ITER : *défis et statut*

Une collaboration scientifique mondiale sans équivalent dans l'histoire

Jean Jacquinot, ARCEA 12 avril 2018

Le défi de l'énergie

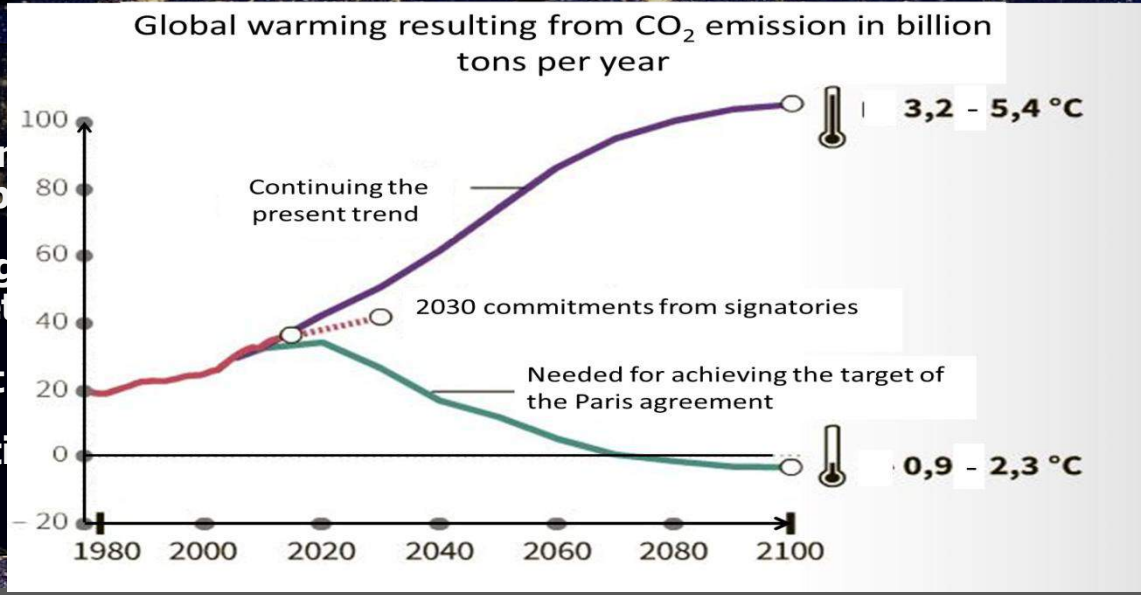
La consommation mondiale d'énergie doit croître de 60% d'ici 2030.
(International Energy Agency - IEA)

La part de l'électricité en constante augmentation

Produire massivement de l'énergie sans générer de CO_2

Les options pour le futur:

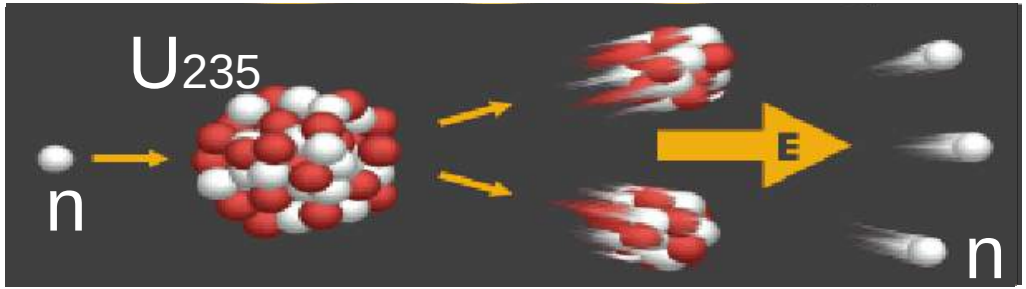
- **Combustibles fossiles:** épuisement ir
  qui reste à définir; développer la cap
- **Renouvelables:** développer leur usag
  technologiques dans la production et
- **Fission nucléaire:** enjeu de sûreté et
- **Fusion:** doit apporter la démonstrati
  technique



Fission / Fusion

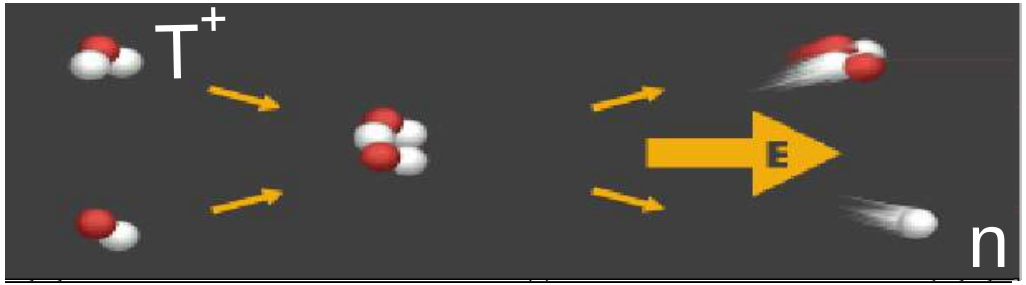
Fission
Combustible:
Uranium
solide

Produits de fission

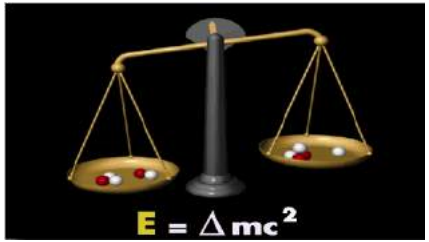


Neutrons
➔
réactions en chaîne

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 CO_2

Pas de déchets de haute activité à vie longue

Pas de possibilité d'emballement

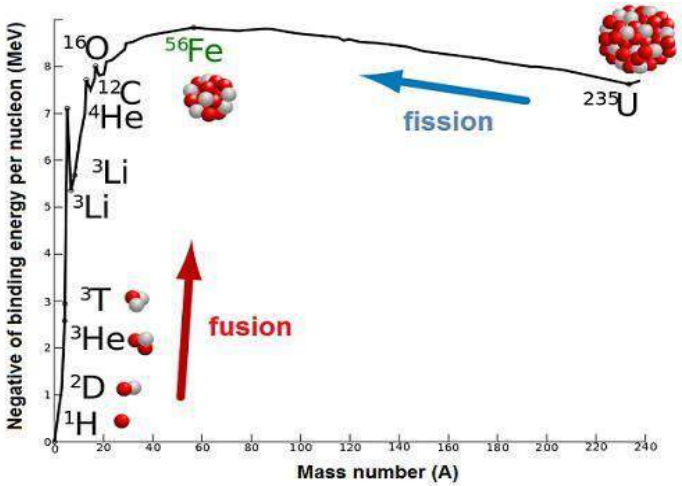
Pas de prolifération

Mais:

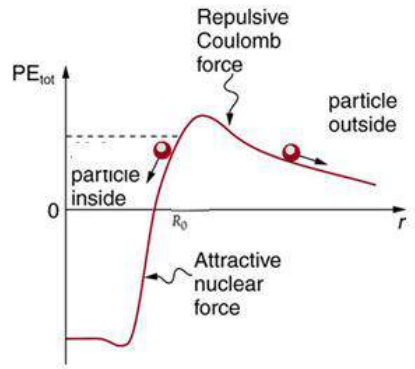
Science compliquée: plasma chaud, matériaux, supraconducteurs

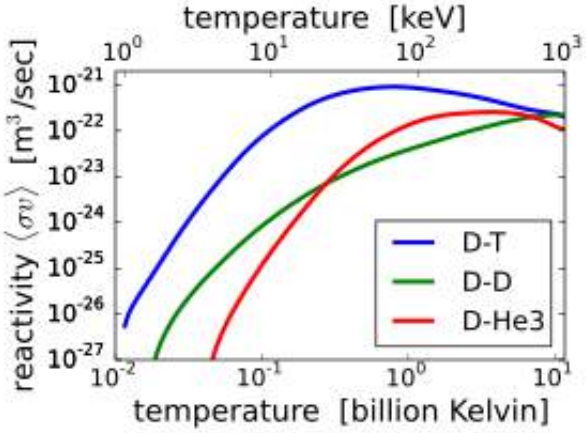
➔ le risque scientifique en vaut la peine!

Principes de base de la fusion



Le fer est en configuration d'énergie minimum





Vaincre la répulsion coulombienne par la température

Ignition si $P_f > P_{perte}$

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

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

$^2D^+ + {}^2D^+ \xrightarrow{50\%} T^+ (1MeV) + p^+ (3MeV)$

$^2D^+ + {}^2D^+ \xrightarrow{50\%} {}^3He^{++} (0.8MeV) + n^0 (2.5MeV)$

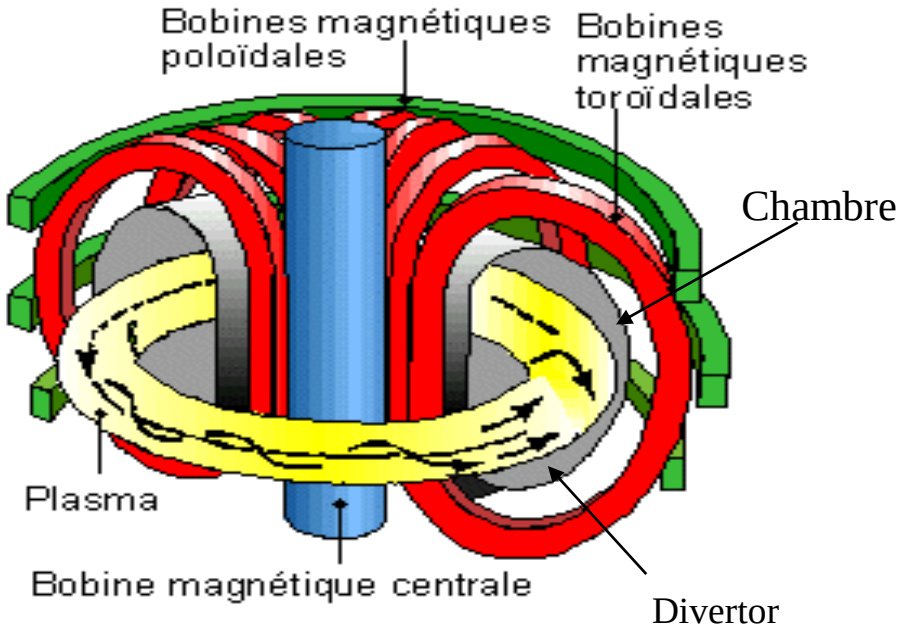
$^2D^+ + {}^3T^+ \longrightarrow {}^4He^{++} (3.5MeV) + n^0 (14MeV)$

$^2D^+ + {}^3He^{++} \longrightarrow {}^4He^{++} (3.6MeV) + p^+ (15MeV)$

La réaction deutérium/tritium est la plus facile

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

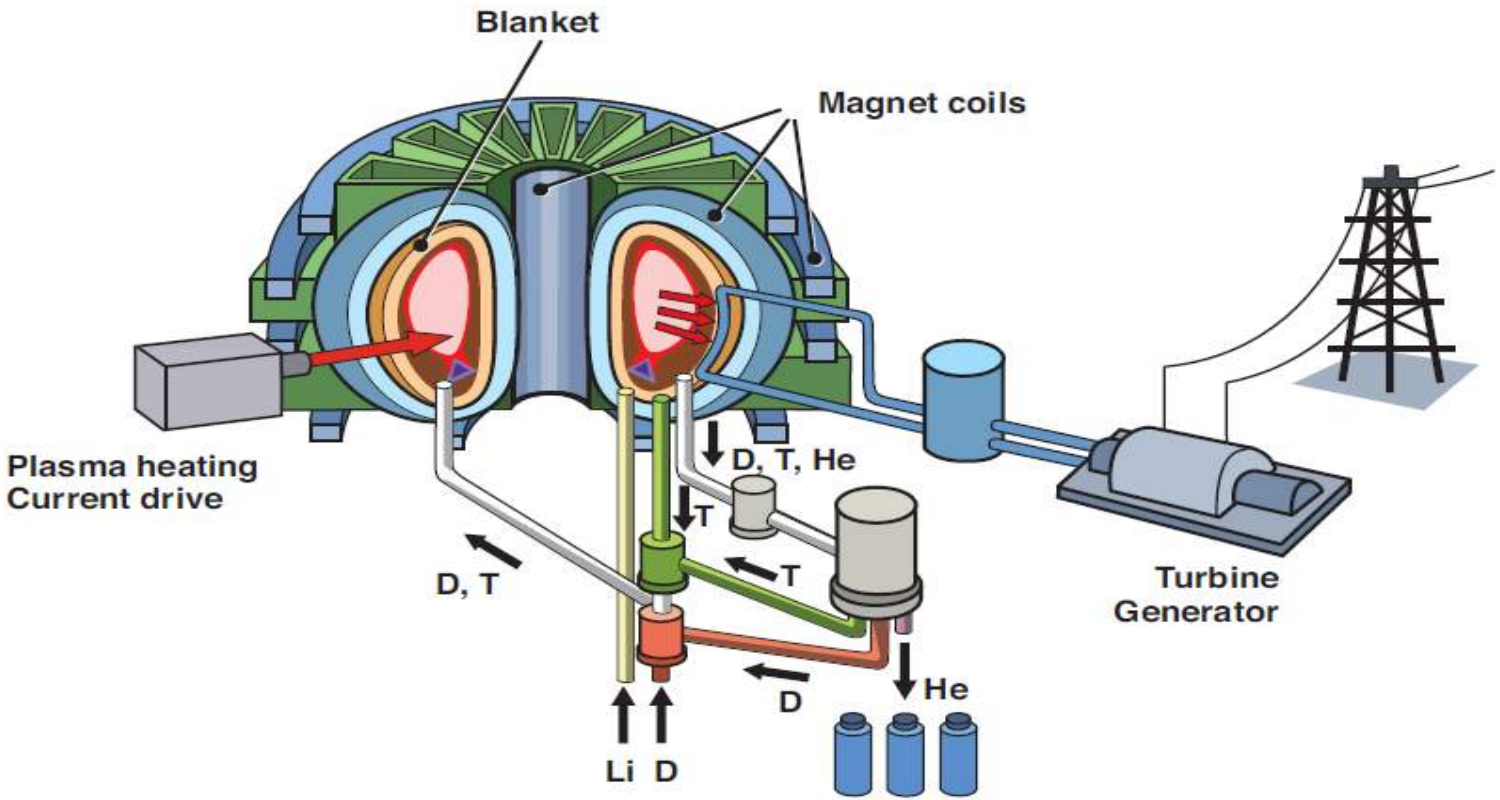


Gain d'énergie si: $nT\tau_E \sim 10^{21}$ m^{-3}.keV.s ~ 1 bar.s

- **n (densité) = 10^{20} p/m^3 ➔ facile! (3.10^{25} dans l'atmosphère)**
- **T (température) ≥ 10 keV ➔ démontrée**
- **τ_E (temps de confinement de l'énergie) ≥ 4 s ➔ taille critique**

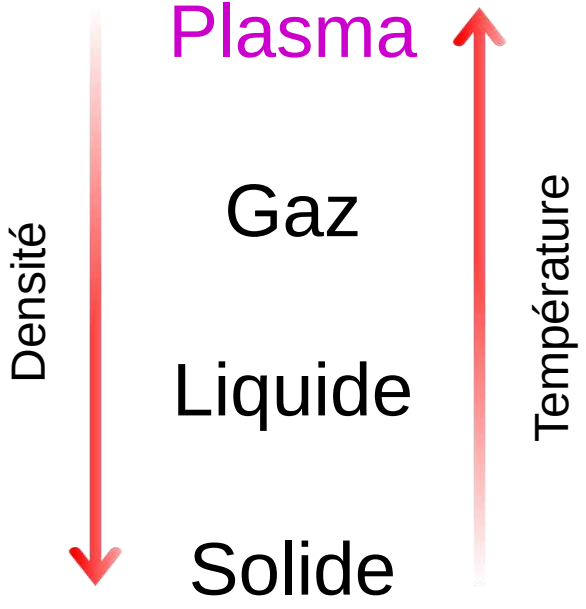
Quelle taille faut-il pour un bon rendement? ➔ ITER

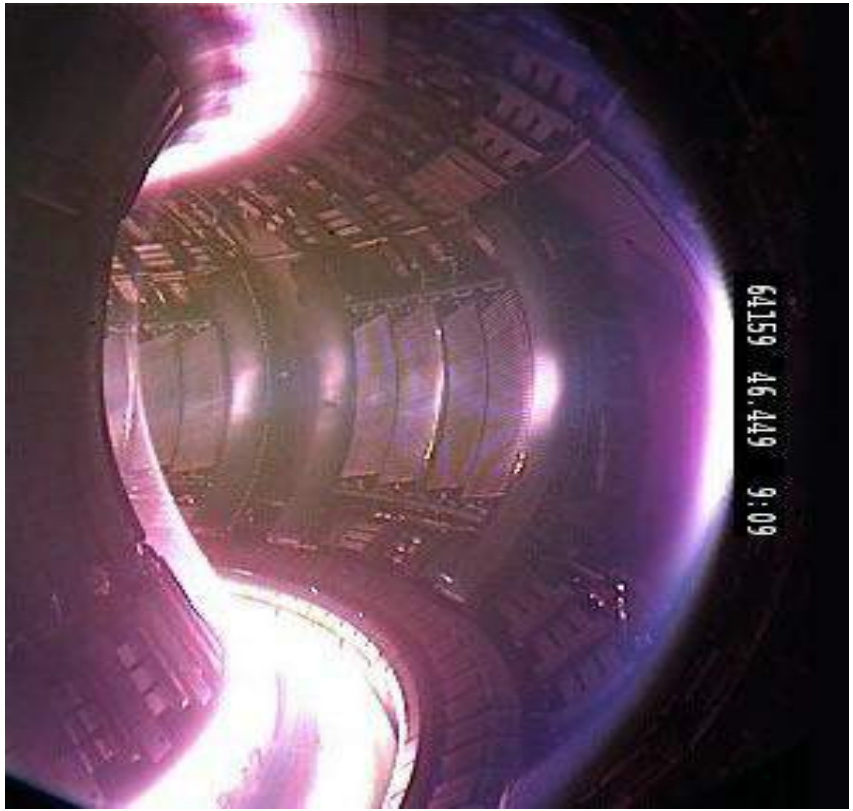
Réacteur à Fusion sur la planète Terre



Certains l'aiment chaud…

Plasmas:
4ème état de la matière
Interactions collectives



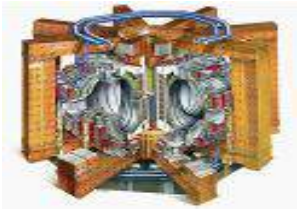


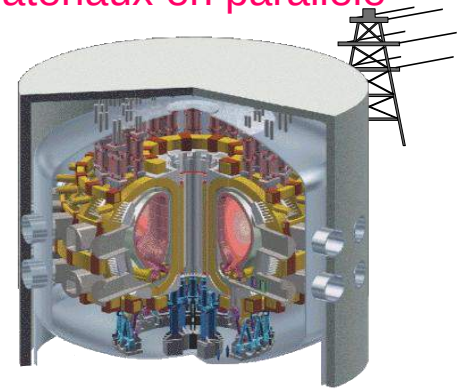
Plasma de JET

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	***JET***	***ITER***	***DEMO***
25 m^3	***80 m^3***	***800 m^3***	***~ 1000 - 3500 m^3***
~ 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

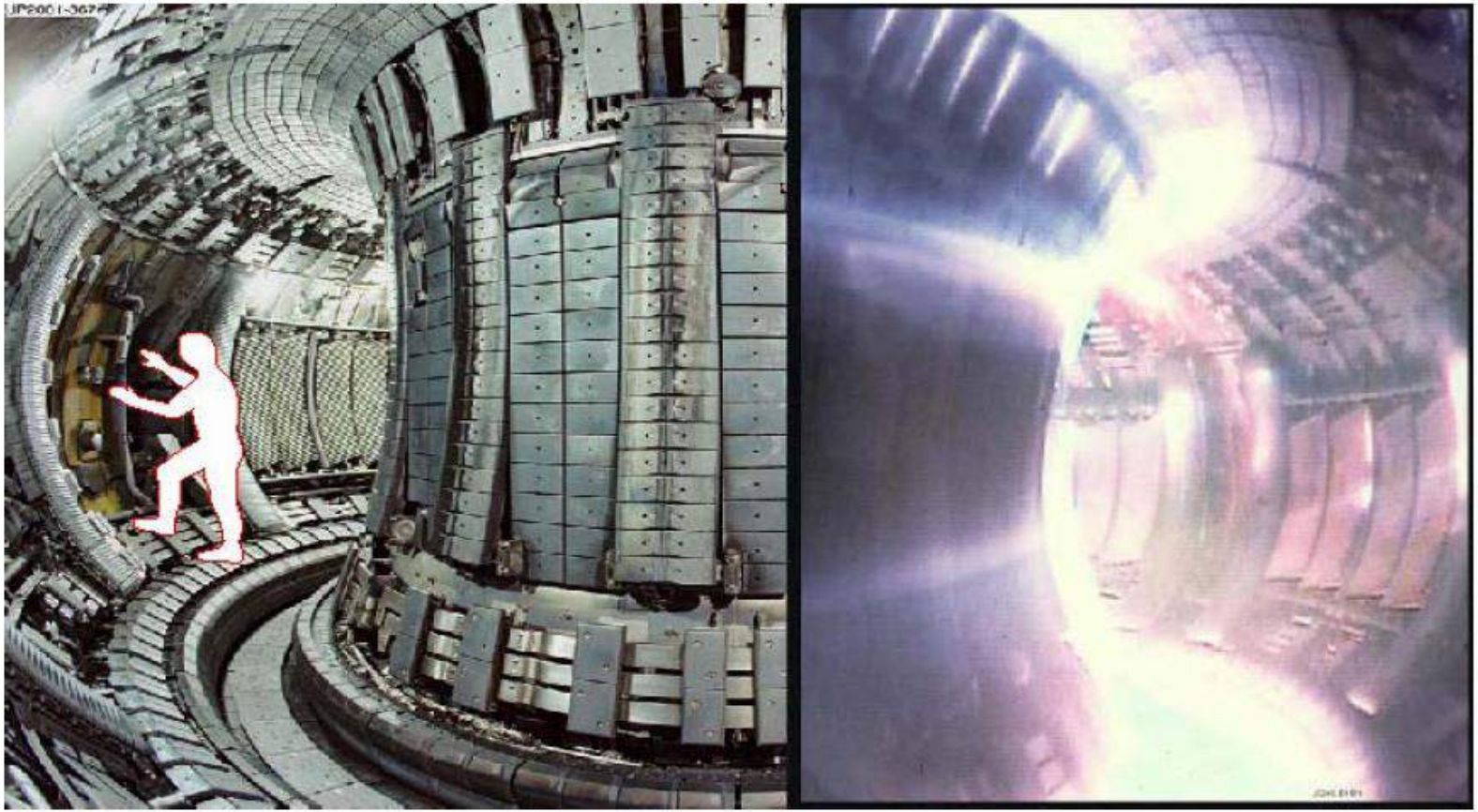
- **Français:** environ 60 équipes dont Tore Supra (West)
- **Européen:** Le **JET** + programmes des pays membres (Associations/Consortium)
- **Mondial: ITER** + ‘broader approach’ + collaboration via AIEA et IEA avec labos US, Japon, Russie, Chine, Corée, Inde etc.

Tore Supra / 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..

ITER: une longue maturation…

1988 – 2003:

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

2003 – 2005:

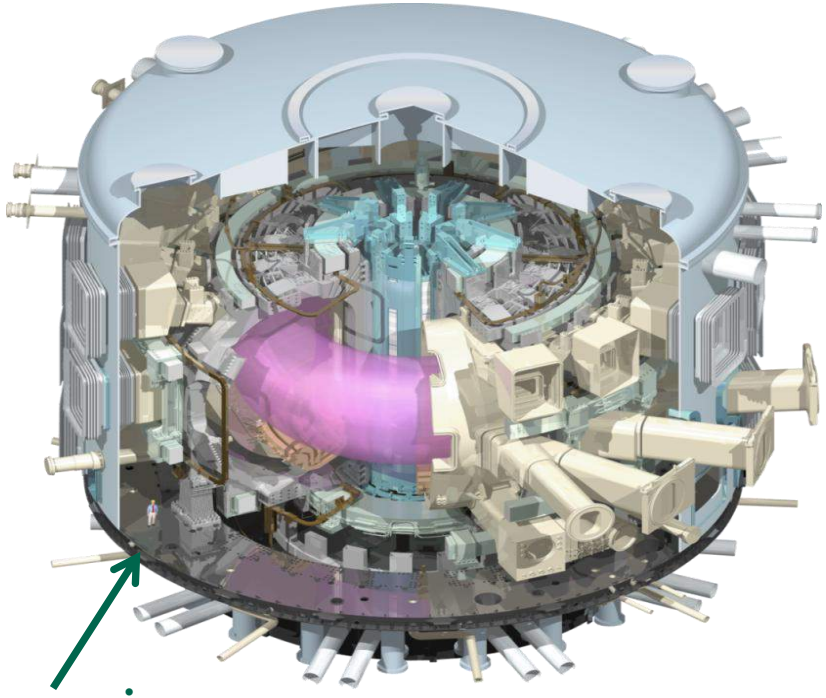
- Compétition pour le choix du site entre Japon, Canada, France et Espagne
  ➔ gagnée par l'Europe qui choisit Cadarache

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

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€**

Un bon plan!!:

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

Part des entreprises françaises : 3,1 milliards d'euros (56%)

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

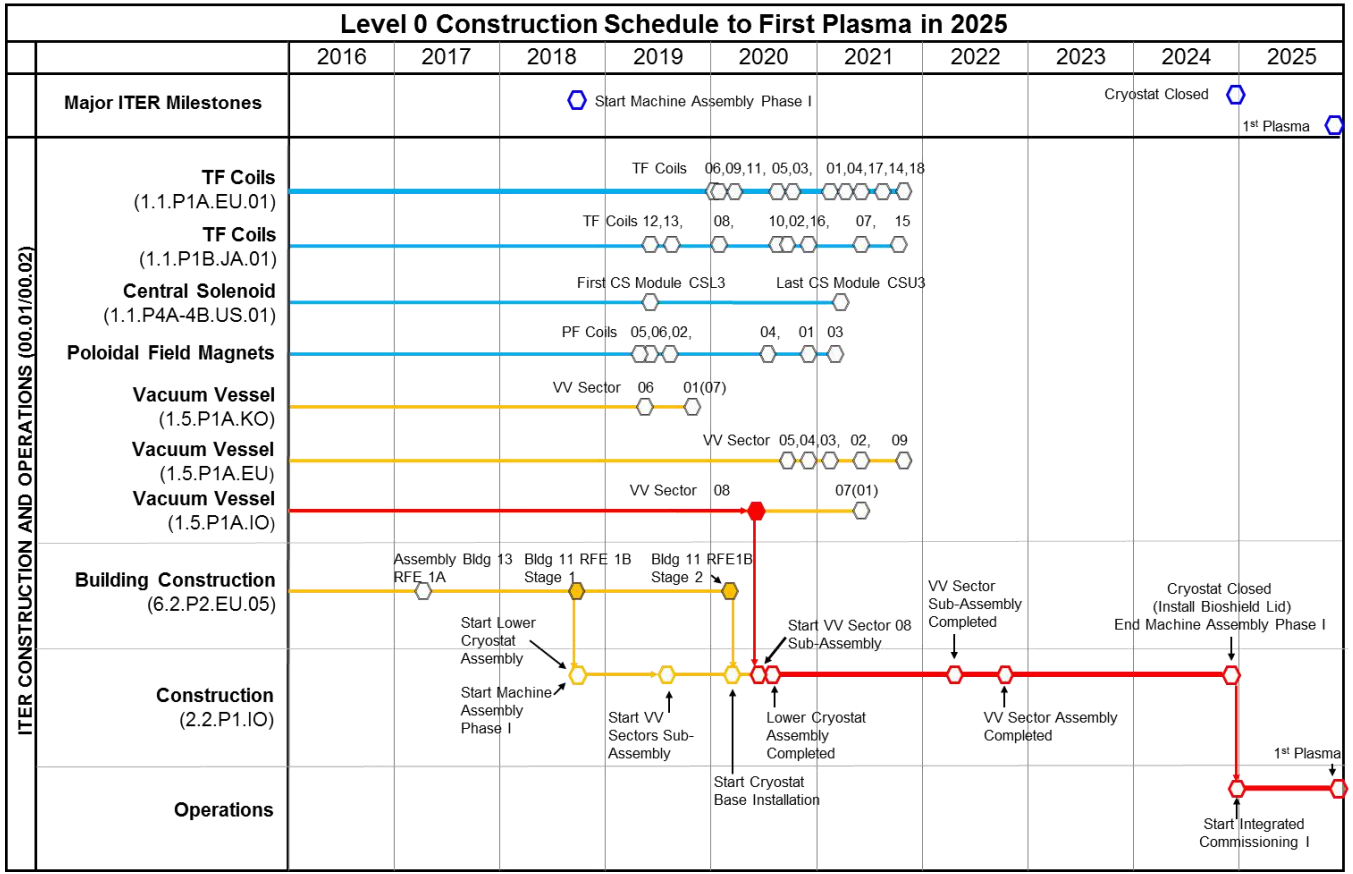
Fournitures en nature

Impact du CEA dans ITER

Directeurs d'ITER, phase EDA
Left: P-H Rebut 1991 – 1994
Right: R. Aymar 1994 - 2001

Bernard Bigot, DG d'ITER depuis le 6 Mars 2015
Dessin de *Nature*, Juin 2015

Assemblage: les étapes-clé



Novembre 2017: à mi-chemin du 1er plasma

2018:Début assemblage machine, (base du cryostat)

2019: Sous-assemblage chambre à vide

2022: Fin de l'assemblage des secteurs

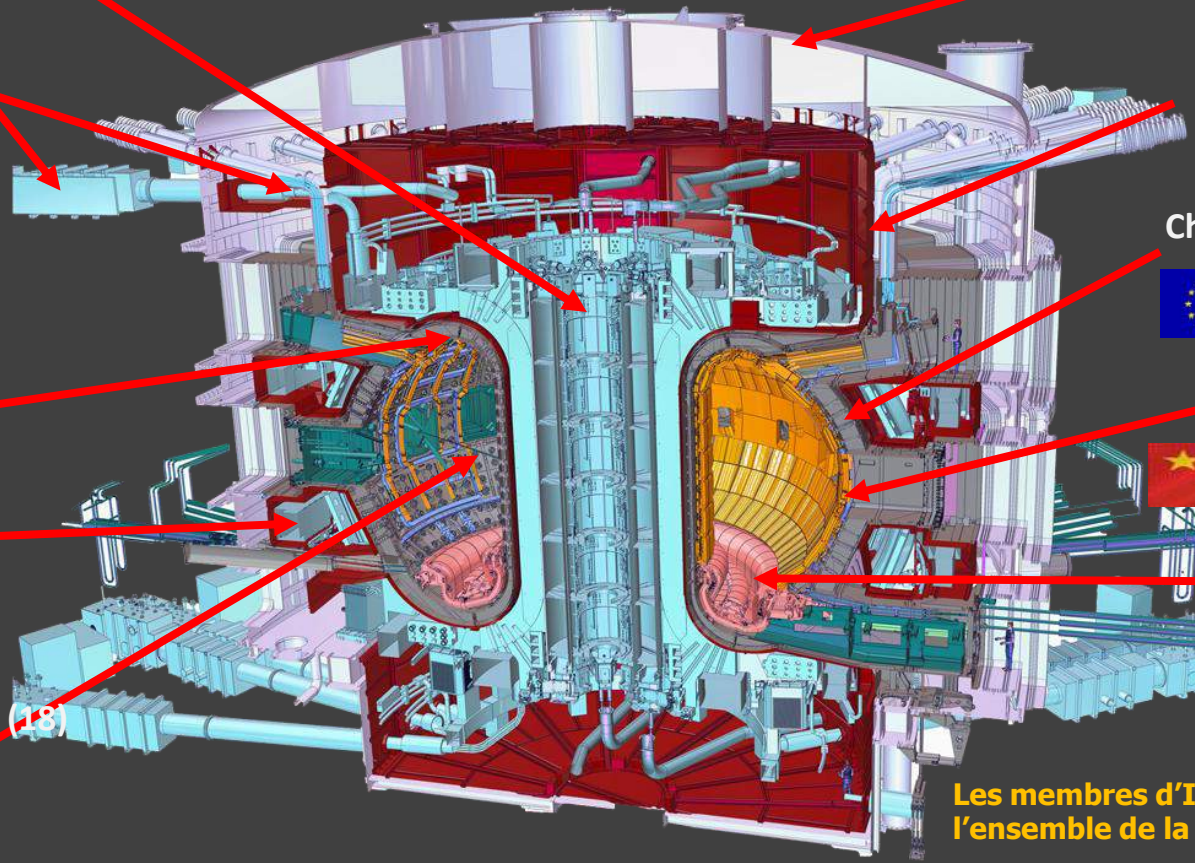
2024: Fermeture du cryostat

2025: Tests intégrés

Fin 2025: 1er plasma

2035; Pleine puissance

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

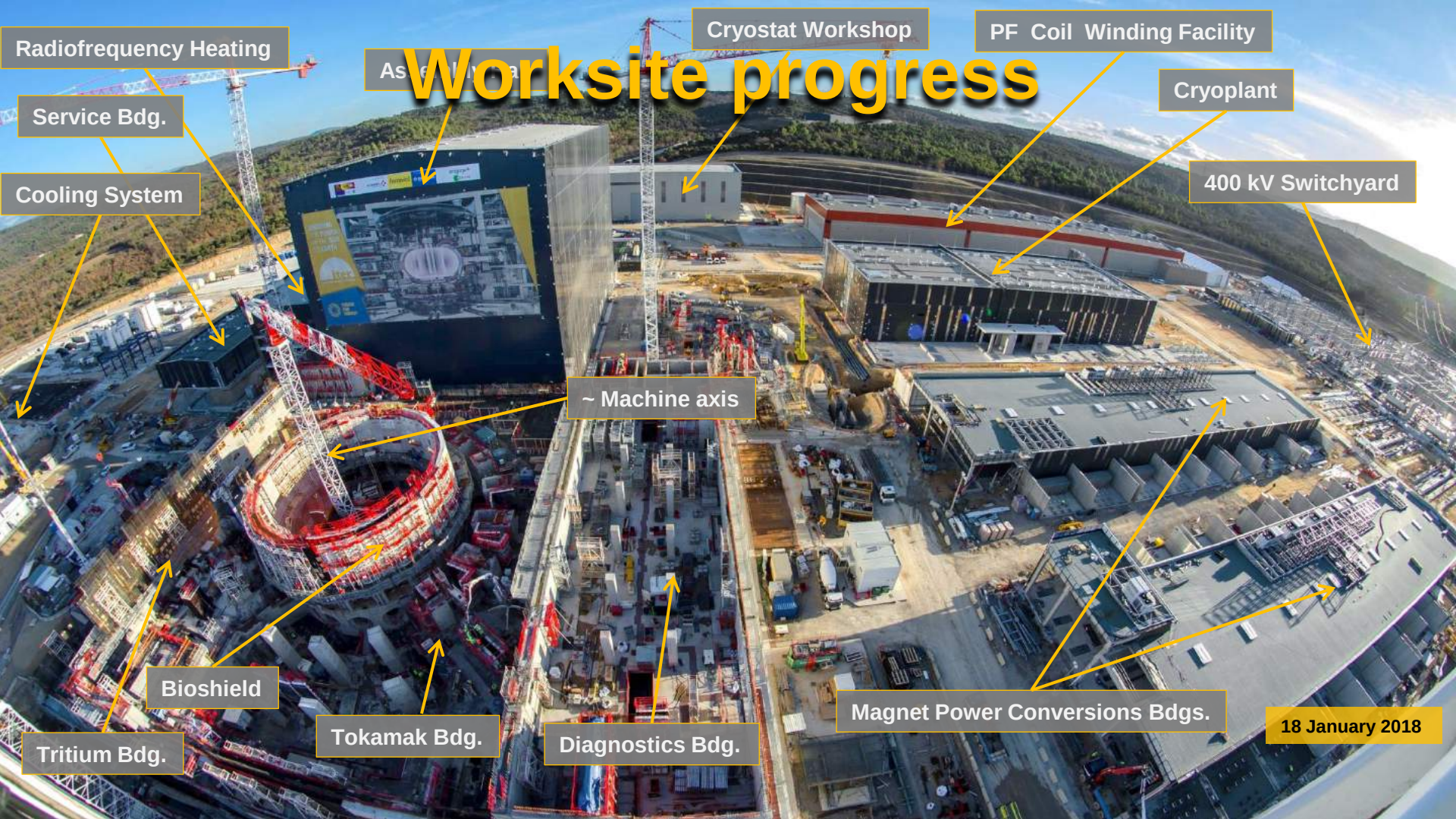
Chambre à vide

Couverture

Divertor

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

Worksite progress



Hall d’assemblage

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

Bâtiment tokamak

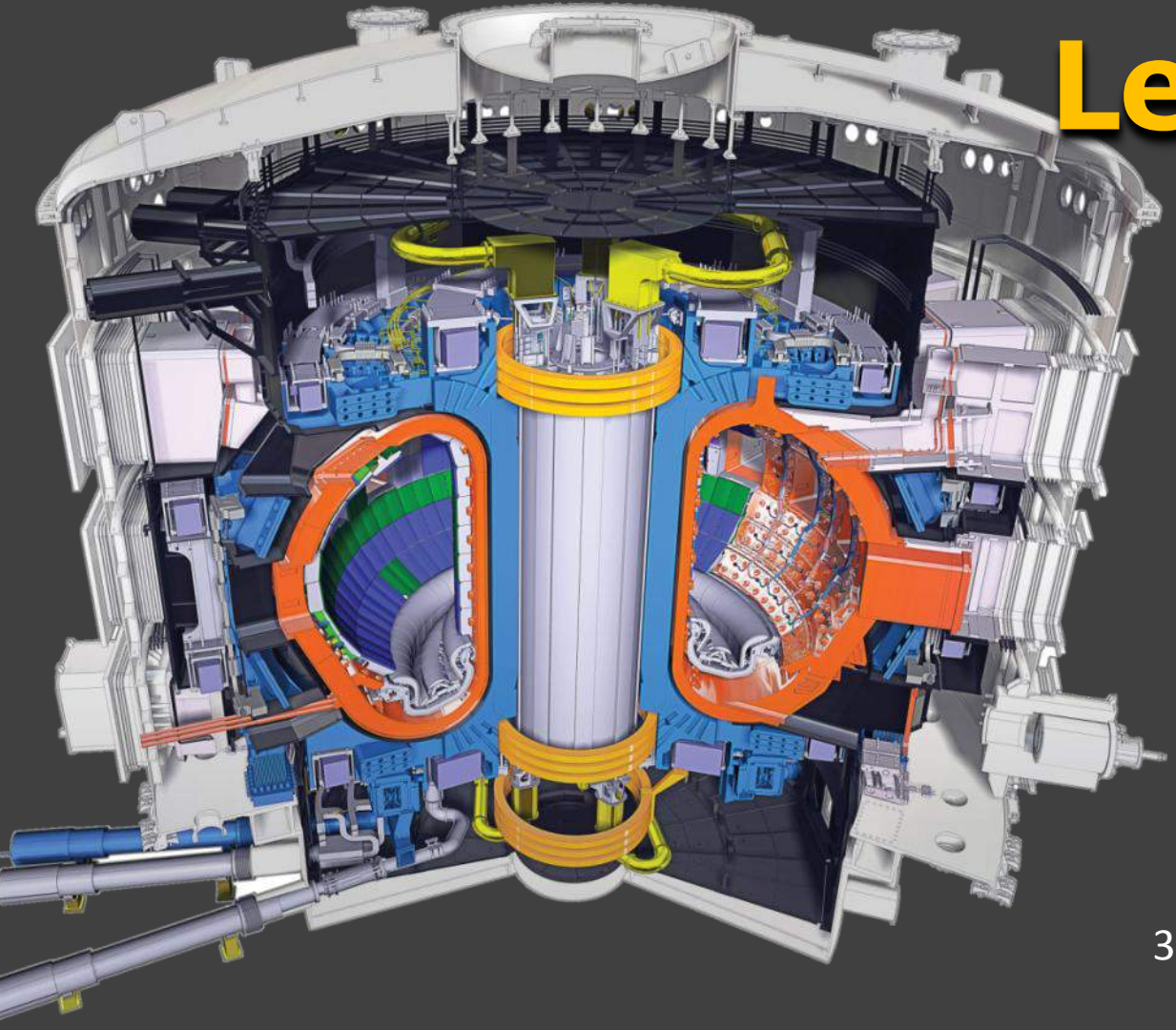
Bâtiment tokamak

Complexe Tokamak

L’enceinte de protection biologique (bioshield) au cœur de laquelle la machine sera assemblée est aujourd’hui finalisée.

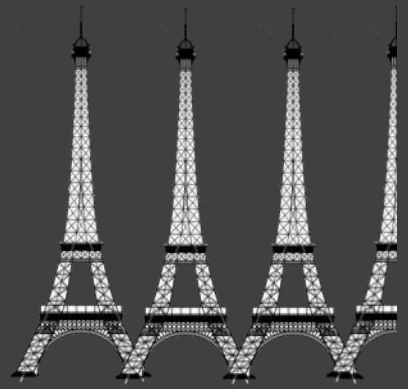
Sous la plate-forme de protection (« lid »), désormais positionnée au niveau L4 du bâtiment, la construction de la « couronne » progresse.

Le tokamak



Chambre à vide: ~ 8 000 t.
Bobines TF: 18 x 360 t.
Bobines PF: 6 de ~ 200 à ~400 t.
Solénoïde central: ~ 1 000 t.
Etc.

Total ~ 23 000 t.



3,5 fois la masse de la Tour Eiffel!

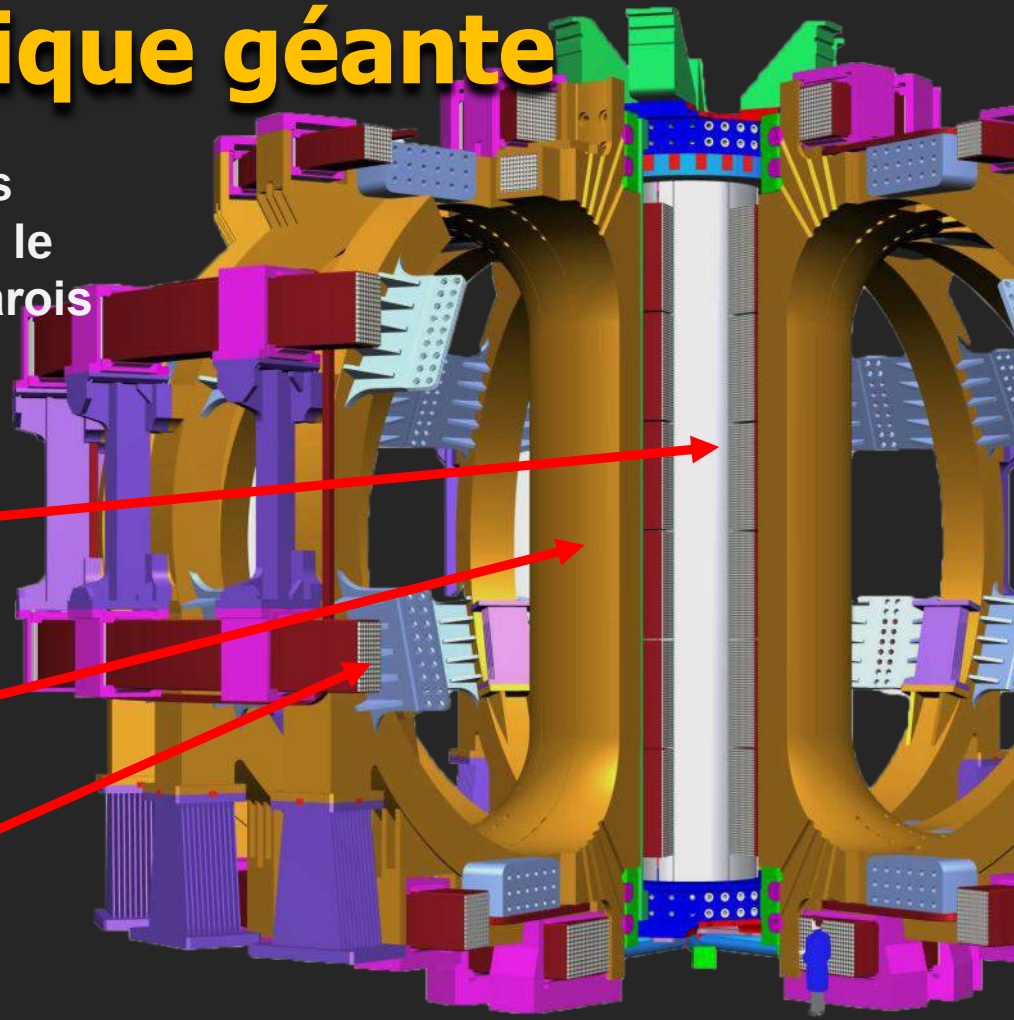
Une cage magnétique géante

Le champ magnétique produit par des aimants supraconducteurs confinent 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.

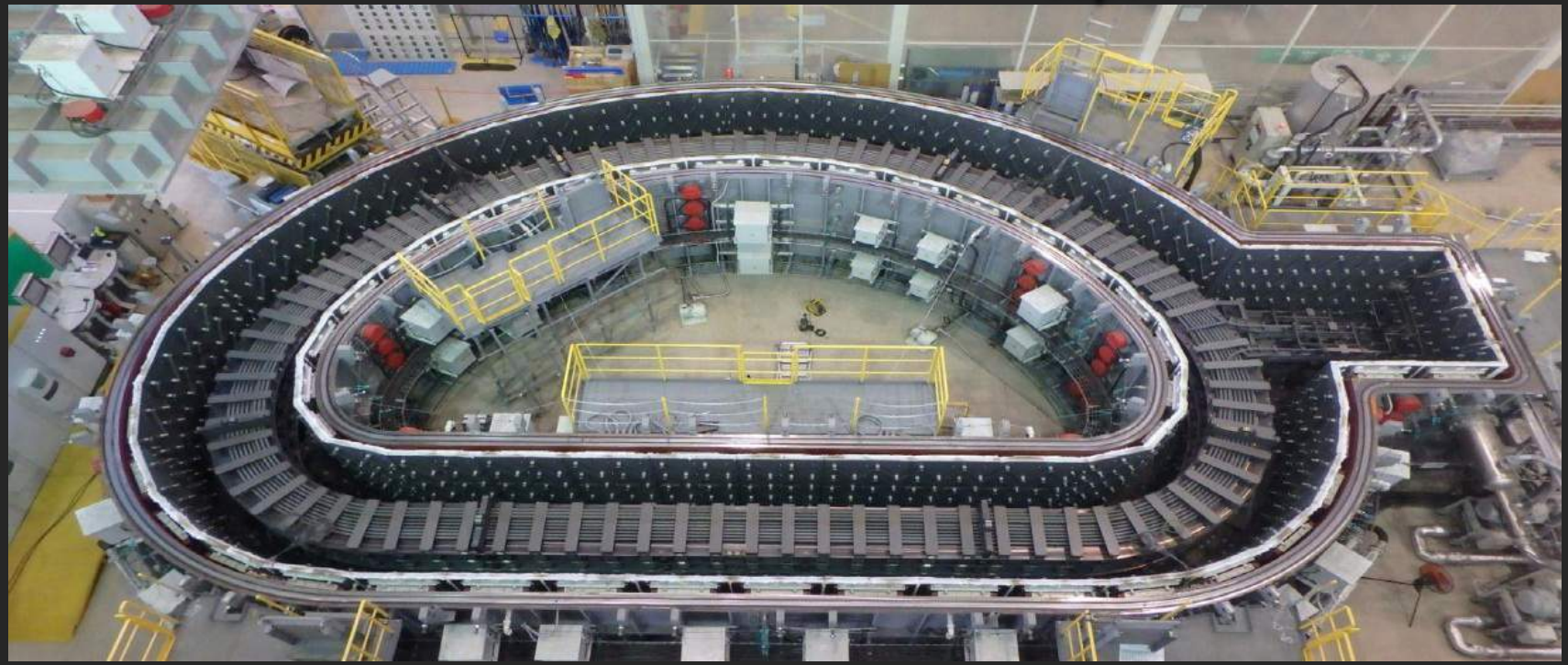
Fabrications en cours

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

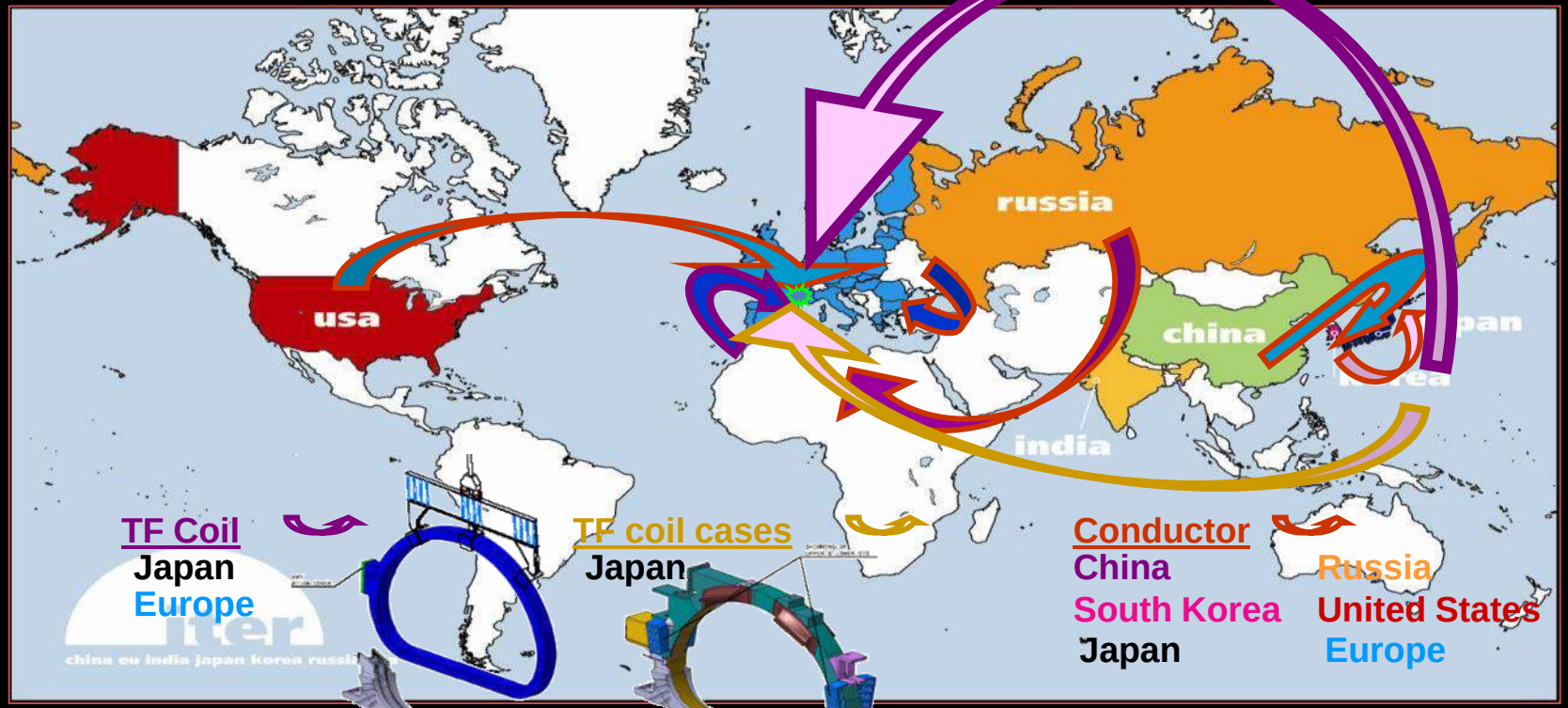
Japon



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

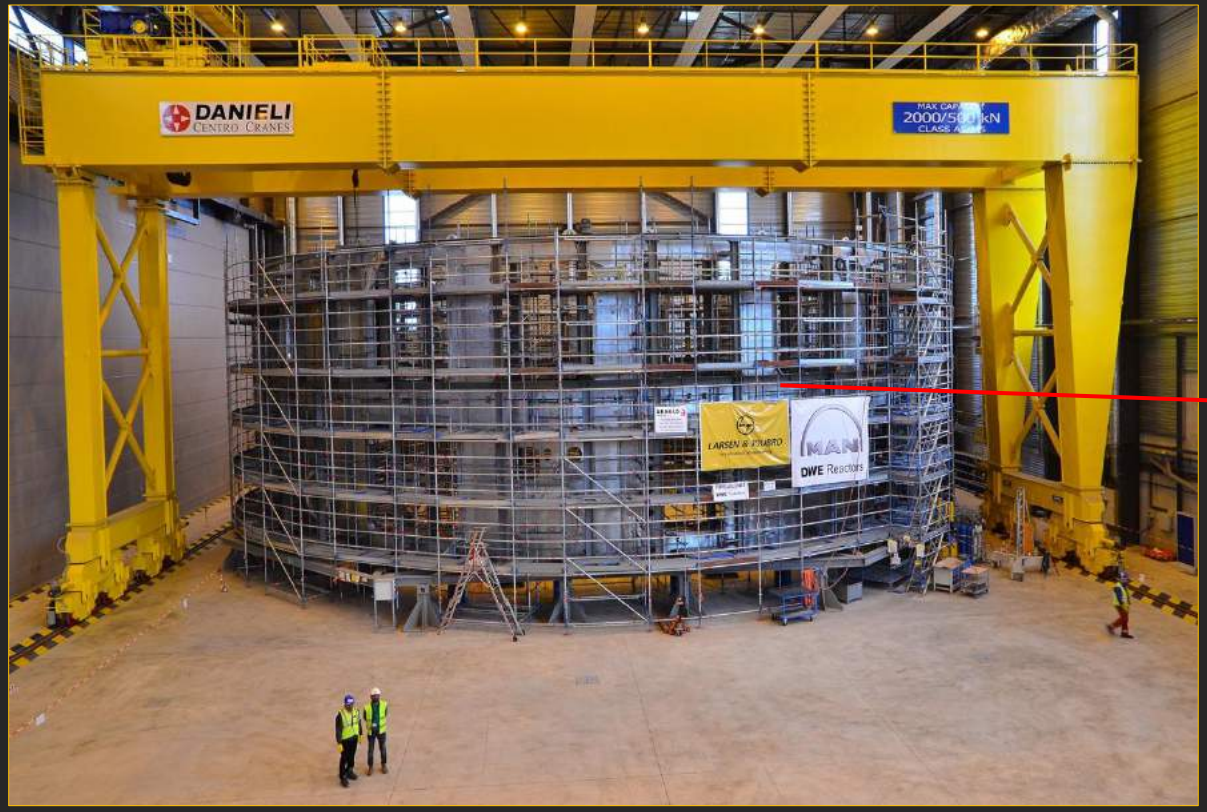
Opérations de soudage d'une section de la chambre à vide dans les ateliers de Hyundai Heavy Industries à Ulsan (Corée).

Fabrications en cours

Inde

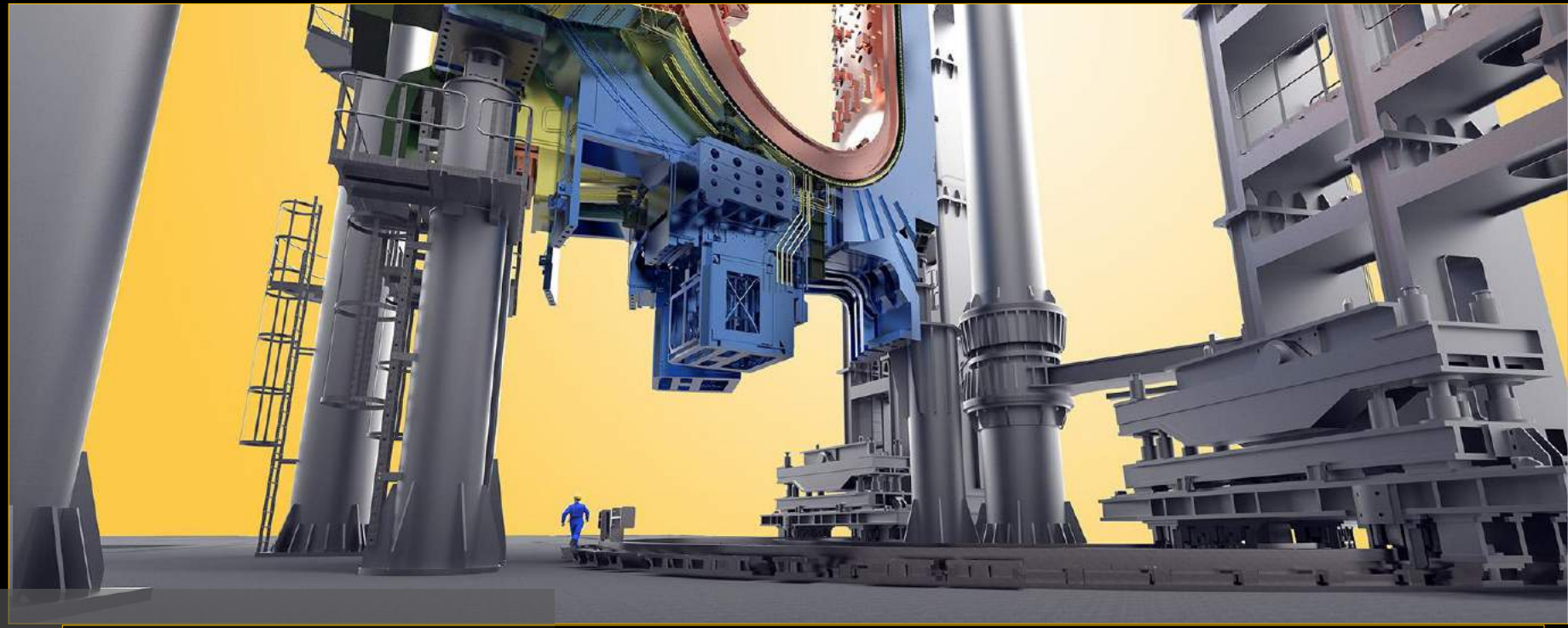
La base du cryostat a été provisoirement assemblée dans l'usine Larsen & Toubro Ltd en Inde. Les premiers éléments ont été livrés à ITER les 10 et 17 décembre 2015.

Atelier du Cryostat



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

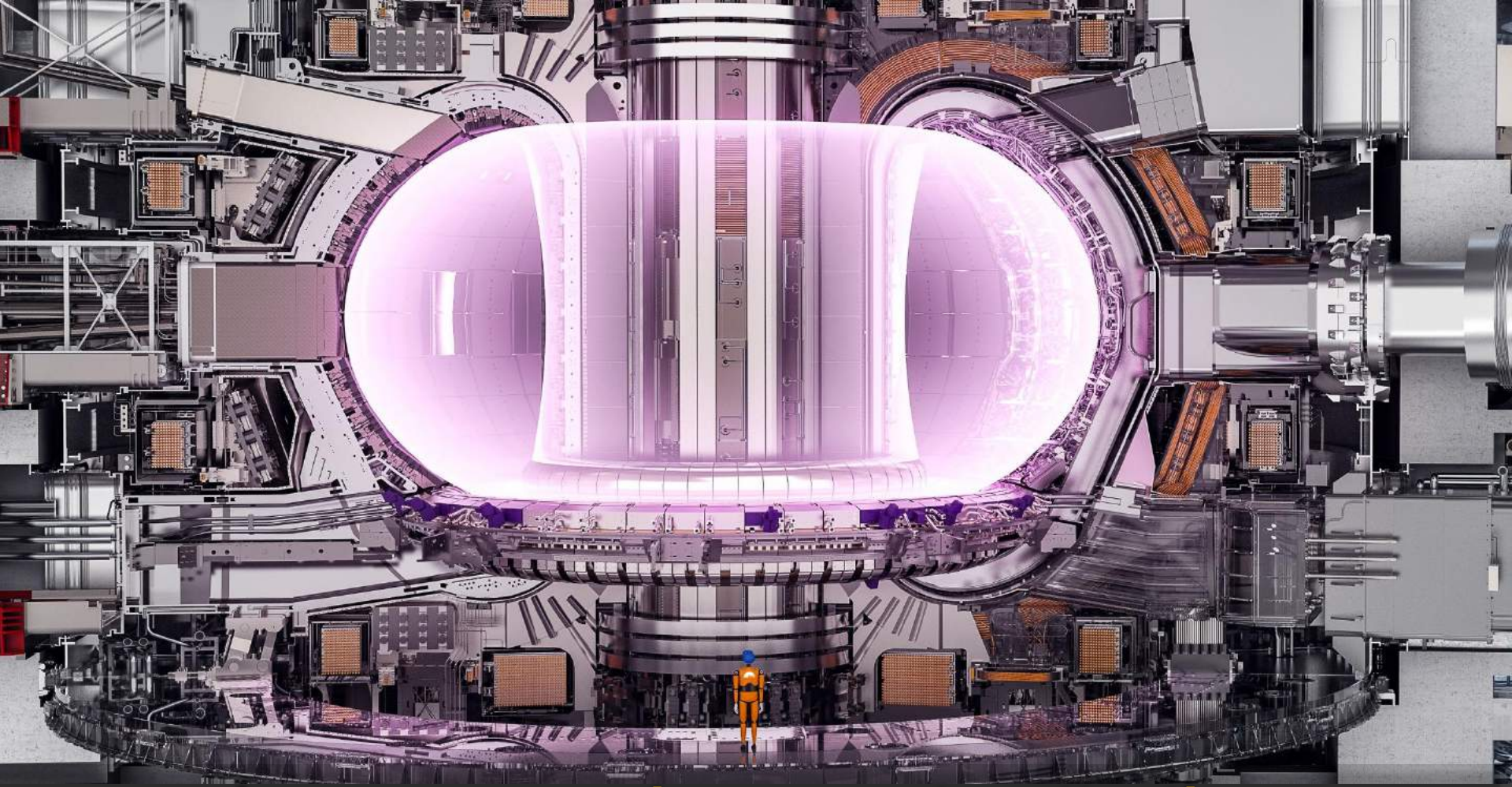
Assemblage: début en 2018



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:** ~ 2000 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 de la fusion', 'Erasmus Mundus'



Je vous remercie pour votre attention