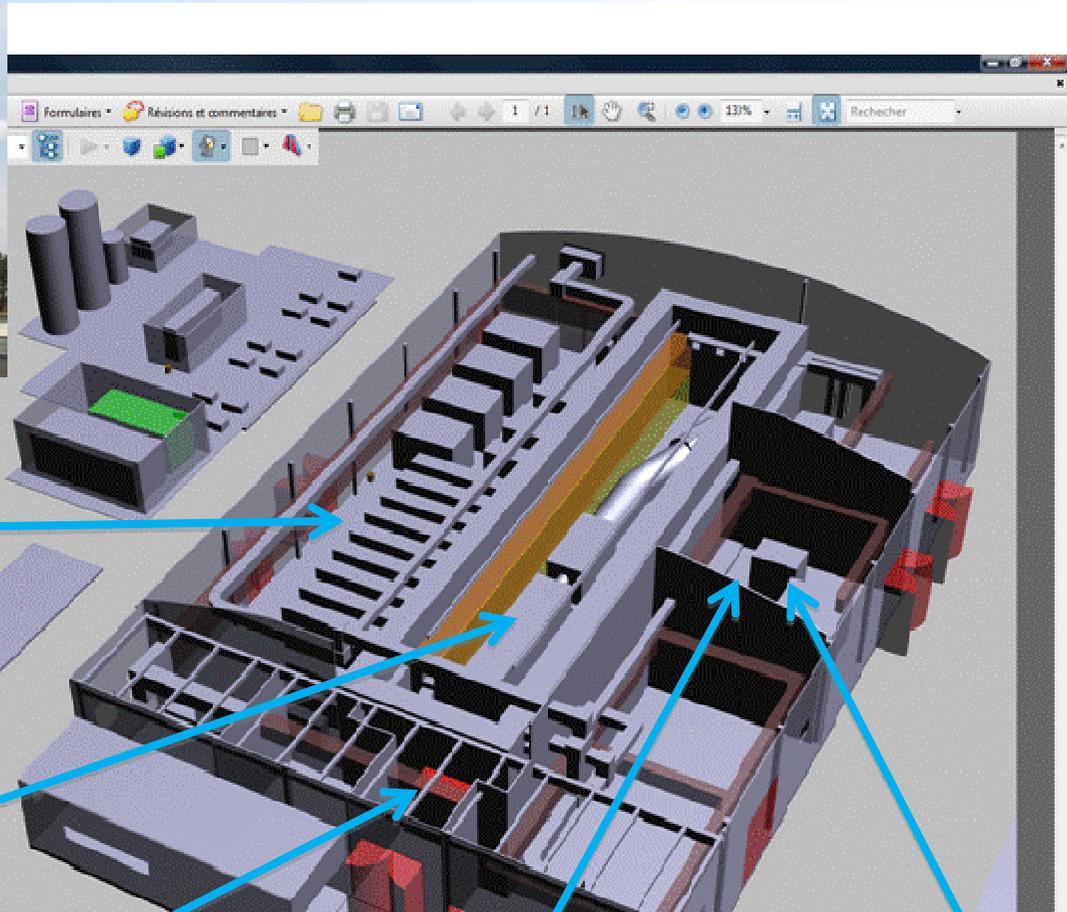
Material Blanket
R&D (Coils, VV, Heating)

International Fusion Energy Research Centre (Rokkasho village, Aomori prefecture)

- All the research buildings have been completed in March 2010.
- Technological R&D on key issues for DEMO reactor is being conducted.
- Supercomputer of 1 Peta flops class was made operational since January 2012.
- Systems of LIPAc (Accelerator prototype for IFMIF) will be delivered and tested from 2013.



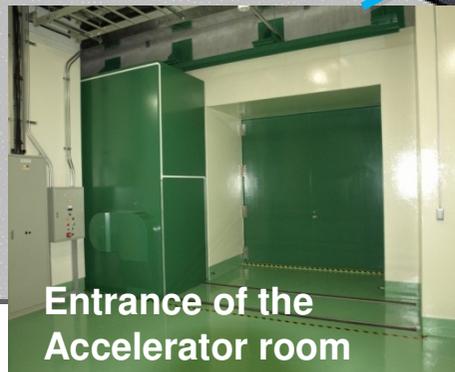
IFMIF/EVEDA Accelerator Building for LIPAc



Power Supply room



Accelerator room



Entrance of the Accelerator room



Contaminated Water Processing System



HVAC room