

ITER : *défis et statut*



Une collaboration scientifique mondiale sans équivalent dans l'histoire

Jean Jacquinot, Lycée Carnot Dijon, 22 mars 2018

Le défi de l'énergie

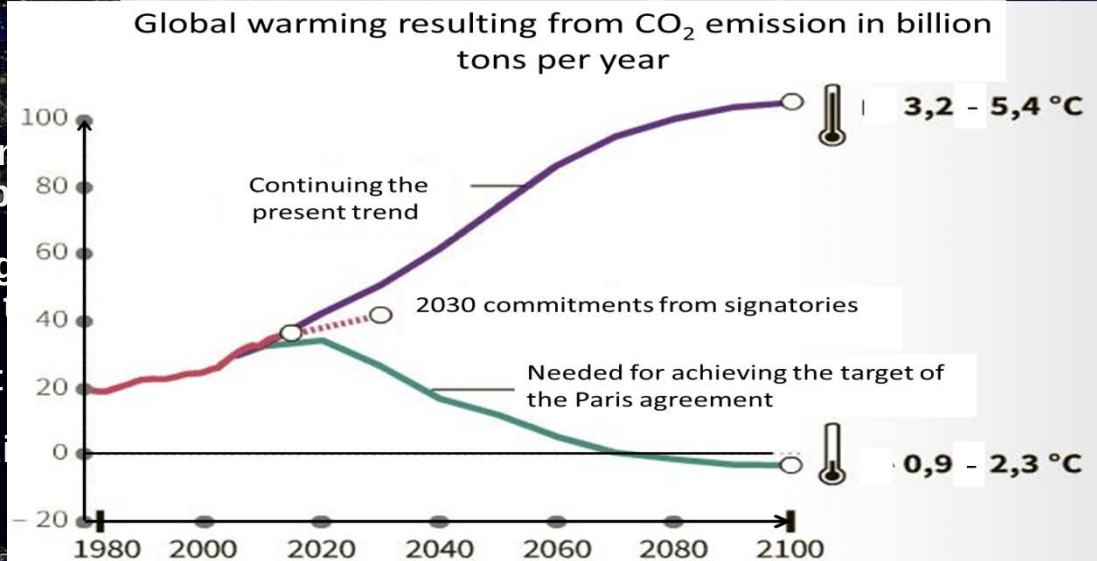
La consommation mondiale d'énergie doit croître de 60 % d'ici 2030.
(International Energy Agency - IEA)

La part de l'électricité en constante augmentation

**Produire massivement de l'énergie
sans générer de CO₂**

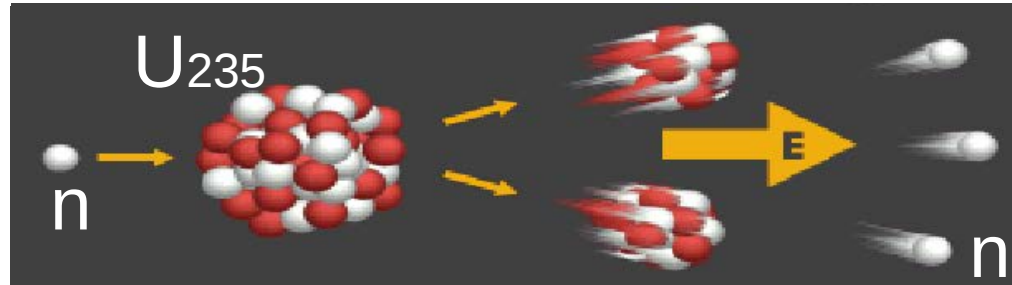
Les options pour le futur:

- **Combustibles fossiles:** épuisement inéluctable; qui reste à définir; développer la capacité d'exportation
- **Renouvelables:** développer leur usage; développer les technologies dans la production et le stockage
- **Fission nucléaire:** enjeu de sûreté et de gestion des déchets
- **Fusion:** doit apporter la démonstration technique



Fission / Fusion

Fission
Combustible:
Uranium
solide

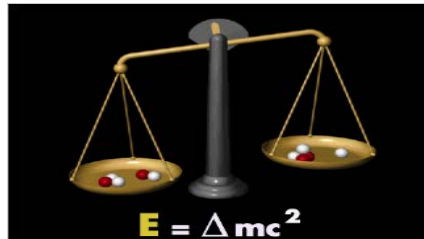


Neutrons
→
réactions
en chaîne

Fusion
Combustible:
hydrogène
gaz



Hélium
maintient la
température
du gaz

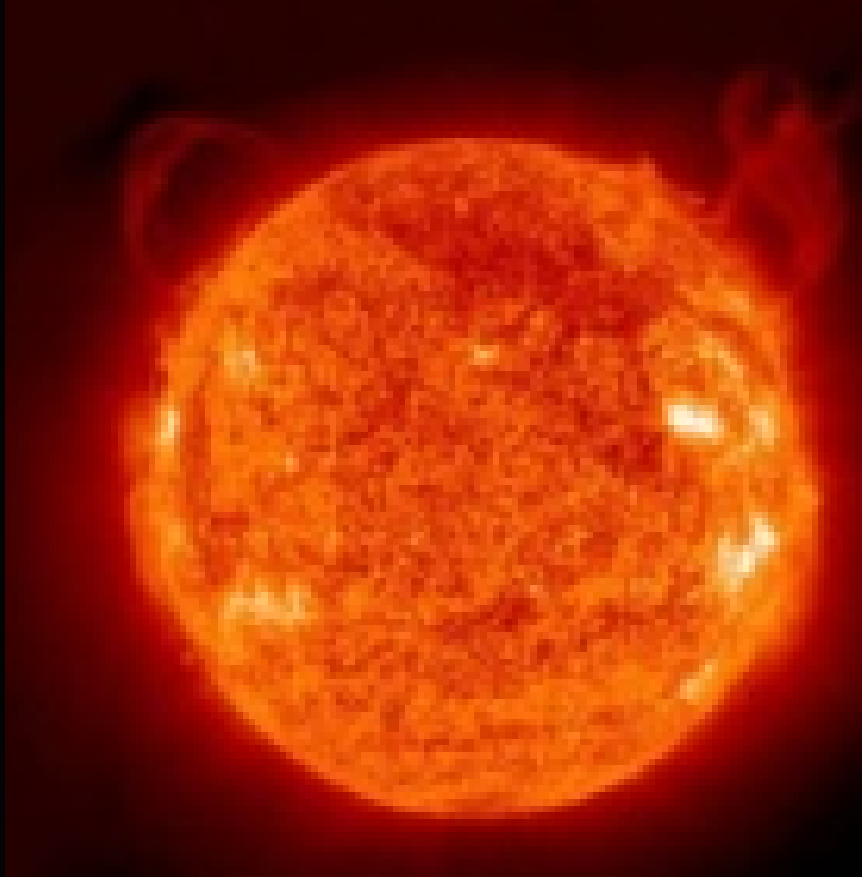


Combustible de la fusion: deutérium et tritium

Deutérium: se trouve dans les océans

Tritium: fabriqué in situ à partir du Lithium

→ Confiner un gaz porté à 100 millions de degrés



Hans Bethe
CNO 1938

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

Fusion: énergie concentrée et propre

Un gramme de D/T= 8 tonnes de pétrole!

Réserve illimitée!

Pas de CO₂

Pas de déchets de haute activité à vie longue

Pas de possibilité d'emballlement

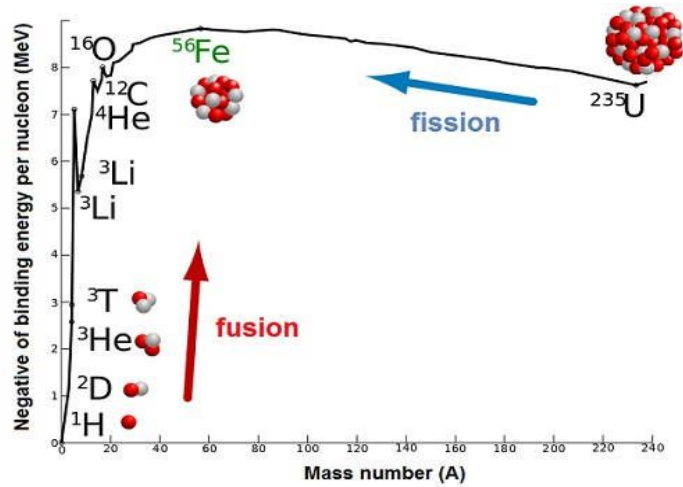
Pas de prolifération

Mais:

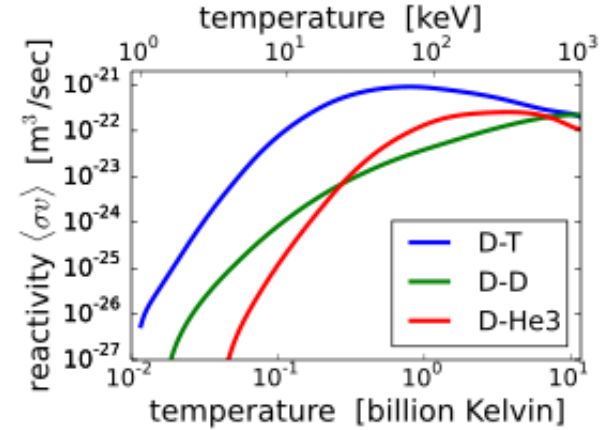
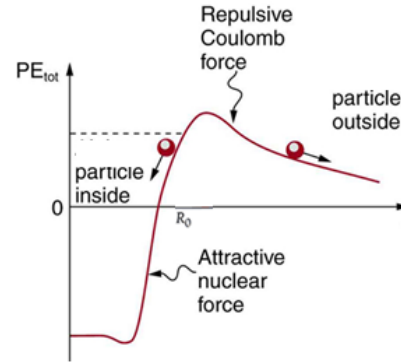
Science compliquée: plasma chaud, matériaux, supraconducteurs

➔ **le risque scientifique en vaut la peine!**

Principes de base de la fusion



Le fer est en configuration d'énergie minimum

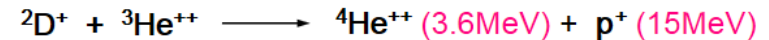
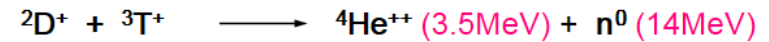
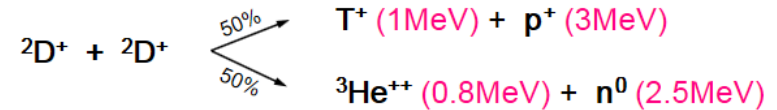


Vaincre la répulsion coulombienne par la température

Ignition si $P_f > P_{\text{perte}}$

$$P_f = E_f \cdot n_D \cdot n_T \cdot \langle \sigma v \rangle ; P_{\text{perte}} = W / \tau_E ; W = 3 \cdot n_D \cdot n_T \cdot k \cdot T$$

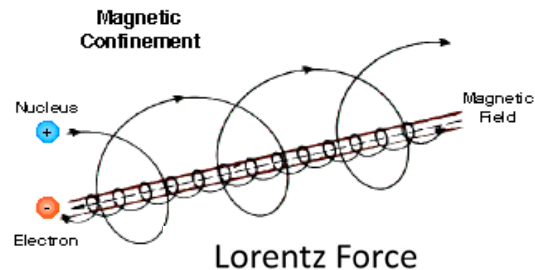
Ce qui donne: **$nT\tau_E > 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s} \sim 1 \text{ bar} \cdot \text{s}$**



La réaction deutérium/tritium est la plus facile

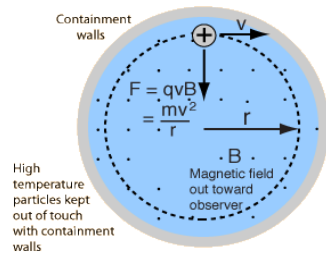
Confinement Magnétique

Charged particles spiral around magnetic fields
They gyrate around the field lines with a small radius



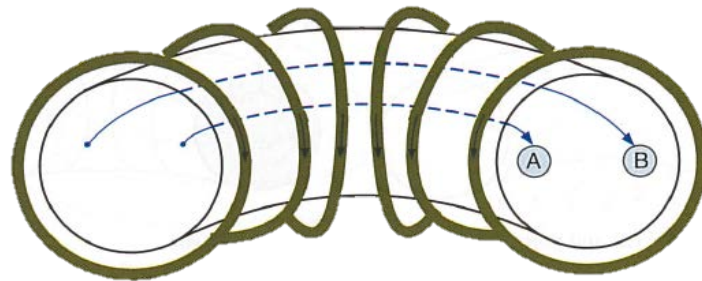
Lorentz Force

$$\underline{F} = \underline{F}_e + \underline{F}_m = q(\underline{E} + \underline{v} \times \underline{B})$$

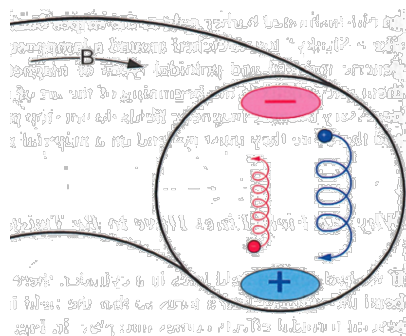
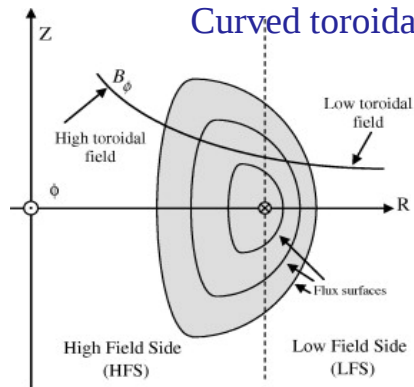


$$\rho = \frac{mv_{th}}{ZeB}$$

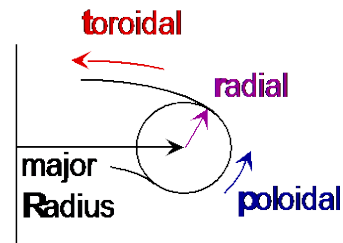
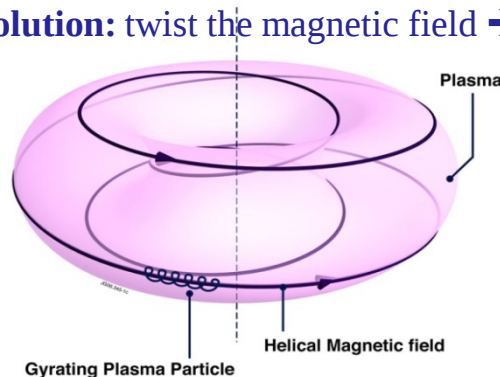
Closed toroidal magnetic field lines to avoid end losses



Curved toroidal fields => vertical drifts



Solution: twist the magnetic field → form magnetic surfaces

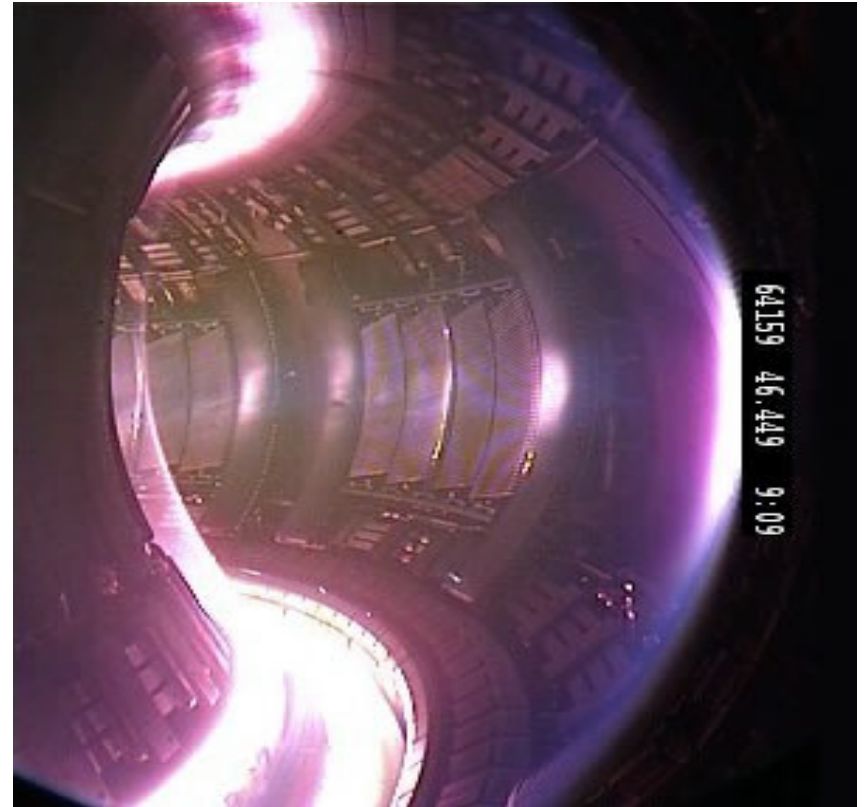
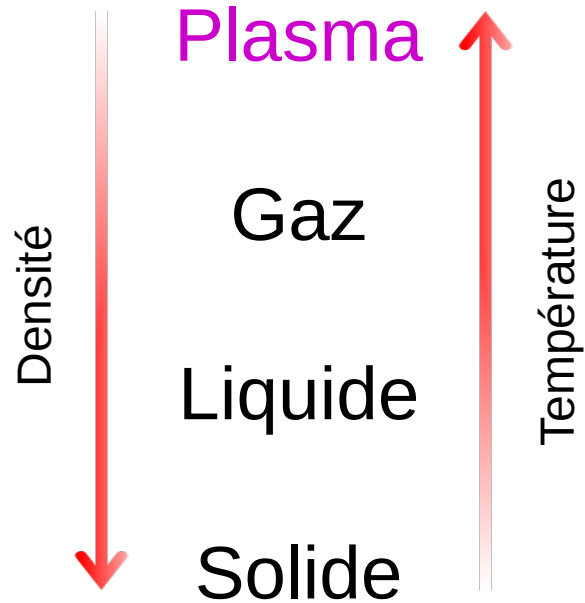


Certains l'aiment chaud...

Plasmas:

4^{ème} état de la matière

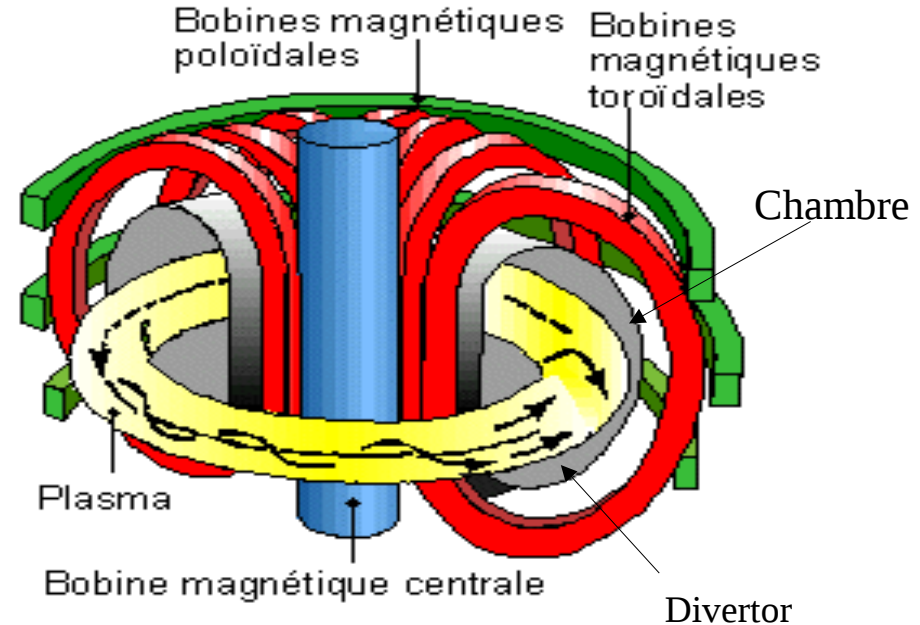
Dominé par les interactions collectives



Plasma de JET

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) = $10^{20} \text{ p/m}^3 \rightarrow$ facile! ($3 \cdot 10^{25}$ dans l'atmosphère)
- T (température) $\geq 10 \text{ keV} \rightarrow$ démontrée
- τ_E (temps de confinement de l'énergie) $\geq 4 \text{ s} \rightarrow$ taille critique

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

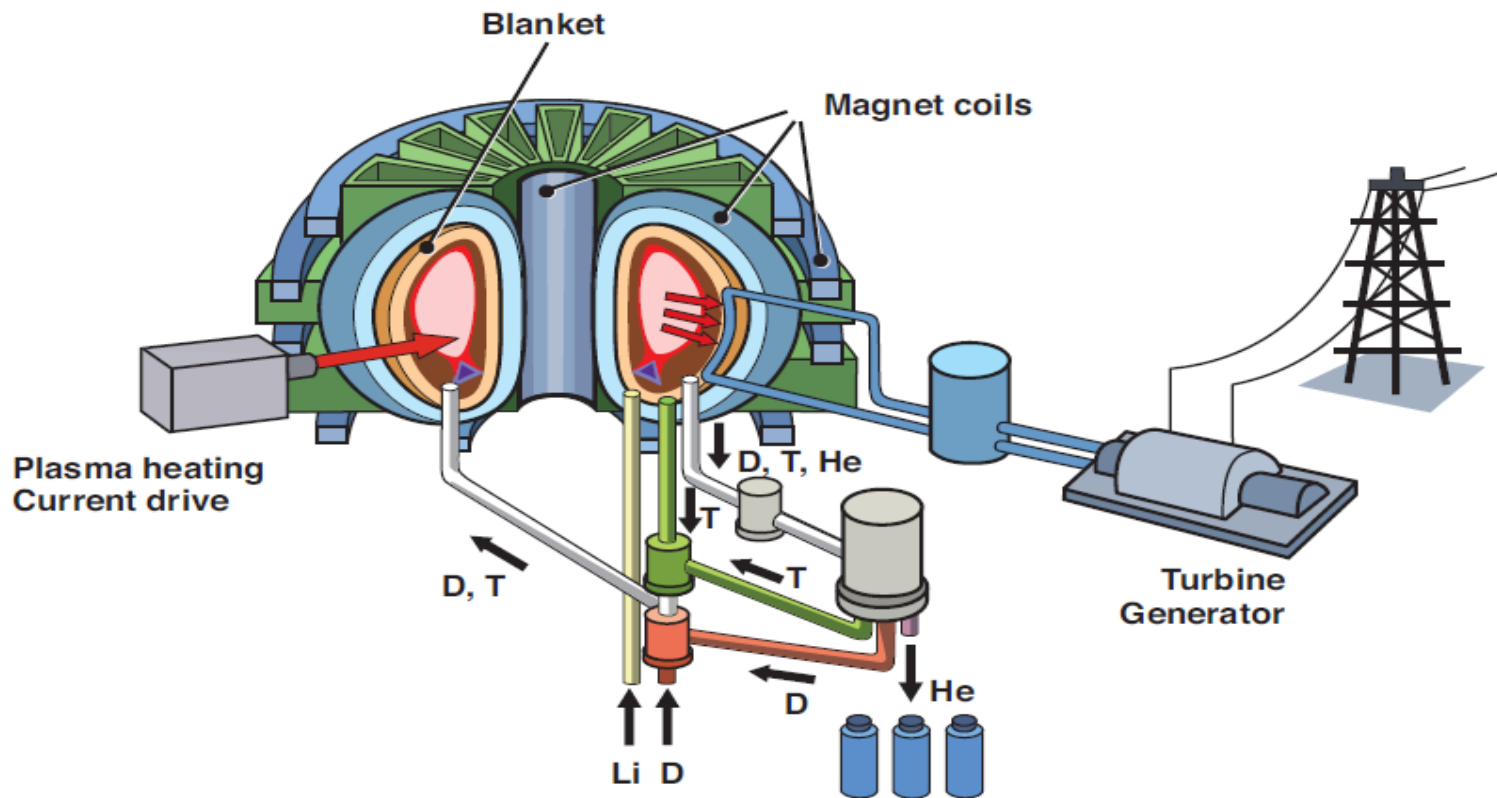
Simulation de la Turbulence dans un Tokamak

- Le transport de l'énergie, τ_E , est dominé par la turbulence
 - simulation des fluctuation de densité dans le tokamak DIII-D (General Atomics, San Diego USA):

DIII-D Shot 121717

GYRO Simulation
Cray X1E, 256 MSPs

Réacteur à Fusion sur la planète Terre



Etapes et enjeux scientifiques

Depuis 1970: progrès ~ 10000 sur $n.T.\tau_E$ et sur la durée des décharges

Gagner encore un facteur 3 à 5 → ITER et Démo + développer les matériaux en parallèle



Nationales

25 m³

~ 0

Q ~ 0

6 minutes

0%



JET

80 m³

~ 16 MW_{th}

Q ~ 1

10 sec

10 %



ITER

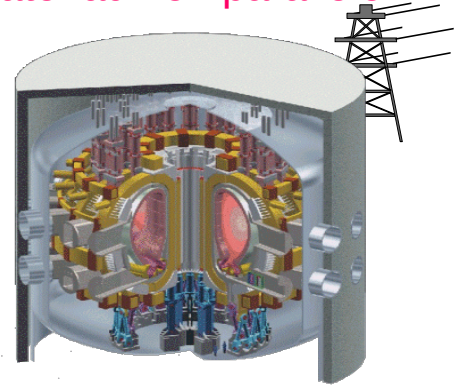
800 m³

~ 500 MW_{th}

Q ~ 10

10' to CW

70 %



DEMO

~ 1000 - 3500 m³

~ 2000 - 4000 MW_{th}

Q ~ 30

CW

80 à 90 %



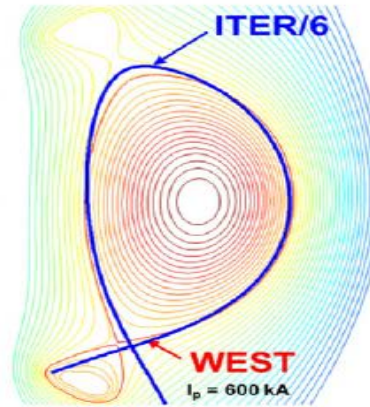
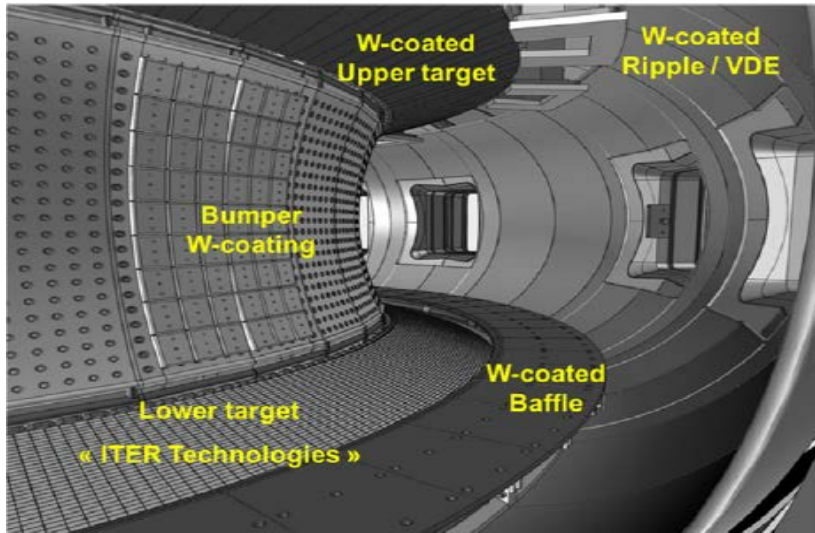
Auto chauffage

Développement sur 3 plans

- **Français:** environ 60 équipes dont Tore Supra (West)
 - **Masters M2 ‘Phys. plasma et fusion’** dans plusieurs Univ et Ecoles d’ingénieurs
 - **Font partie de la Fédération ‘Formation aux sciences de la fusion’**
- **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.

European large Facilities (Euro-forum organisation)

- **Tokamaks:** JET, ASDEX-U, Mast, TCV, WEST etc. **all in operation**
- **Stellarator:** W7X **in operation** since 2016.
- JET preparing for a **new tritium experiment** (2018/19)
- WEST, upgrade of Tore Supra is a new platform for ITER (**started in 2017**)



Tore Supra / WEST

(CEA Cadarache + collaborations)



Supra conducteurs, composants face au plasma
→ longs pulses. Record d'énergie extraite

JET (UE): performance & dimensionnement



Sans plasma



Avec plasma → T requise , 16 MW etc..

Longue maturation...

1988 – 2003:

- Conception par une équipe internationale (EU, US, FR, Japon) → 500MW; Q=10

2003 – 2005:

- Compétition pour le choix du site entre Japon, Canada, France et Espagne
→ gagnée par l'Europe qui choisit

Cadarache

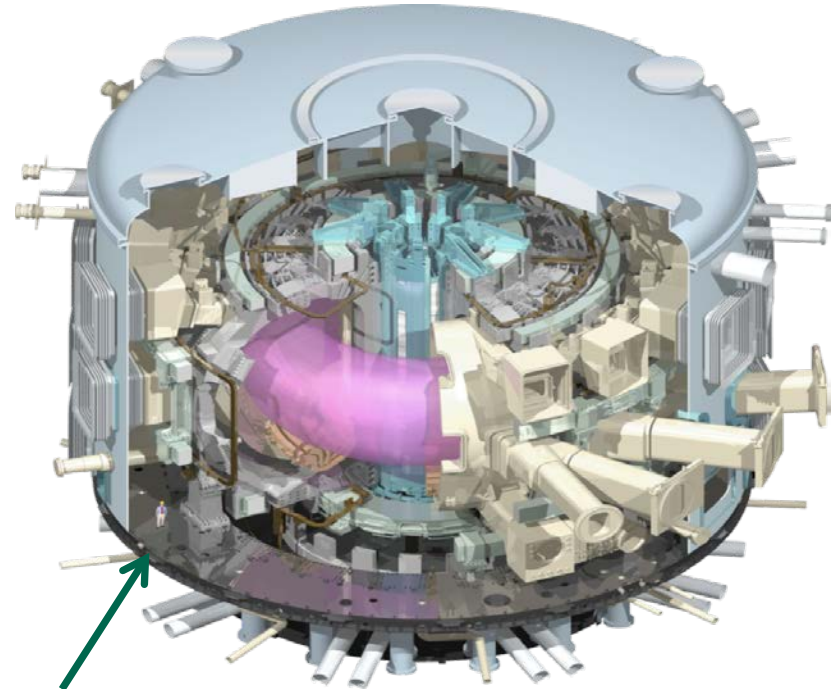
2007:

- Création de ITER organisation internationale à Cadarache

2015:

- Restructuration de l'organisation internationale
→ nouveau DG (l'AG du CEA!)
- Accélération de la construction
→ Arrivée des premiers composants XXL d'ITER de Fos sur Mer à Cadarache

2025: Début de l'expérimentation



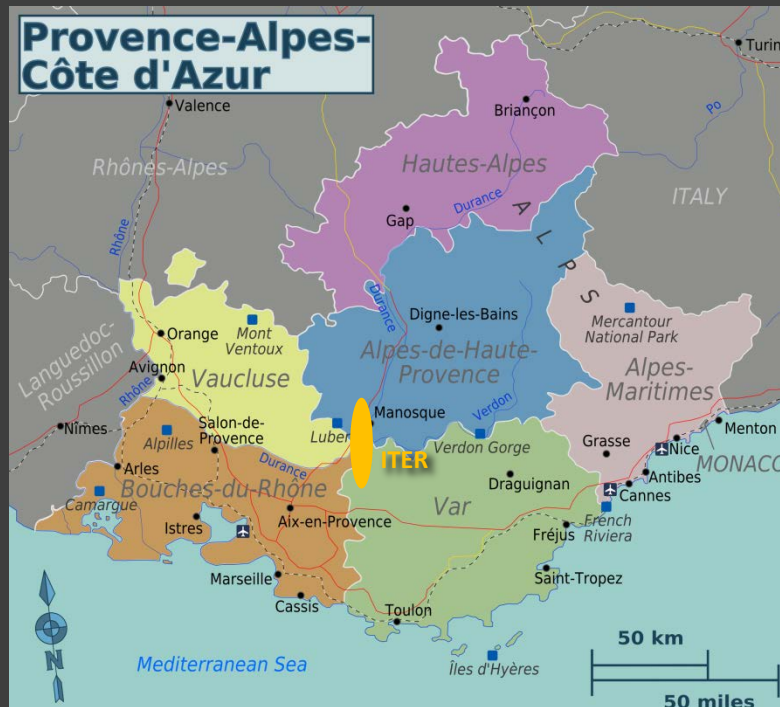
Homo sapiens

Une forte implication des collectivités territoriales

En 2002, les collectivités territoriales de la région PACA se sont engagées à soutenir financièrement le programme ITER.

Au total, elles apportent 467 millions d'euros au programme ITER:

- Région Paca: 152 M€
- Bouches-du-Rhône: 152 M€
- Com. Pays d'Aix: 75 M€
- Var: 30 M€
- Vaucluse: 28 M€
- Alpes-Maritimes: 15 M€
- Alpes-de-Haute-Provence: 10 M€
- Hautes-Alpes: 5 M€



ITER international organization:

Créée en 2007 sur la base d'un traité

7 partenaires, 35 pays; > 2000 employés sur le site

Une équipe centrale, 7 agences domestiques

Fournitures en nature



Directeurs français à ITER



Directeurs d'ITER, phase EDA

A gauche R. Aymar 1994 – 2001

A droite P-H Rebut 1991 – 1994

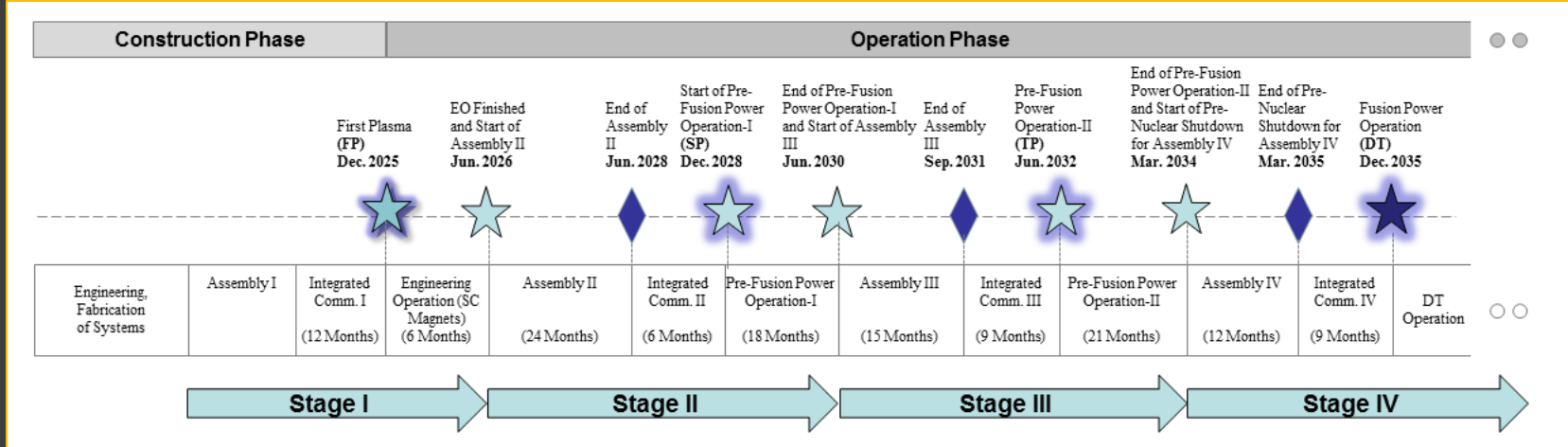


Bernard Bigot, DG d'ITER depuis le 6 Mars 2015

Dessin de *Nature*, Juin 2015

A staged approach to DT plasma

- 4 operational phases with staged introduction of heating power and measurement capability, consistent with Members' budget constraints
- First plasma in 2025; full power in 2035. Total operation time may exceed 20 years



Fournitures en nature

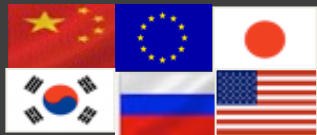
Solénoïde central (6)



Alimentation (31)



Bobines de champ toroidal (18)



Bobines de champ poloïdal (6)



Bobines de correction (18)



Cryostat



Bouclier thermique



Chambre à vide



Couverture



Divertor



Les membres d'ITER partagent l'ensemble de la propriété intellectuelle



Worksite progress

Radiofrequency Heating

Service Bdg.

Cooling System

Assembly Hall

Cryostat Workshop

PF Coil Winding Facility

Cryopant

400 kV Switchyard

~ Machine axis

Bioshield

Tritium Bdg.

Tokamak Bdg.

Diagnostics Bdg.

Magnet Power Conversions Bldgs.

18 January 2018



Hall d'assemblage



Reposant sur 493 plots parasismiques, le complexe Tokamak (440 000 t) compte 7 niveaux dont 2 souterrains.



Bâtiment tokamak



Bâtiment tokamak

Le tokamak

Chambre à vide: $\sim 8\,000$ t.

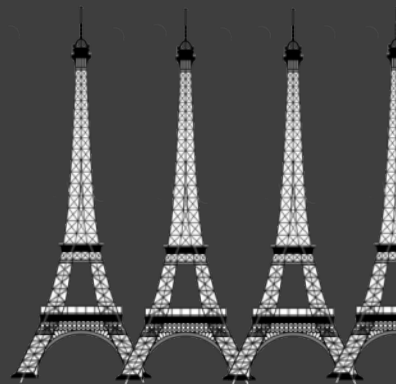
Bobines TF: 18×360 t.

Bobines PF: 6 de ~ 200 à ~ 400 t.

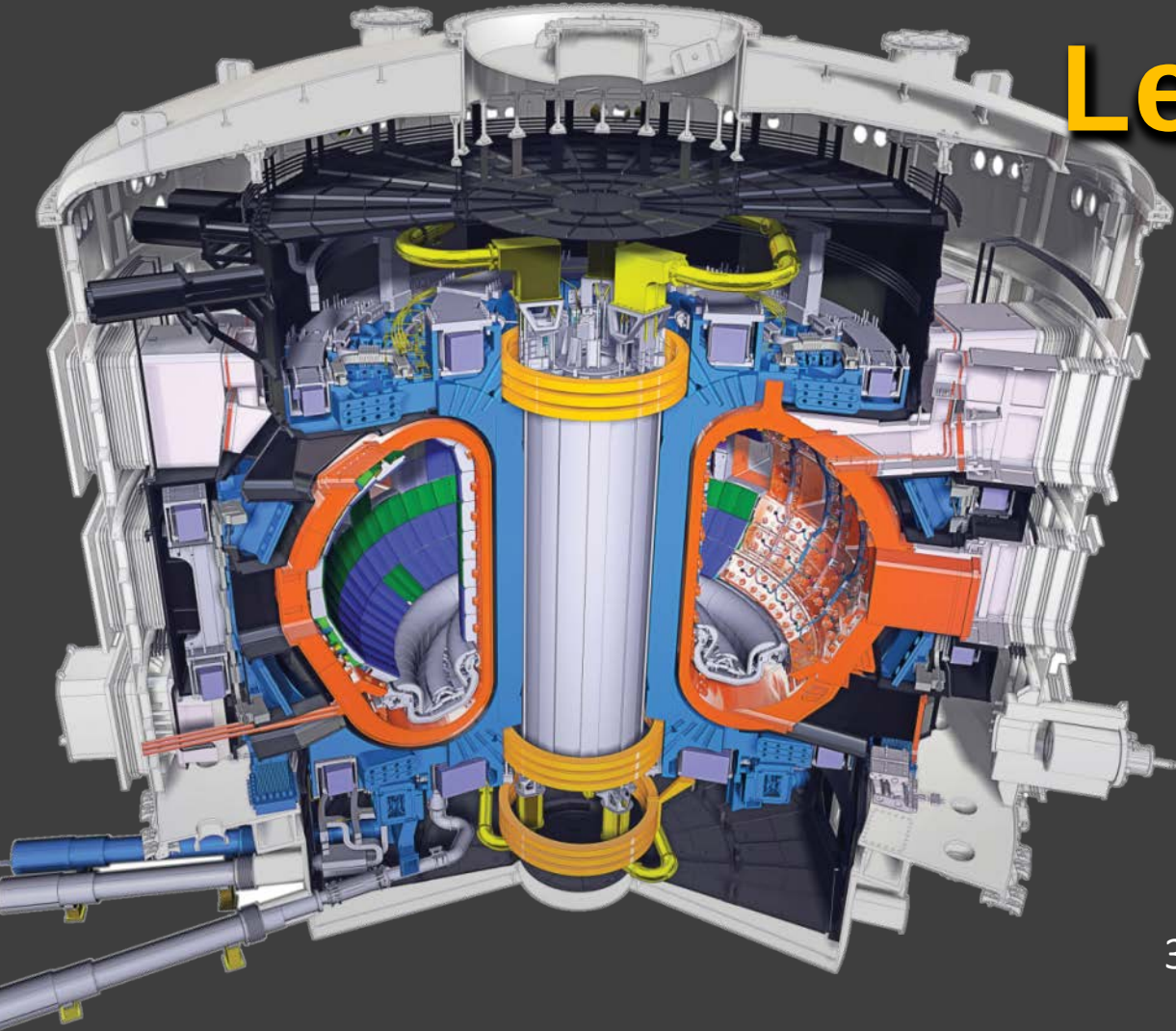
Solénoïde central: $\sim 1\,000$ t.

Etc.

Total $\sim 23\,000$ t.



3,5 fois la masse de la Tour Eiffel!



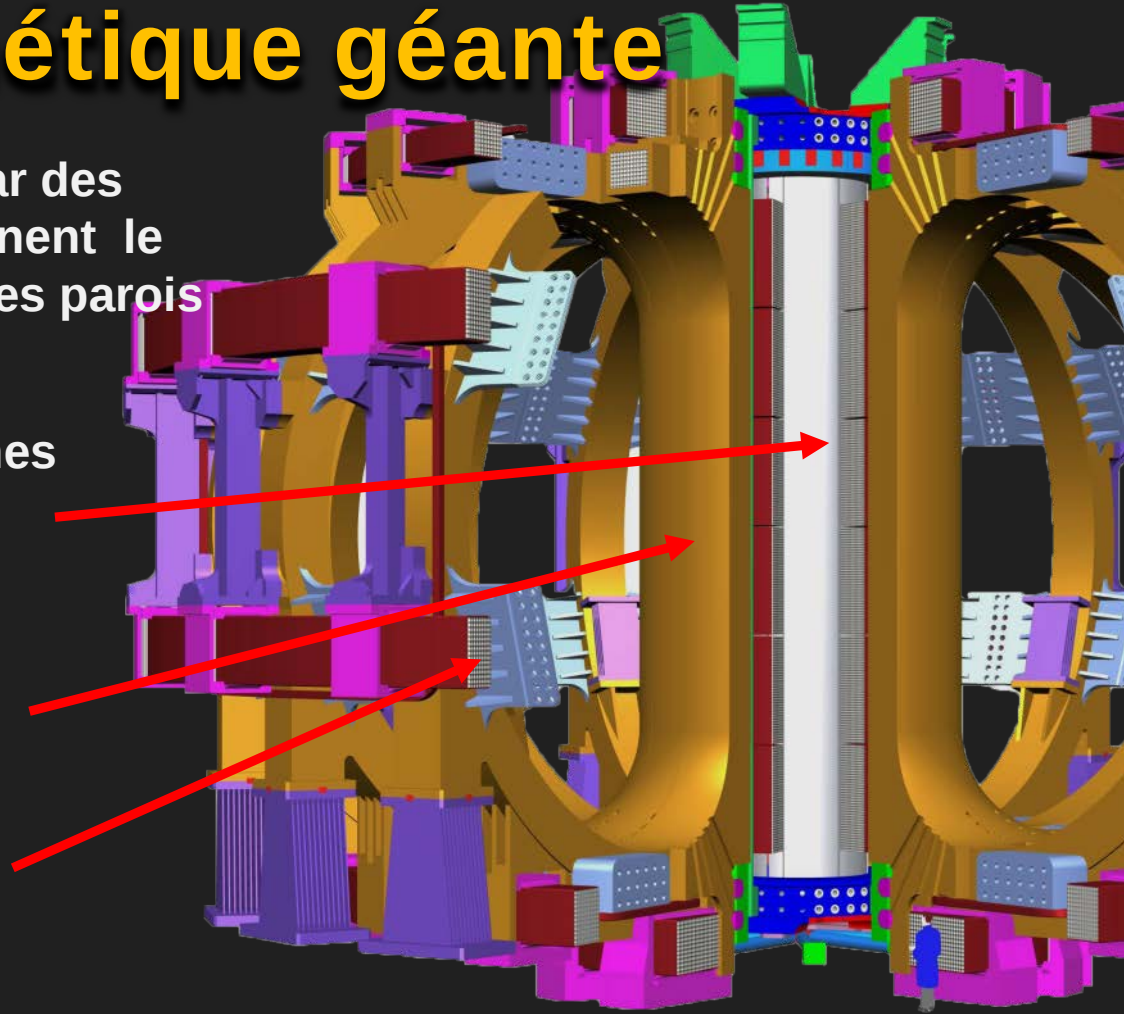
Une cage magnétique géante

Le champ magnétique produit par des aimants supraconducteurs confine le plasma et le maintient à l'écart des parois de la chambre à vide.

1 solénoïde central, 1 000 tonnes
18 m. de haut, 300 000 fois le
champ magnétique terrestre

18 bobines de champ toroïdal,
17 m. de haut, 360 tonnes
chacune

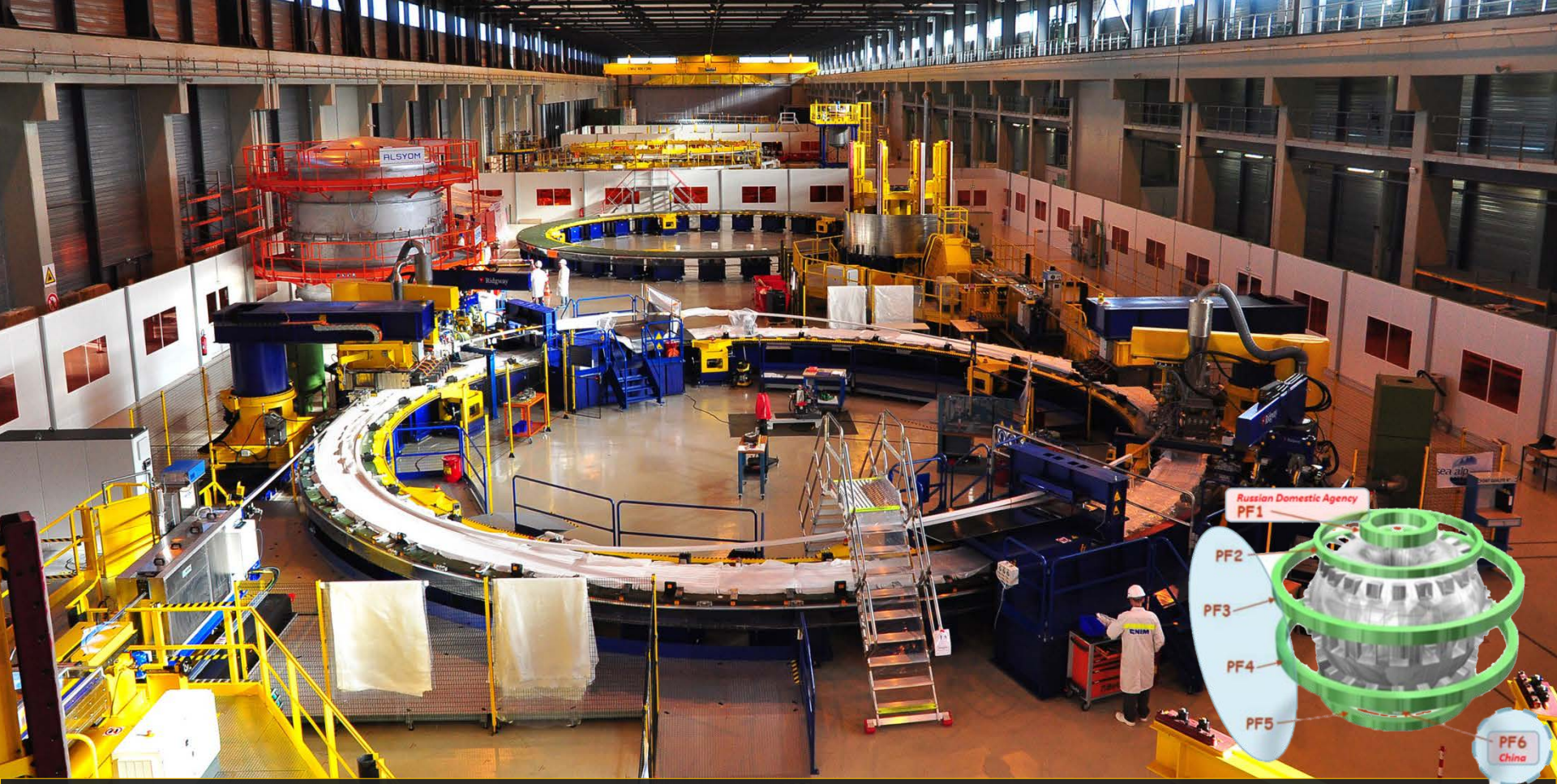
6 bobines de champ poloïdal
de 8 à 24 mètres de diamètre



Cryoplant



La plus grande usine à froid du monde ("cryoplant") est en cours de construction. Le *cryoplant* distribue l'hélium et l'azote sous forme liquide aux aimants supraconducteurs, écran thermique et cryopompes.



Les plus grandes bobines du système magnétique ('PF Coils', diamètre 8 à 24 m) sont fabriquées par l'Europe dans ce bâtiment de 12 000 mètres carrés. La fabrication de la première maquette (17 m) est quasiment finalisée.

Fabrications en cours



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.

Fabrications en cours

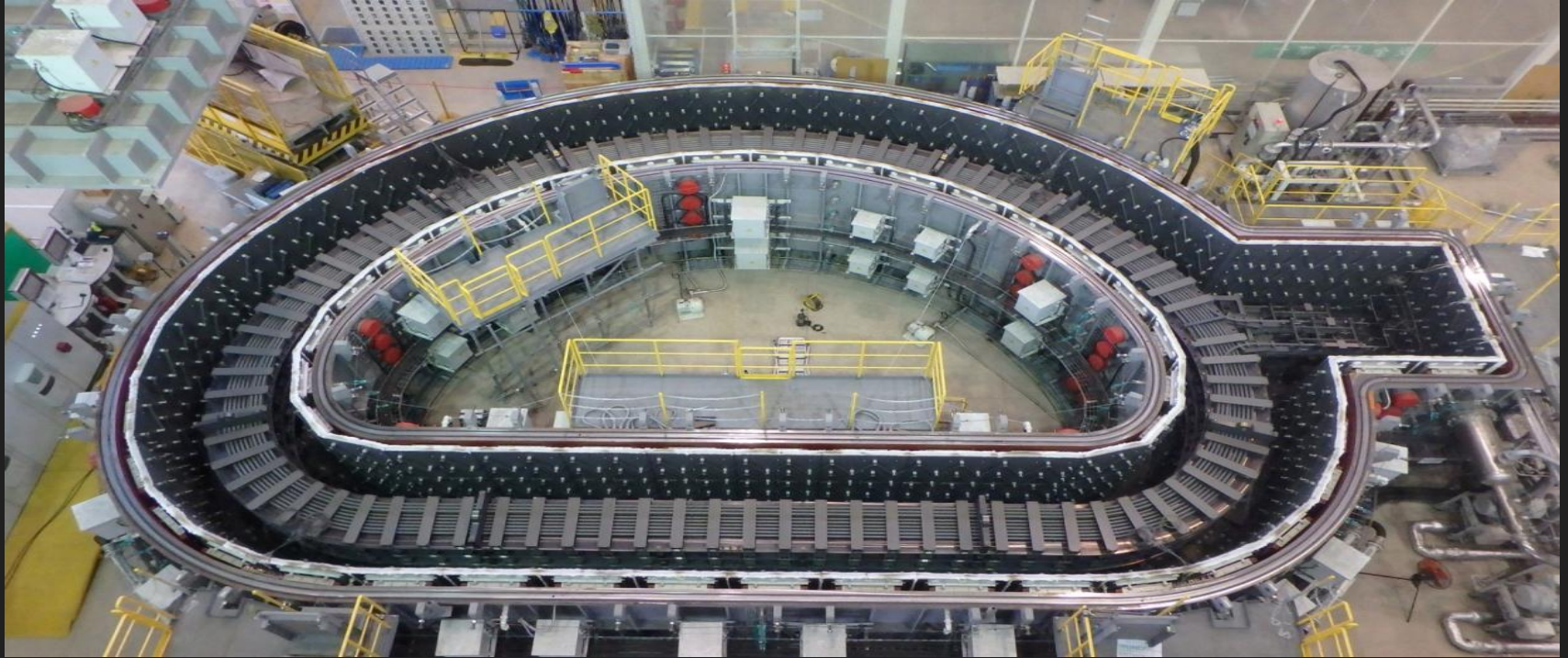
Europe



En Italie, la fabrication de la première des 10 bobines de champ toroïdal (sur 18) que doit livrer l'Europe est en cours. Une fois finalisée, la bobine sera insérée dans une « cassette » d'acier – l'ensemble pèsera plus de 310 tonnes, le poids d'un Boeing 747 à pleine charge.

Fabrications en cours

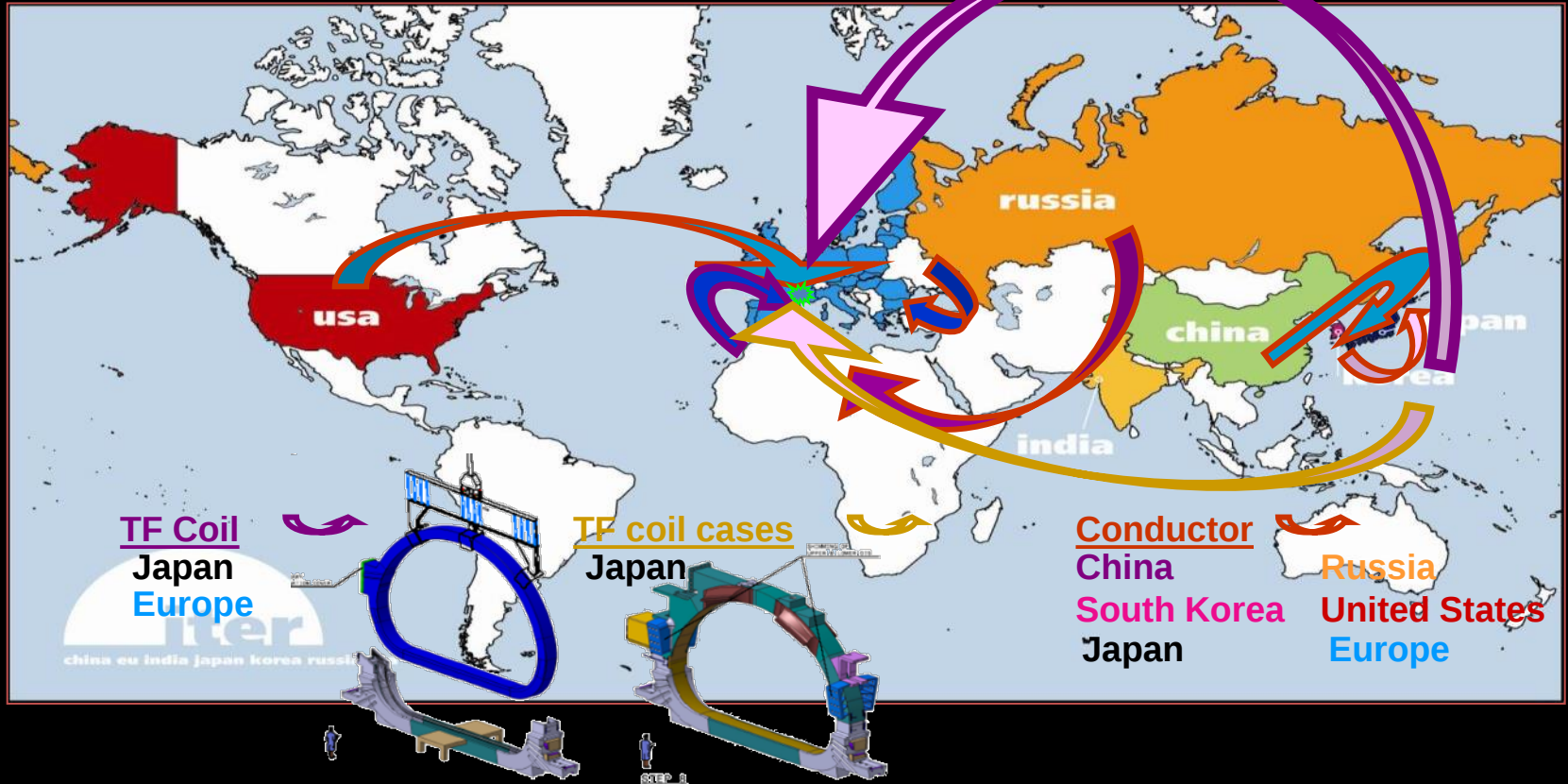
Japon



Traitement à haute température des bobinages des aimants de champ toroidal à l'usine Mitsubishi de Futami (Japon).

...à l'échelle de la planète...

(Exemple: les bobines de champ toroïdal)



Fabrications en cours

USA



La fabrication du solénoïde central du Tokamak ITER est en cours chez General Atomics en Californie. Cet élément, d'une masse de 1 000 tonnes, est l'un des aimants les plus puissants jamais construits.



Les Etats-Unis ont livré les quatre transformateurs destinés au réseau électrique de l'installation.

Fabrications en cours

Corée



Opérations de soudage d'une section de la chambre à vide dans les ateliers de Hyundai Heavy Industries à Ulsan (Corée).

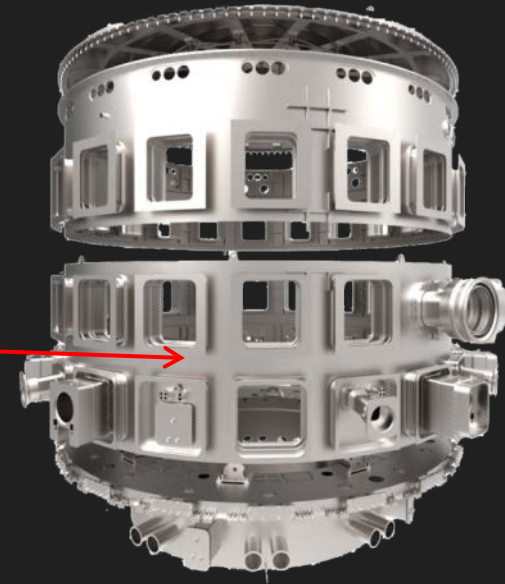
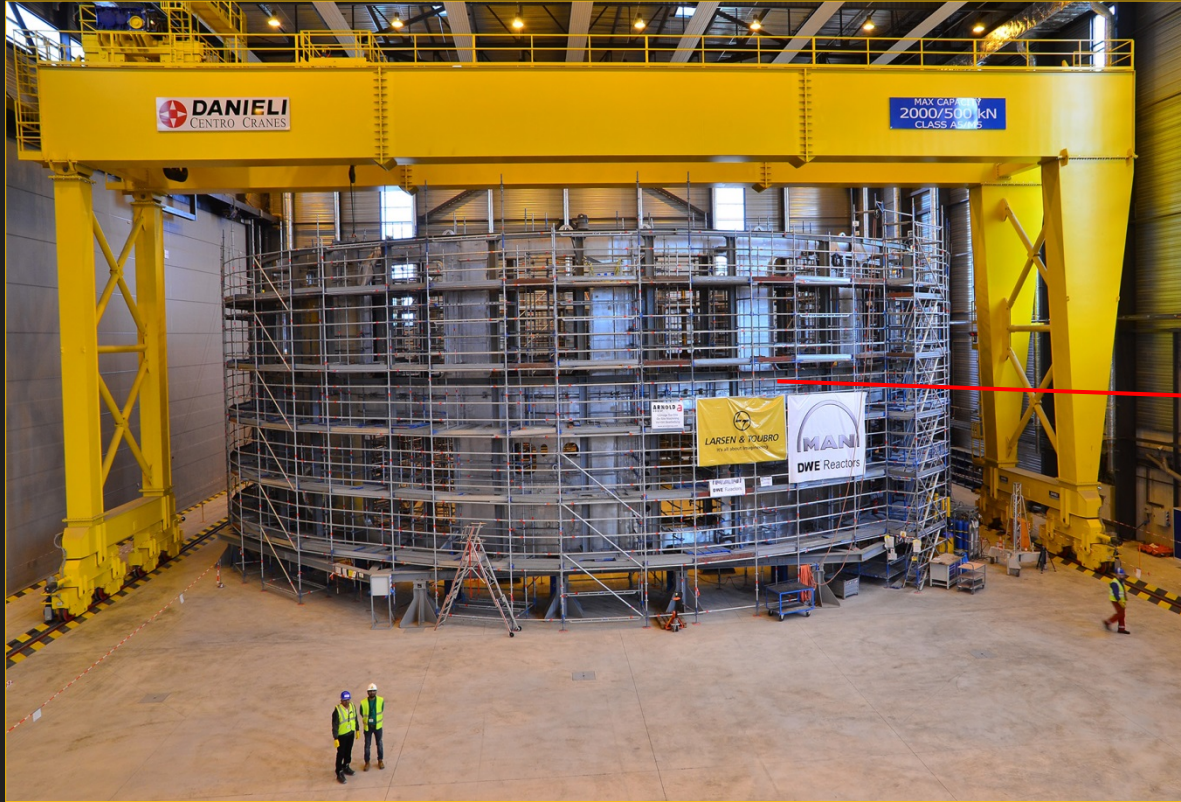
Fabrications en cours

Inde



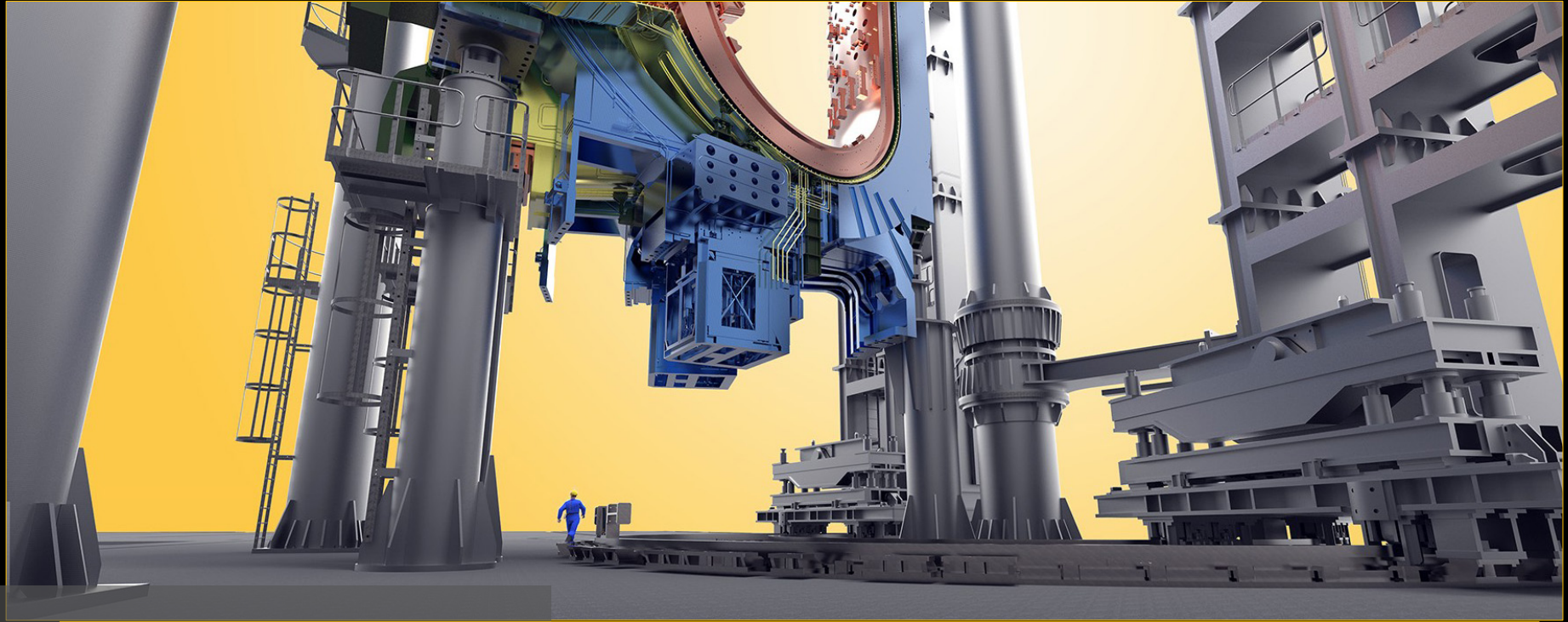
La base du cryostat a été provisoirement assemblée dans l'usine Larsen & Toubro Ltd en Inde. Les premiers éléments ont été livrés à ITER les 10 et 17 décembre 2015.

Cryostat Workshop



Fabriqué en Inde, le cryostat (enceinte   vide de 30 m x 30 m qui contient l'ensemble de la machine pour la maintenir en froid) est en cours d'assemblage de soudure sur le site.

Assemblage: début en 2018



Ces outils géants, fournis par la Corée, vont manipuler des charges qui, une fois préassemblées, pourront peser jusqu'à 1 500 tonnes.

Un pôle scientifique mondial en France

- **Sur ITER à Cadarache:** ~ 3000 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** » (modification de TS) plateforme pour préparer l'exploitation d'ITER (diverteur en W, fonctionnement continu)
 - **De par le monde:** 7 agences domestiques (une par partenaire); plusieurs milliers de collaborateurs scientifiques
 - **Formation:** master: 'sciences des plasmas et de la fusion', 'Erasmus Mundus'

Retombées économiques



Total des contrats passés depuis 2007 : 5,3 milliards d'euros

Part des entreprises françaises : 2,96 milliards d'euros (~ 56%)

**Je vous remercie
pour votre attention**

<http://www.iter.org/fr>

