

# ITER et l'énergie de fusion

J. Jacquinet, 8 décembre 2020

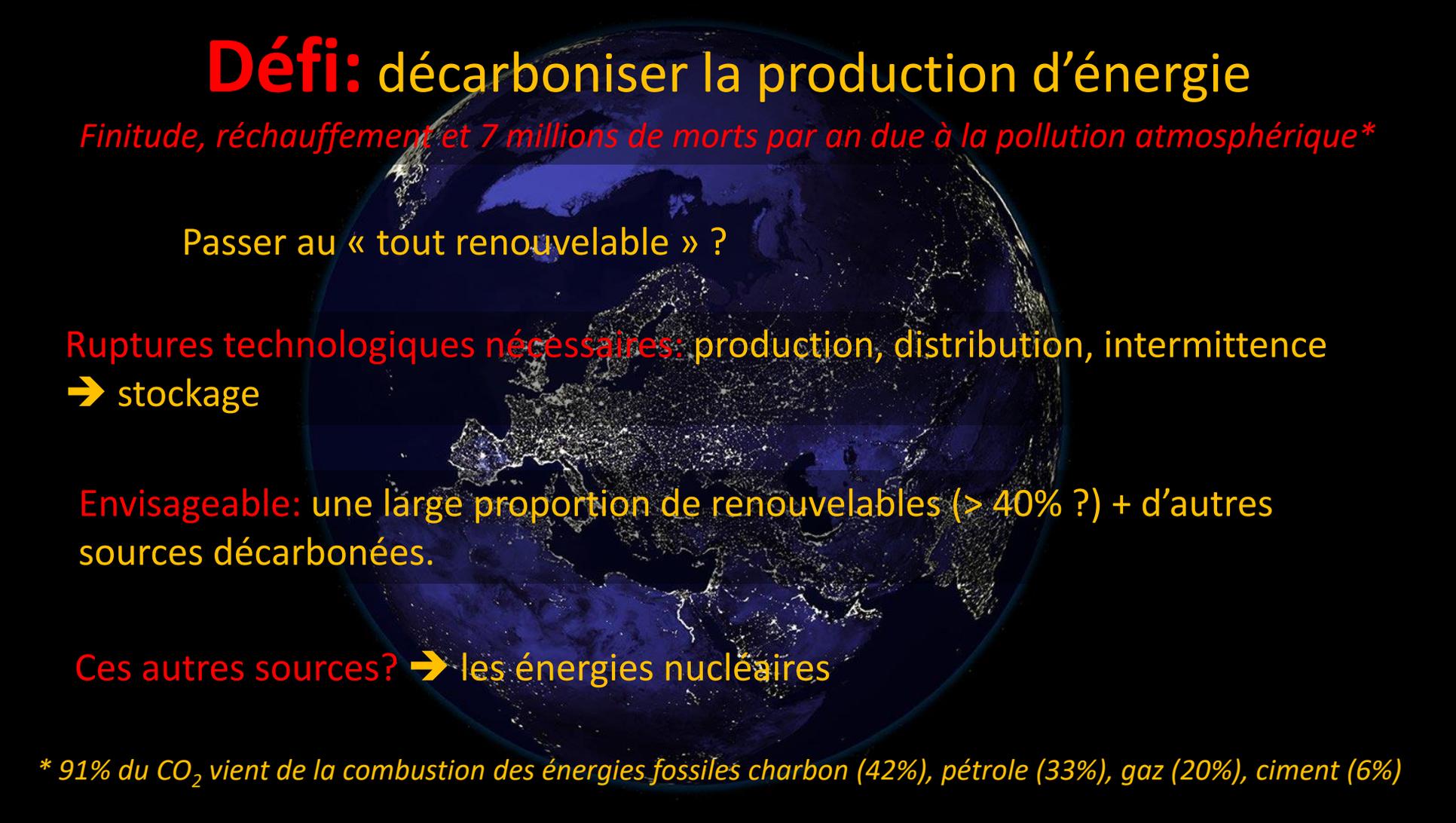
*"The problem I hope scientists will have solved by the end of the century is nuclear fusion.*

*It would provide an inexhaustible supply of energy without pollution or global warming."*

**Stephen Hawking**  
(September 2010)



# Défi: décarboniser la production d'énergie



*Finitude, réchauffement et 7 millions de morts par an due à la pollution atmosphérique\**

Passer au « tout renouvelable » ?

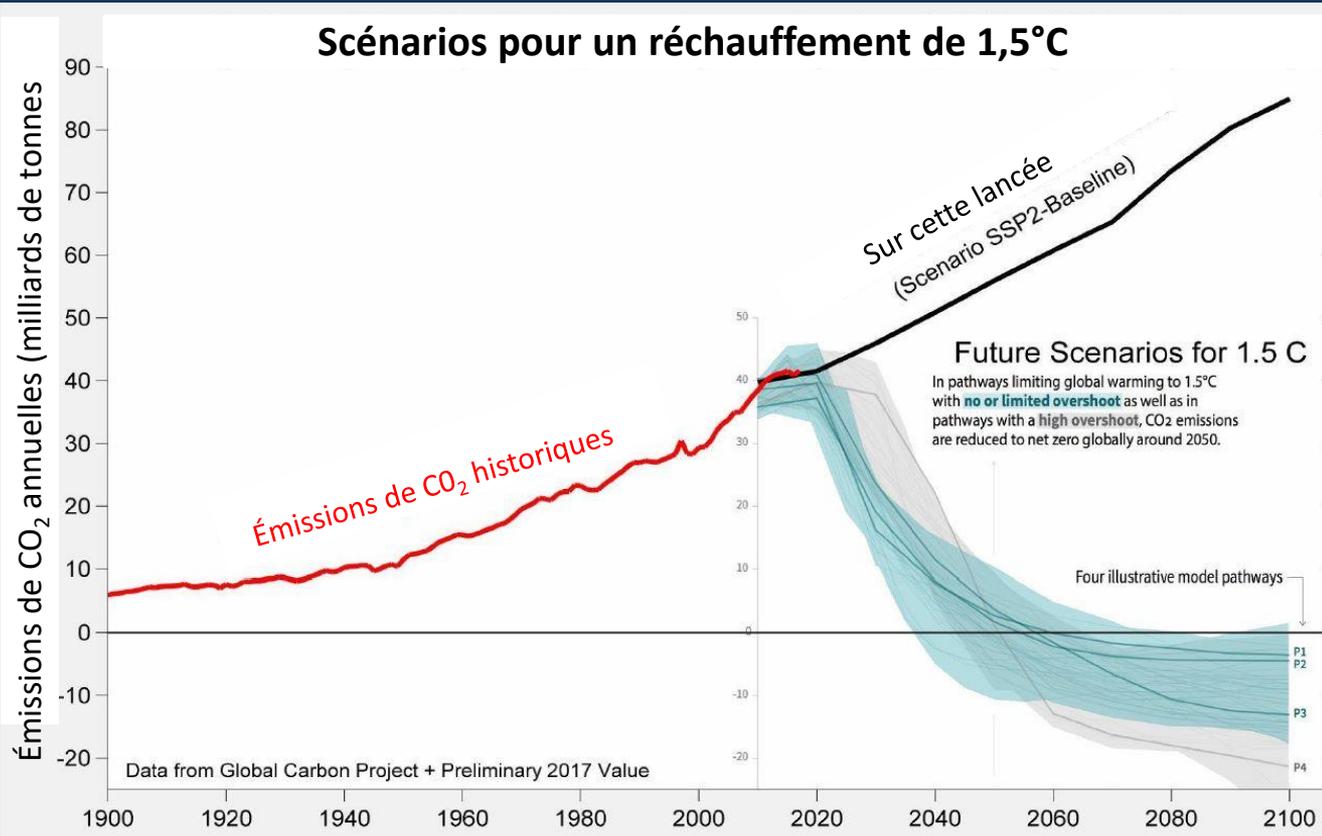
Ruptures technologiques nécessaires: production, distribution, intermittence  
→ stockage

Envisageable: une large proportion de renouvelables (> 40% ?) + d'autres sources décarbonées.

Ces autres sources? → les énergies nucléaires

\* 91% du CO<sub>2</sub> vient de la combustion des énergies fossiles charbon (42%), pétrole (33%), gaz (20%), ciment (6%)

# Scénarios soutenables ou ... non



**Objectif:**  
**« zéro émission »**  
**en 2050**

**UNEP GAP:**  
**Réduction**  
**annuelle de 7.6%**  
**d'ici 2030**

**Le CO<sub>2</sub> ne**  
**disparaît que très**  
**lentement**  
**~ 200 ans**

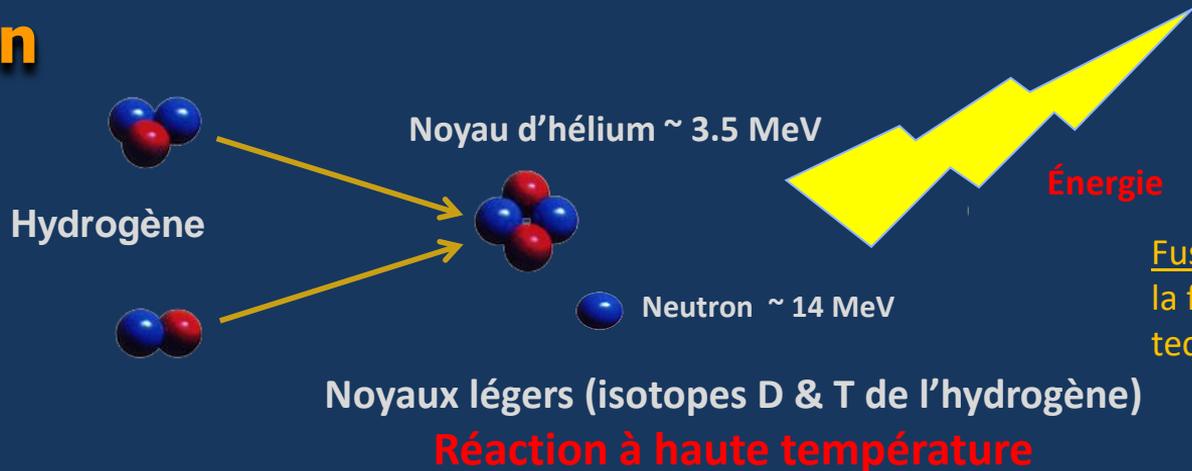
# Séparer... ou réunir?

## Fission



Fission: ~ 10% de la production d'électricité dans le monde (75% en France).

## Fusion



Fusion: ITER doit démontrer la faisabilité scientifique et technologique.

**Réaction à haute température**



**J. Perrin 1919\*, Eddington 1920**

**Rutherford 1930**

**Hans Bethe CNO 1938**

\* 'Atomes et lumières' La revue du mois XXI 113-166, 1920

**L'énergie de fusion: source d'énergie du soleil depuis 5 milliards d'années**  
**Centenaire de la découverte de la fusion dans le soleil!**

# La fusion sur Terre

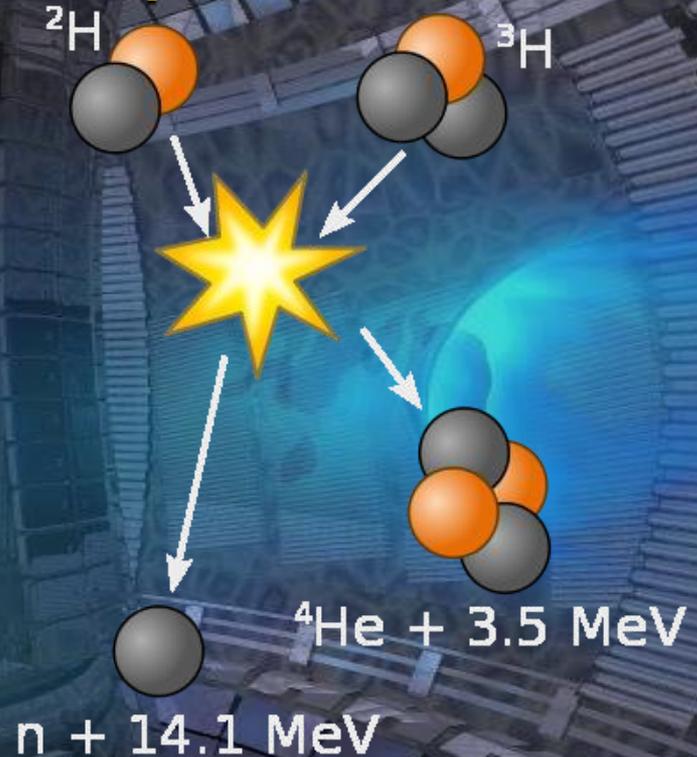
1 gramme de DT = 8 tonnes de pétrole

La fusion peut être obtenue à partir de différentes combinaisons de noyaux légers.

C'est la réaction deutérium + tritium (isotopes de l'hydrogène) qui est la plus accessible.

Les tokamaks\* se sont imposés dès la fin des années 60 comme les plus performantes des machines de fusion.

\* Acronyme russe: *Chambre toroïdale, bobines magnétiques*



# Fusion: énergie concentrée et propre

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

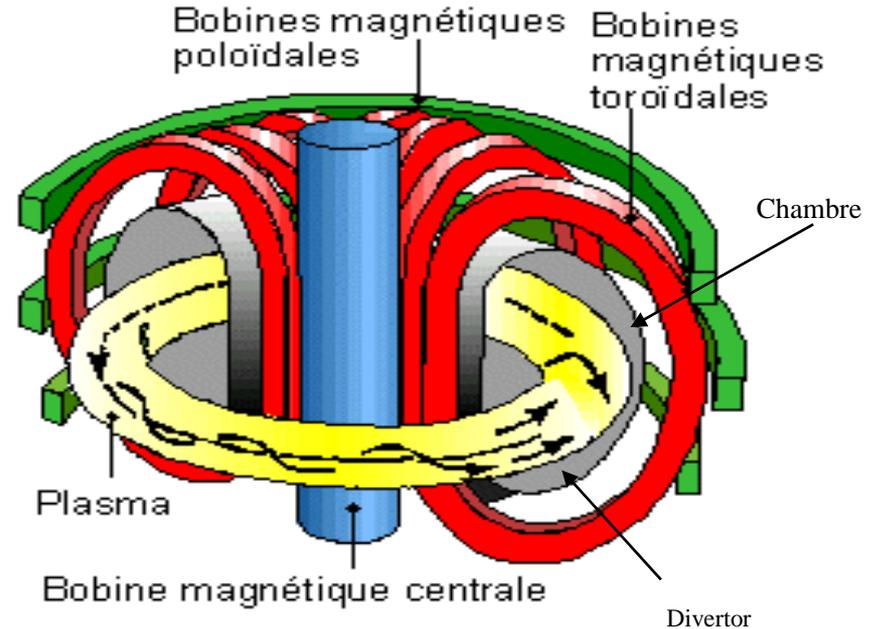
- Réserve illimitée!
- Pas de pollution atmosphérique (CO<sub>2</sub> etc.)
- Pas de déchets radioactifs de haute activité à vie longue **mais des déchets de très basse activité (52%), basse (39%), medium (9%)**
- Pas de possibilité d'emballement
- Pas de prolifération

**Mais:**

Science compliquée: plasma chaud, matériaux, supraconducteurs

# Confiner un gaz à 100 millions de degrés: le Tokamak

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

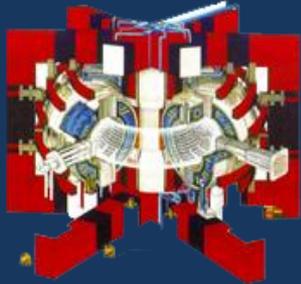


**Gain d'énergie si  $nT\tau_E \sim 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s} \sim 1 \text{ bar} \cdot \text{s}$**

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

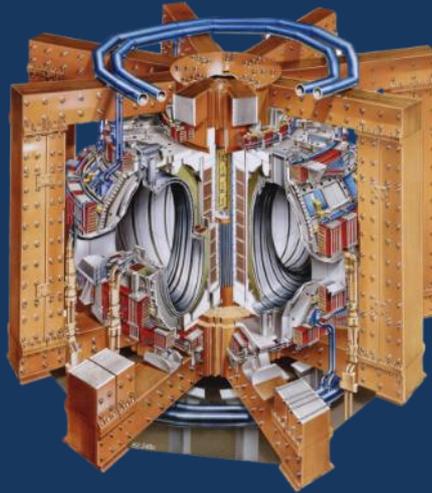
**Quelle taille faut-il pour un bon rendement? → ITER**

# Un paramètre-clé: la taille



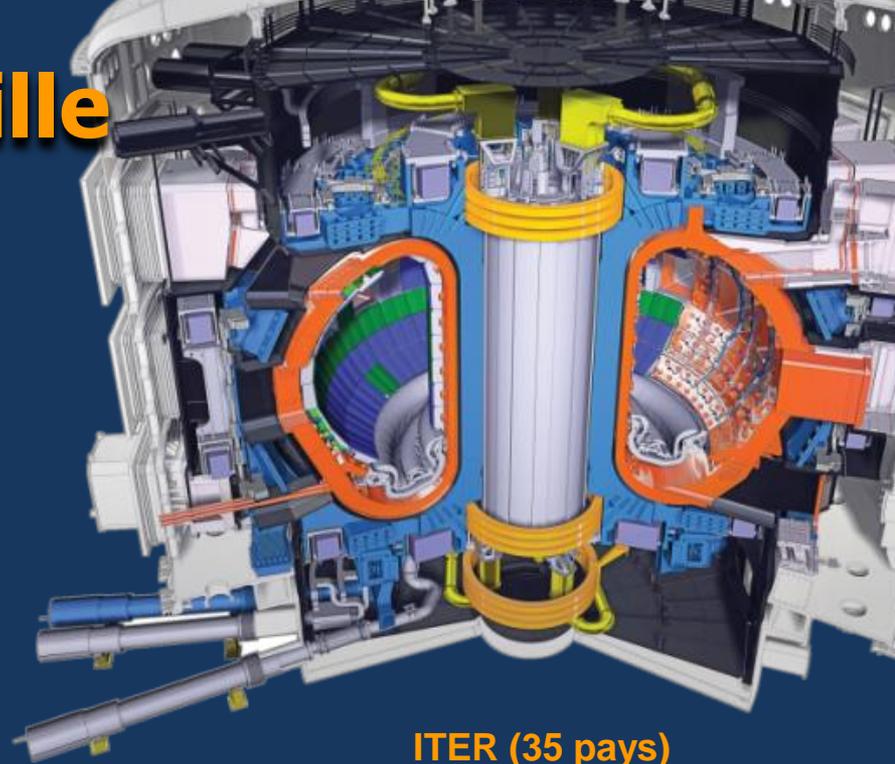
**Tore Supra-WEST (France-CEA)**

$V_{\text{plasma}}$	25 m <sup>3</sup>
$P_{\text{fusion}}$	~ 0
$P_{\text{chauffage}}$	~15 MW
Durée <sub>plasma</sub>	~400 s
$I_{\text{plasma}}$	~ 1.5 MA



**JET (Europe)**

$V_{\text{plasma}}$	80 m <sup>3</sup>
$P_{\text{fusion}}$	~16 MW
$P_{\text{chauffage}}$	~23 MW
Durée <sub>plasma</sub>	~30 s
$I_{\text{plasma}}$	~ 5-7 MA



**ITER (35 pays)**

$V_{\text{plasma}}$	830 m <sup>3</sup>
$P_{\text{fusion}}$	~500 MW
$P_{\text{chauffage}}$	~ 50 MW
Durée <sub>plasma</sub>	> 400 s
$I_{\text{plasma}}$	~ 15 MA

# Une cage magnétique géante

Générés des aimants supraconducteurs, des champs magnétiques très puissants confinent le plasma et le maintiennent à l'écart des parois de la chambre à vide.

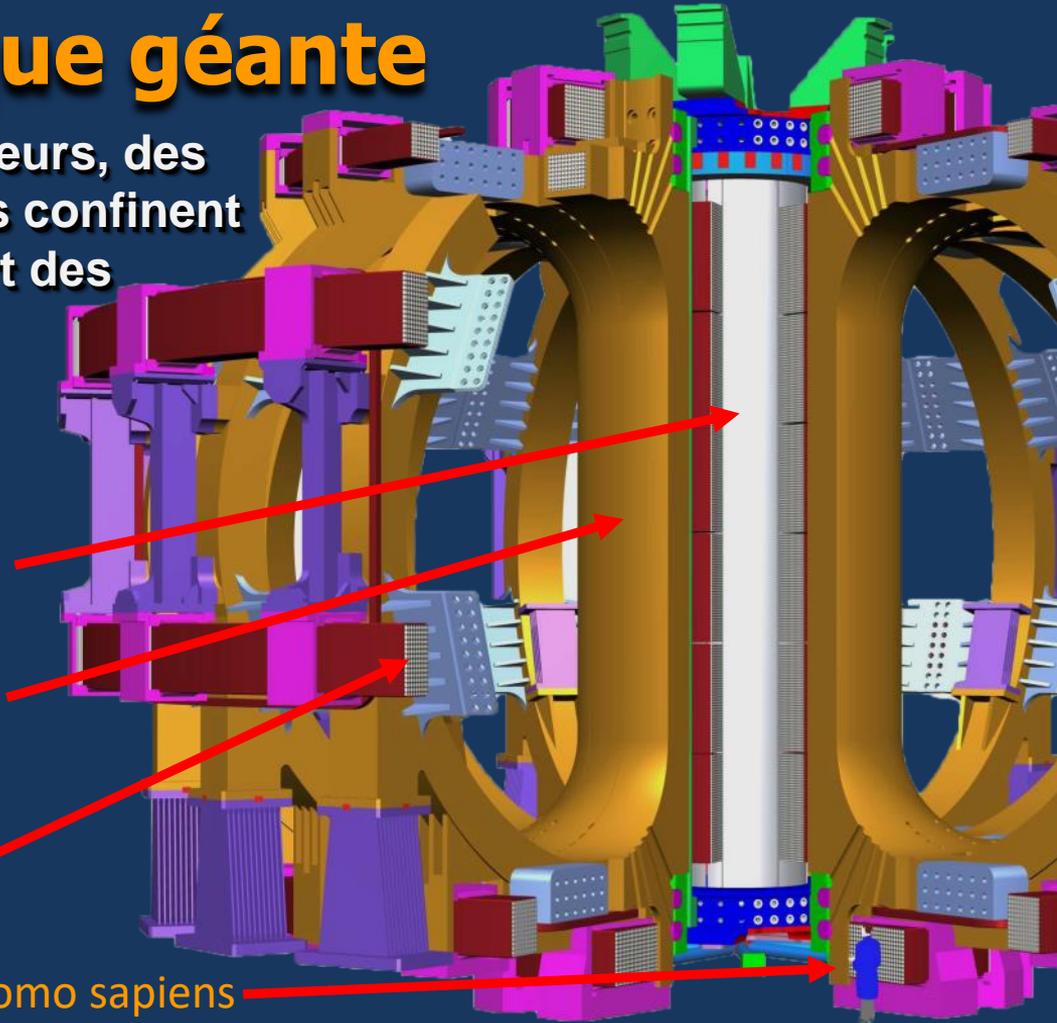
La cage est constituée de:

**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.

Homo sapiens

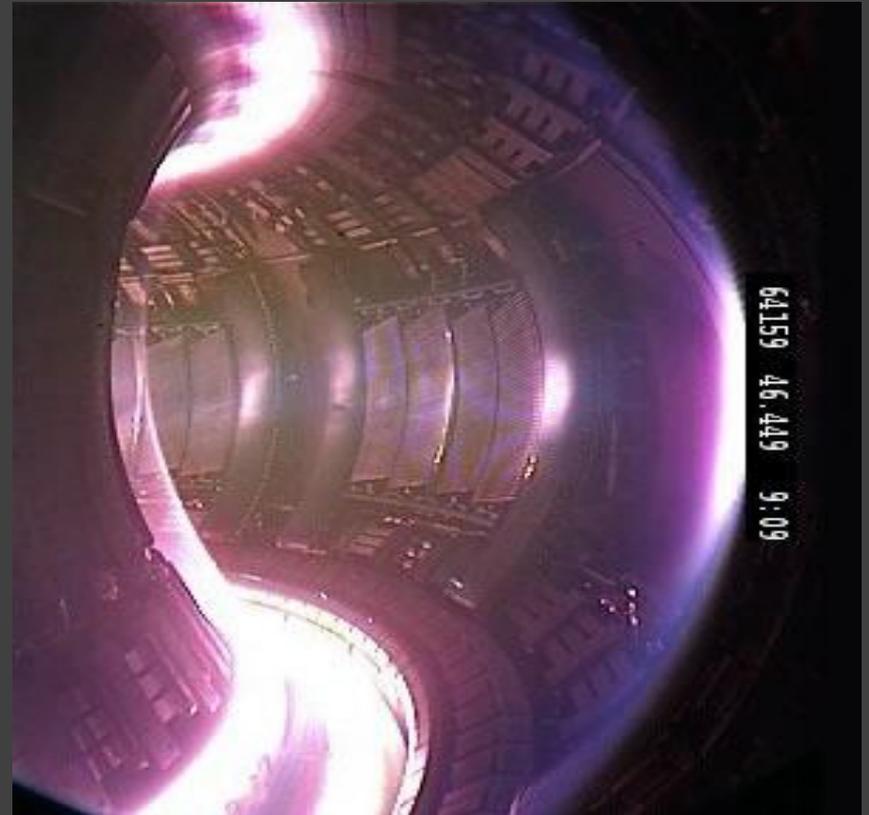
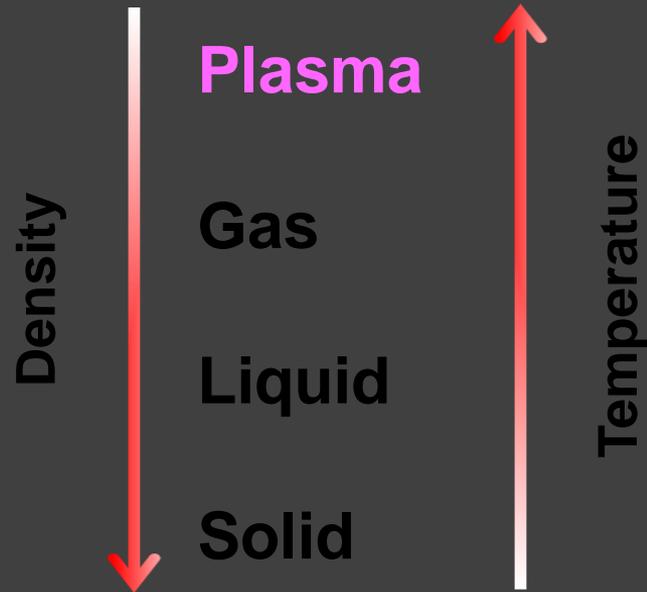


# Fascinating science: Some like it ... hot!

**Plasmas: 4<sup>th</sup> state of matter**

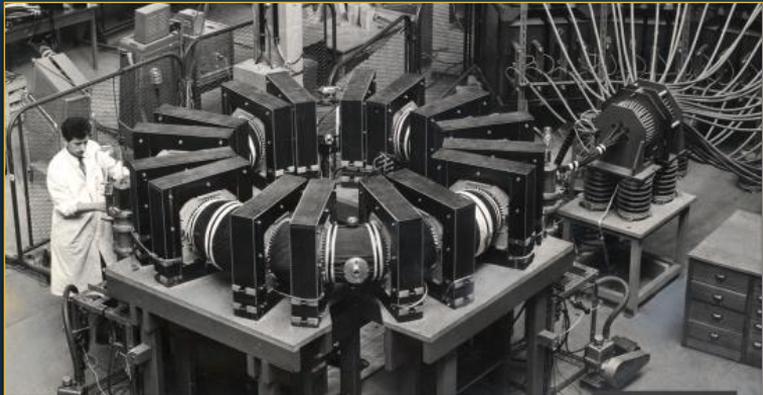
Confined by magnetic fields

Dominated by collective interactions



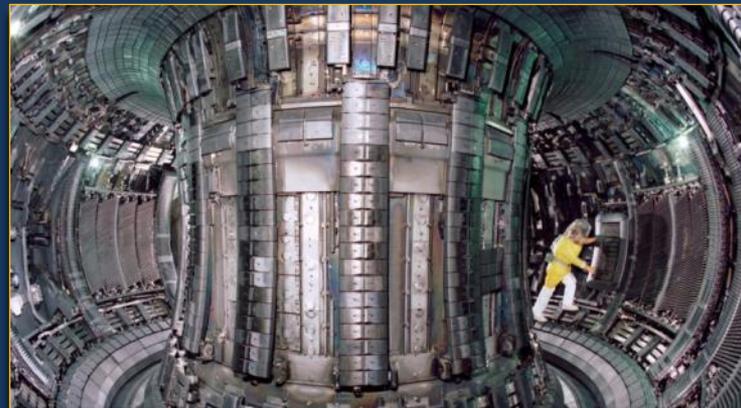
**Plasma in JET**

# 60 ans de progrès



◀ TA-2000,  
France, 1957

JET, Euratom,  
1983-présent ▶  
(Opérations DT:  
16 MW)



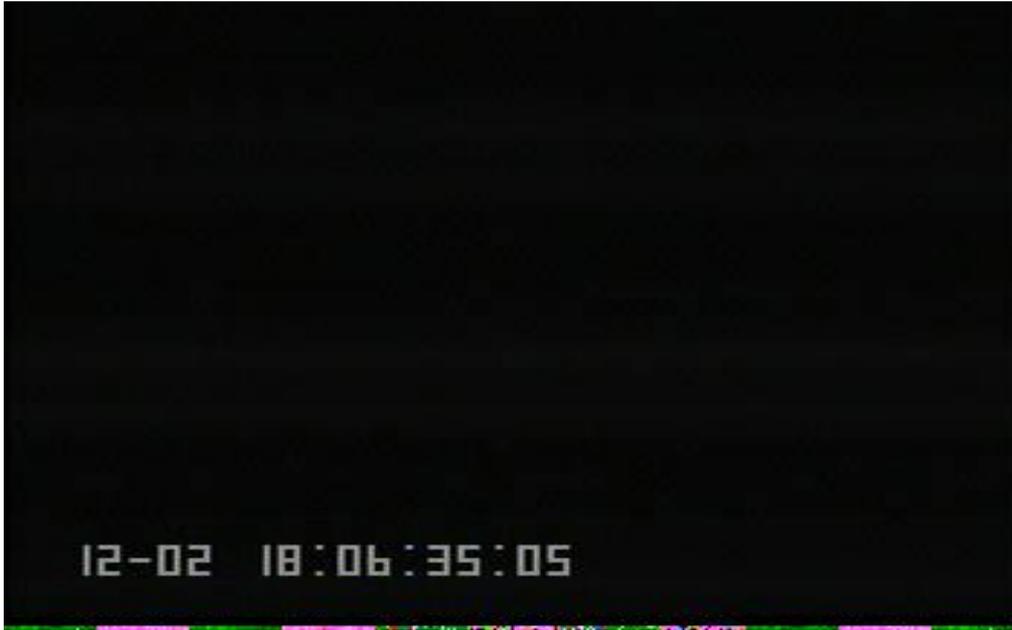
◀ JT-60SA  
Japon-UE  
Mise en service  
imminente

▶ Tore Supra, CEA-  
Euratom  
1988-présent  
(devient WEST,  
banc d'essai d'ITER)



# Tore Supra

(CEA Cadarache + collaborations)



Super-conductors and plasma facing components

→ long pulses. Record of extracted energy

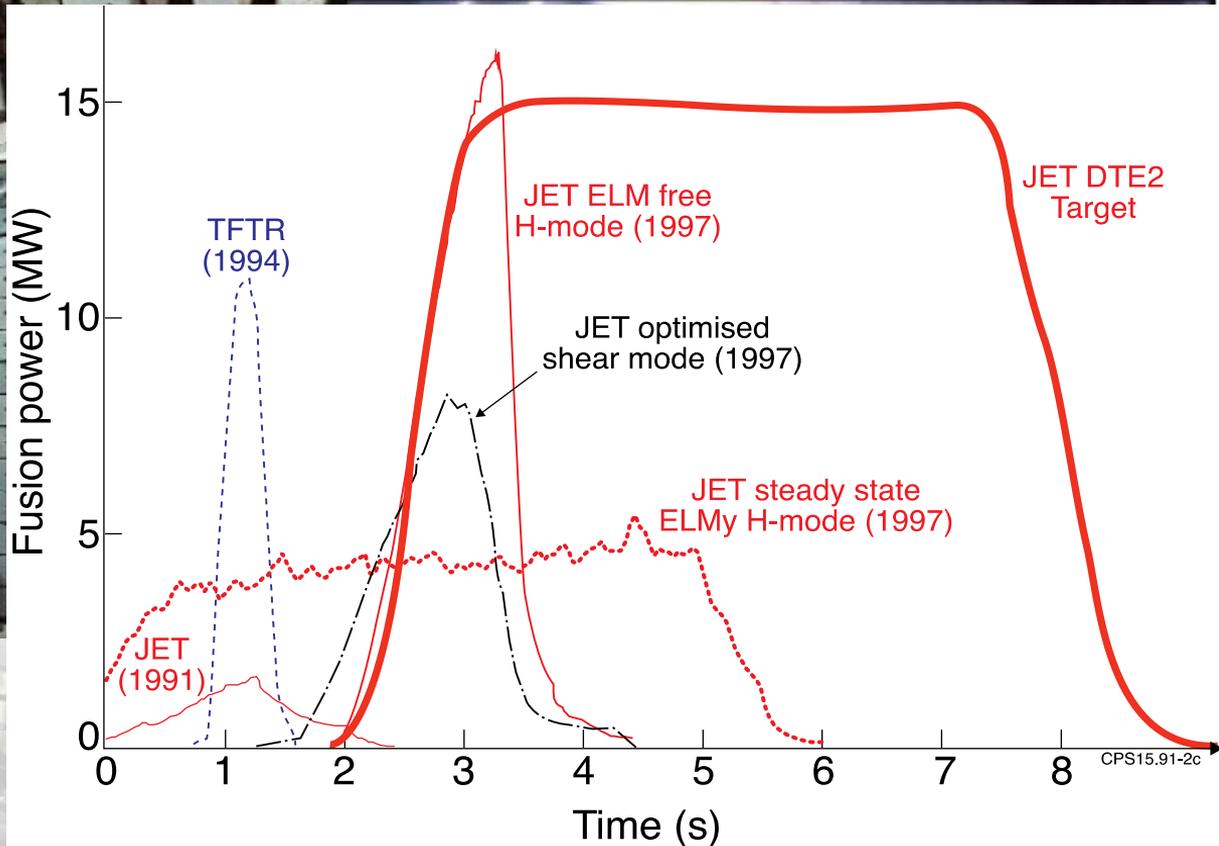
→ A new project, West, is on-going

# JET / TFTR: performance & scaling



- . 16MW; D/T again ?
- . Remote handling
- . International organisation since 1978, still operating.

Without plasma

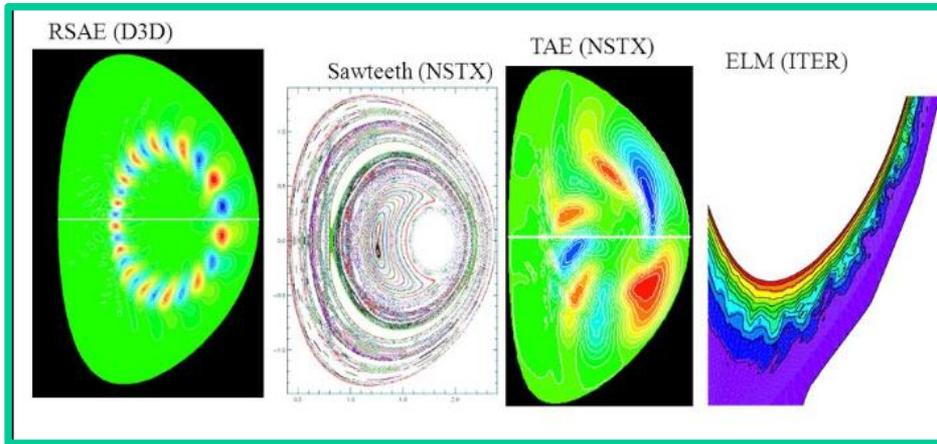


With plasma

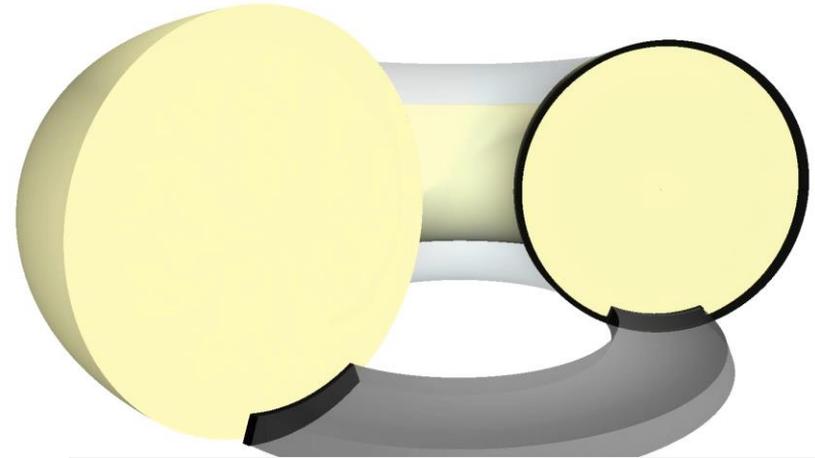
# Fluid and Gyro-kinetic simulations: now connecting to the edge

**Small scale turbulence:** 5D gyro-kinetic codes use massively paralleled computers (e.g. Gysella was tested with 450000 cores in IBM Juqueen Germany).

**Large scale instabilities:** Non linear fluid codes (e.g. JOREK)



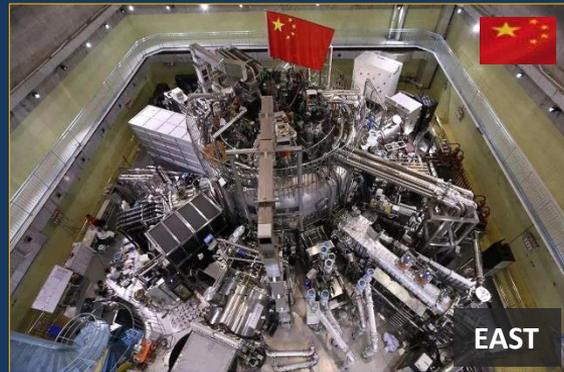
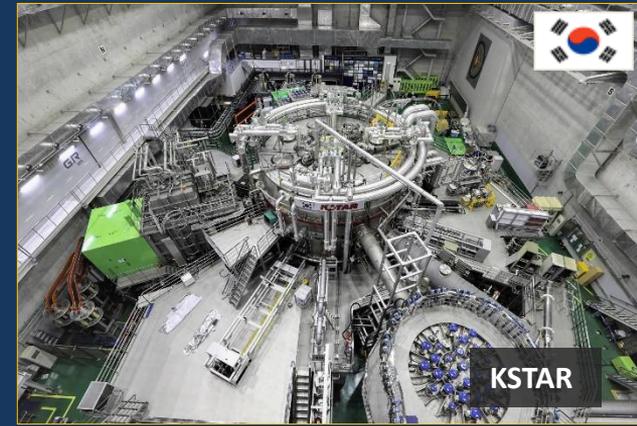
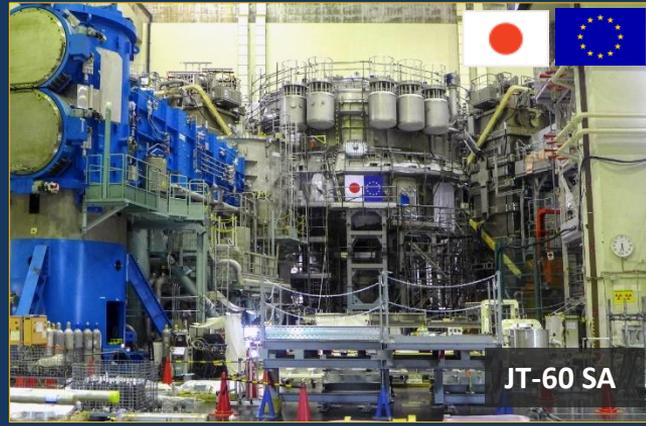
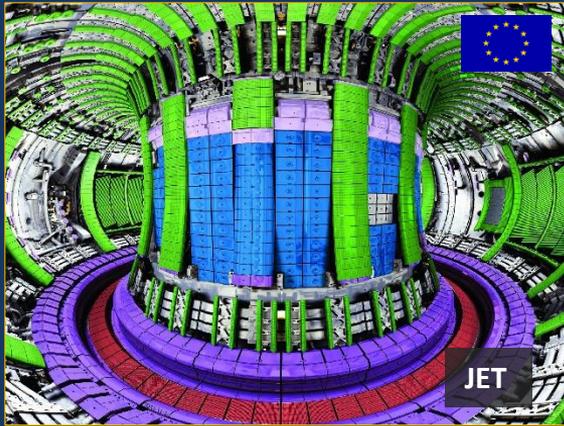
Simulation with non linear fluid codes



Gyro-kinetic ion turbulence simulation

**Next steps:** exa-scale super calculators for first principle predictability of burning plasmas

# Tous ensemble pour la fusion et ITER



## JET

✓ Nouvelle campagne DT en ce moment

## JT60-SA

✓ Aimants refroidis, mise en service imminente

## KSTAR

✓ Tests d'atténuation des disruption en configuration « ITER-like »

## WEST

✓ Phase I (exploration du mode H mode et interaction plasma/divertor) achevée fin 2019.

✓ Phase II, plasmas de longue durée mi-2021

## EAST

✓ Série de plasmas stationnaires en mode H obtenus en 2019

# ITER: de l'intention ... à la réalisation



**Novembre 1985**

Au sommet de Genève, Reagan et Gorbatchev plaident pour la mise en œuvre d'une collaboration internationale « *pour le bénéfice de toute l'humanité* »

**Janvier 2007**

Aménagement du site par la France (défrichage, nivellement, viabilisation).



**1986 - 2001**

Conceptual then design studies

**Décembre 2020**

Début de l'assemblage de la machine conformément à la "feuille de route" (baseline) définie en 2016.

**Août 2010**

Début du chantier de construction sur la plateforme.



# ITER créé en 2007

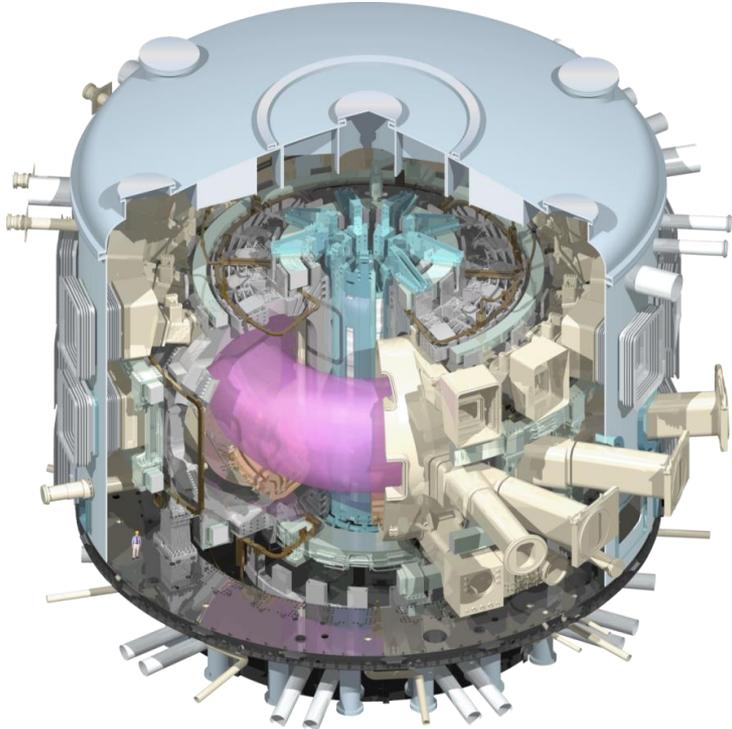
7 partenaires, 35 pays; > 2200 employés sur le site

Une équipe centrale, 7 agences domestiques, fournitures en nature



# Objectif: 500 MW

Environ deux fois la taille du JET

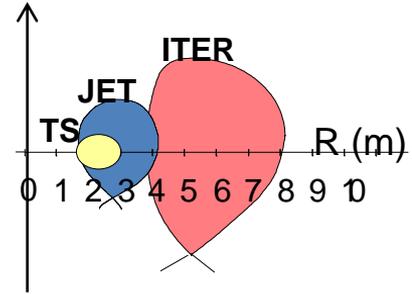


← 50 MW<sub>th</sub>

→ 500 MW<sub>th</sub>

**Plasma en combustion nucléaire:**  $P_{\alpha}/P_{\text{tot}} \sim 0.66$

Dimensions	: 29m x 29m
Masse	: 23.000 Tonnes
Diamètre du plasma	: 12.4 m
Courant plasma	: 15 MA
Champ magnétique	: 5.3 T sur l'axe
Gain, $P_{\text{fus}}/P_{\text{in}}$	: 10
Confinement time	: 3.4s
Flux de neutron moyen	: 0.57 MW/m <sup>2</sup>
Durée induction seule	: > 400s



# Quel coût?

An aerial photograph of the ITER construction site. The central focus is a large, dark, rectangular building under construction, surrounded by various construction materials, cranes, and other smaller structures. The site is set in a green, wooded area with some residential or commercial buildings visible in the distance.

**Phase de construction:** Organisation ITER  
Fournitures en nature par les Membres

8,2 milliards € (valeur 2018)  
12,5 milliards € (estimation)

**Phase d'exploitation:**

300 millions €/an

**Phase de mise à l'arrêt:**

281 millions € (valeur 2001)

**Phase de démantèlement:**

530 millions € (valeur 2001)

# Qui fournit quoi?

Solénoïde central (6)



Alimentation (31)



Bobines de champ toroidal (18)



Bobines de champ poloïdal (6)



Bobines de correction (18)



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

Cryostat



Bouclier thermique



Chambre à vide



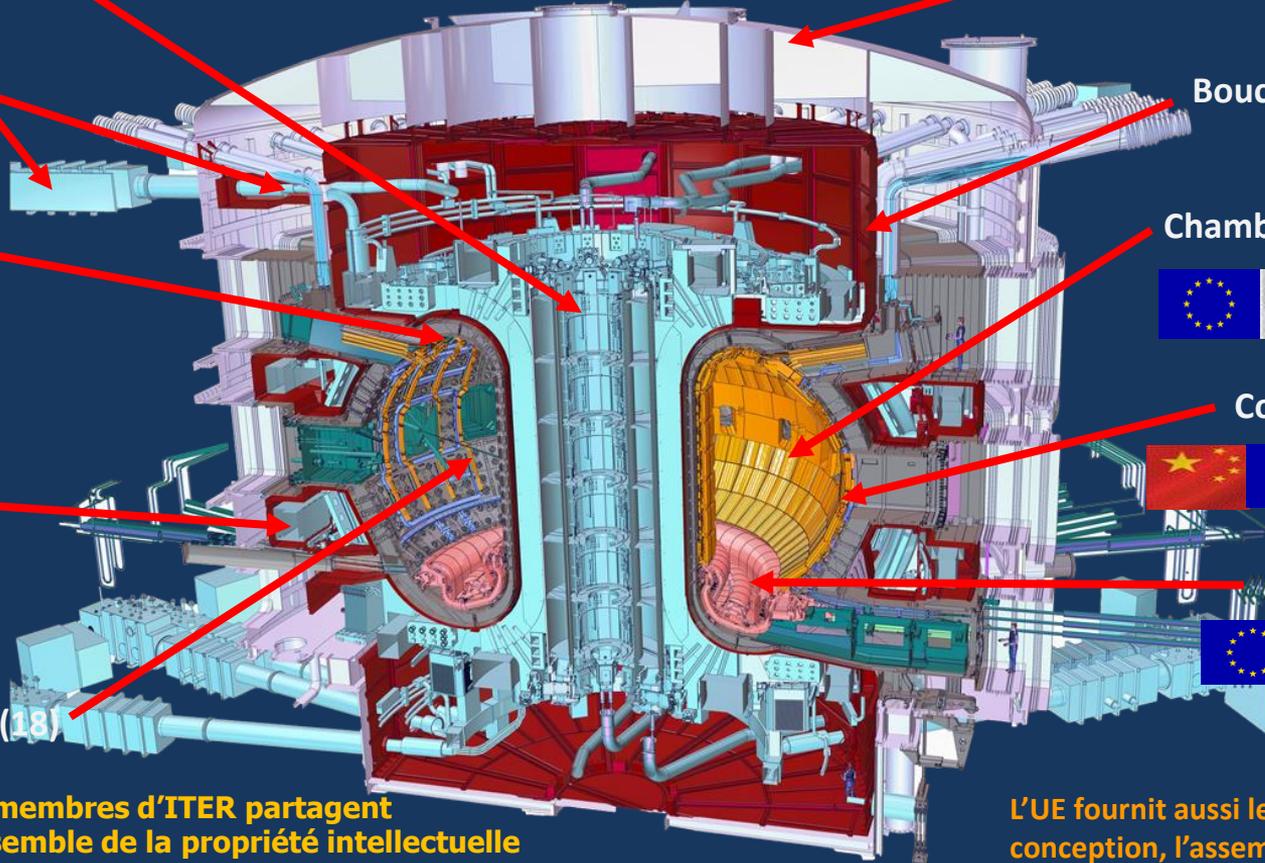
Couverture



Divertor

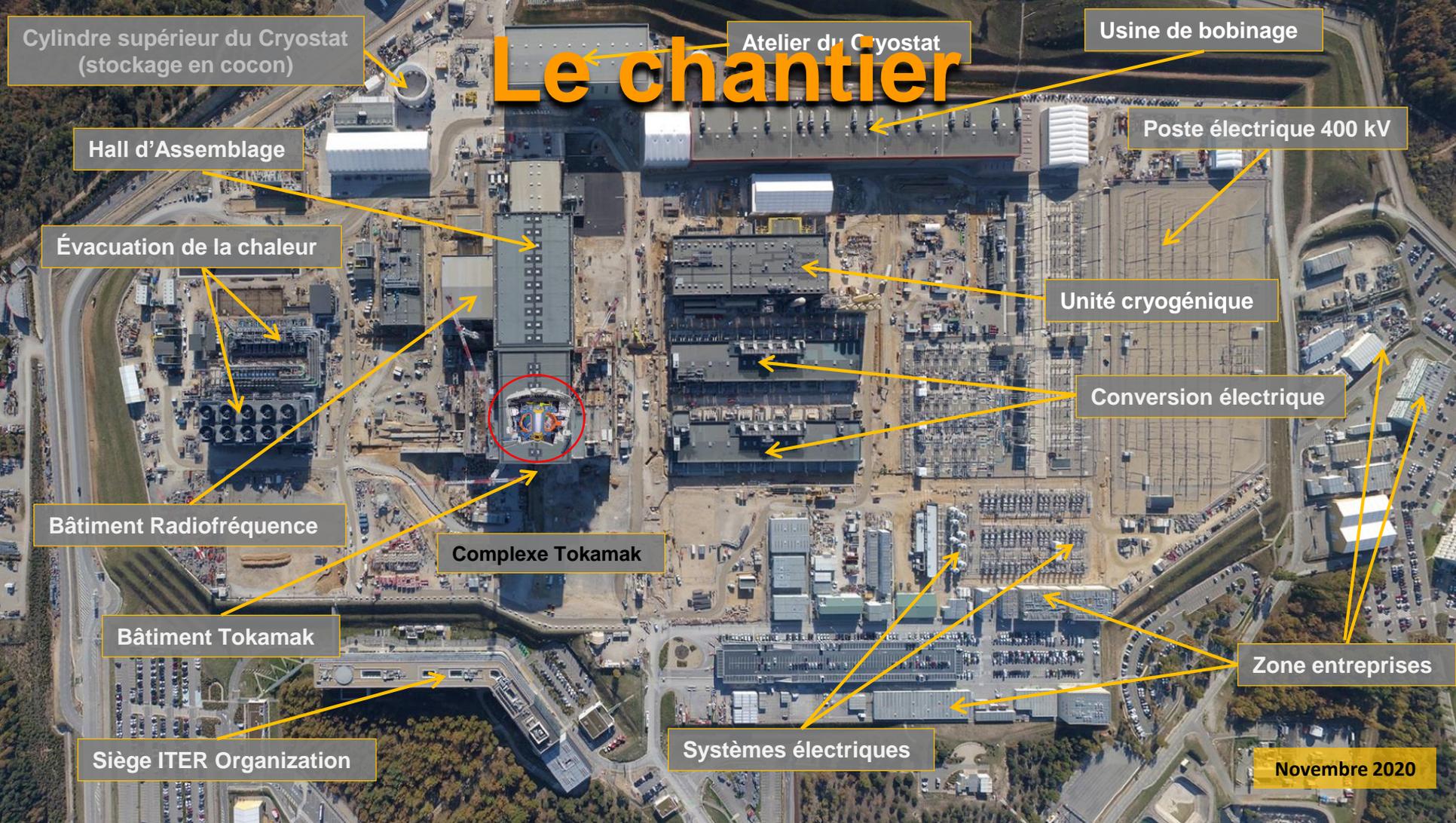


**L'UE fournit aussi le site et l'IO la conception, l'assemblage et l'opération**



# Vue récente du site À Cadarache en Provence





Cylindre supérieur du Cryostat  
(stockage en cocon)

# Le chantier

Atelier du Cryostat

Usine de bobinage

Hall d'Assemblage

Poste électrique 400 kV

Évacuation de la chaleur

Unité cryogénique

Conversion électrique

Bâtiment Radiofréquence

Complexe Tokamak

Zone entreprises

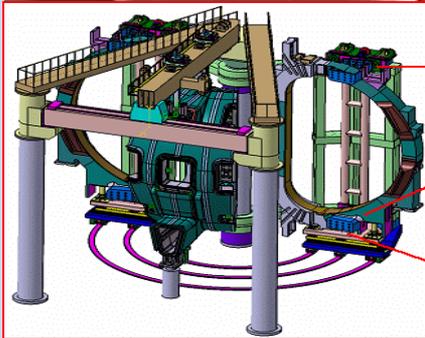
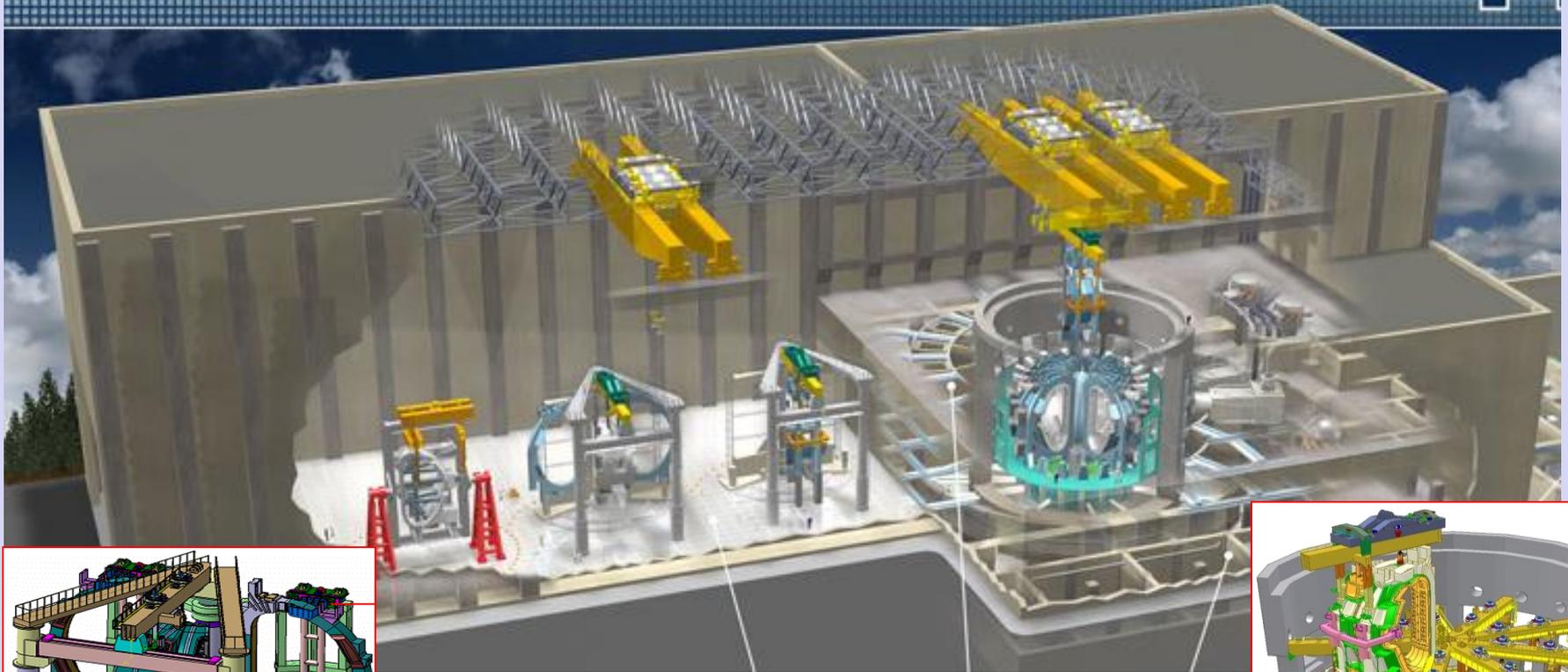
Bâtiment Tokamak

Systèmes électriques

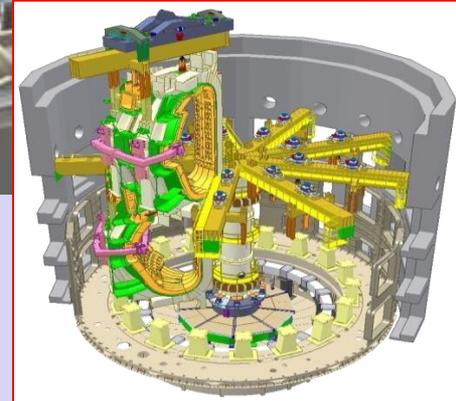
Siège ITER Organization

Novembre 2020

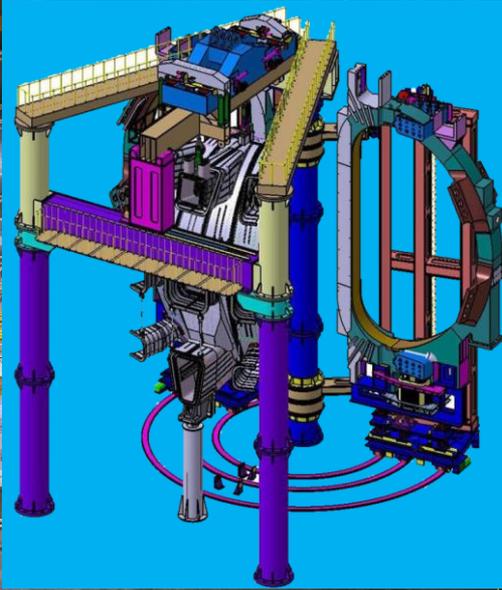
# Assembly and Torus Halls



The 2 sub-assembly tools and installation of a sub-assembly in the cryostat using the double overhead travelling crane (1,500 tons total lifting capacity).



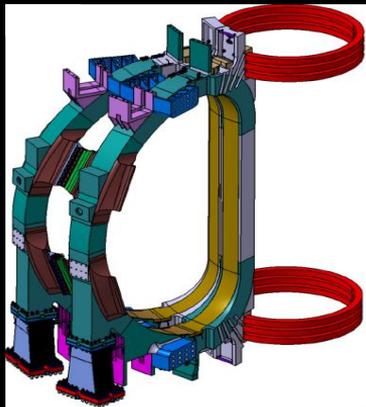
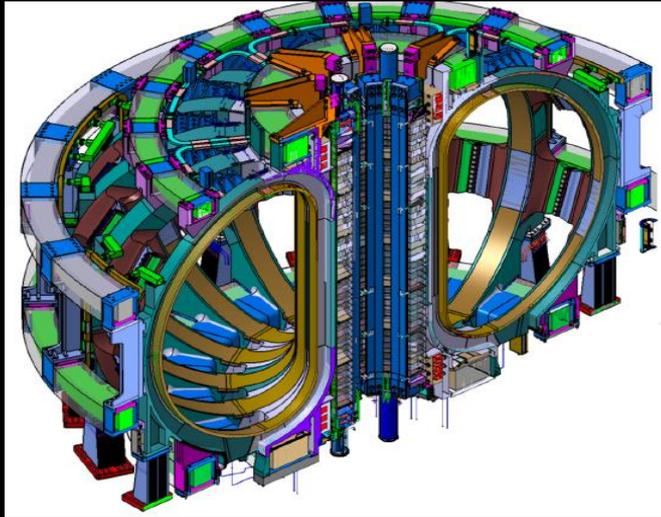
# Assembly Hall



Before being integrated in the machine, the components are pre-assembled in this 6,000 m<sup>2</sup>, 60-metre high building. The Assembly Hall is equipped with a double overhead travelling crane with a total lifting capacity of 1,500 tons. Load tests, both static and dynamic (1,875 – 1,650 tons), were finalized in December 2017. To the right, the installation of the giant tool (SSAT-1) is ready for making the 1<sup>st</sup> sub-assembly of a 1/9 module

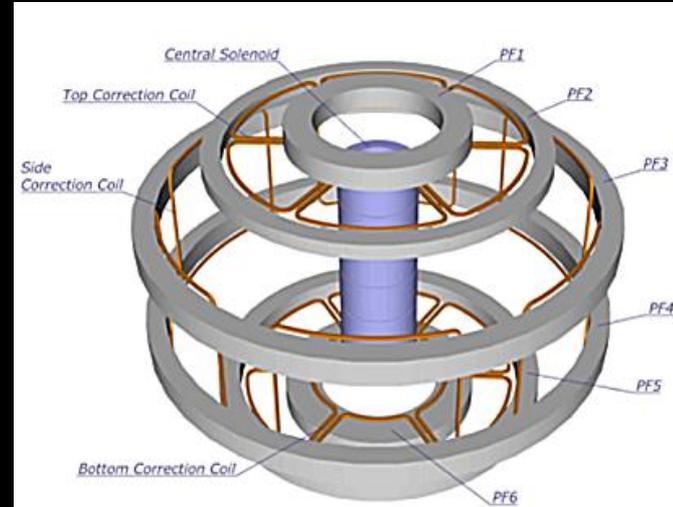
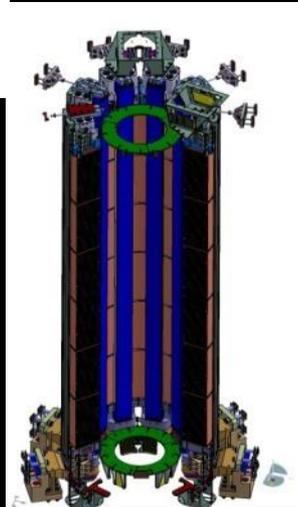
# ITER Magnet System (51 GJ stored energy)

- At the heart of the ITER tokamak is the largest superconducting magnet system ever designed
  - 18 Nb<sub>3</sub>Sn Toroidal Field (TF) Coils,
  - a 6-module Nb<sub>3</sub>Sn Central Solenoid (CS),
  - 6 NbTi Poloidal Field (PF) Coils,
  - 9 NbTi pairs of Correction Coils (CCs).



Pair of TF Coils

CS Coil



PF 1



PF 2-6



CCs

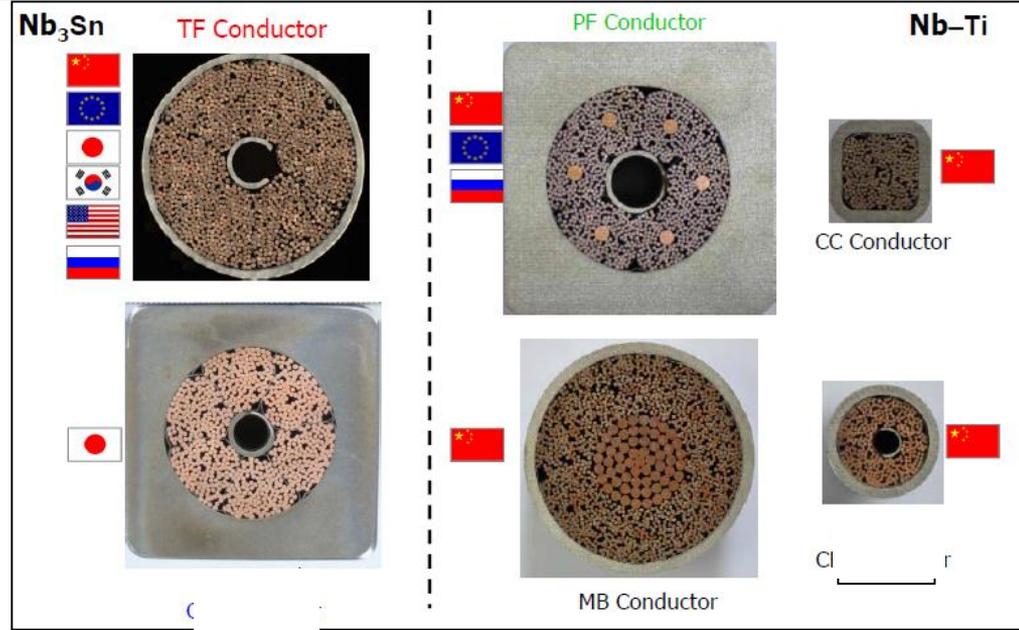


# ITER Conductors

ITER coils are wound from **Cable-In-Conduit Conductors**, relying on superconducting multifilament composite strands mixed with pure Cu strands/cores. **The strands are assembled around an open central cooling spiral.** The cable and its spiral are inserted inside **a stainless steel conduit** which provides helium confinement.

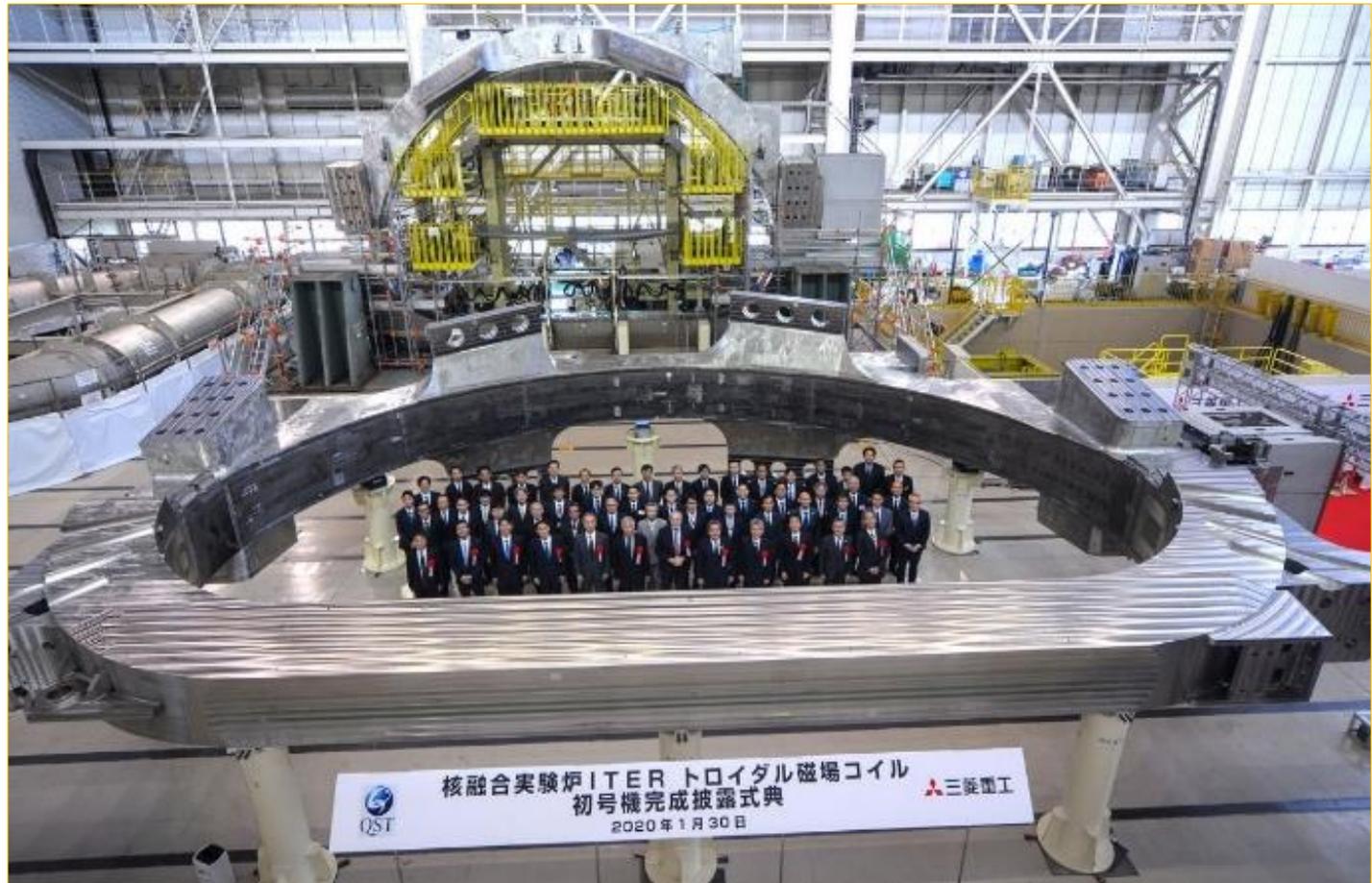


-200 km, 2800 tons of superconductors (90% of the total required) **have been manufactured and validated in 2017**  
-Largest superconductor procurement in industrial history  
-**Largest Nb<sub>3</sub>Sn strand production ever** – pre-ITER world production was ~15 t/year

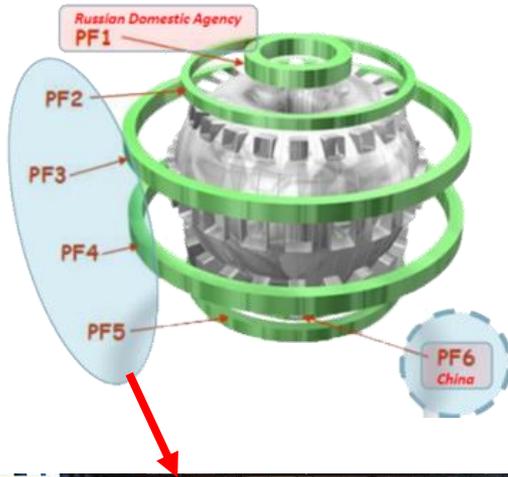


Completion of the procurement of 43 kilometres (700 tonnes) of niobium-tin cable-in-conduit superconductor for ITER's CS in December 2017

# Completed superconducting TF coil



# Poloidal Field Coils



## PF Coils #2, #3, #4, #5:

Too large components to be transported, they are manufactured at the PF Coil Winding Facility on the ITER site.

PF Coil #1: Manufactured in Russia

PF Coil #6: Manufactured in China



Four of ITER's six ring-shaped magnets (the poloidal field coils, 8 to 24 m in diameter) being manufactured by Europe in this 12,000 m<sup>2</sup> facility.

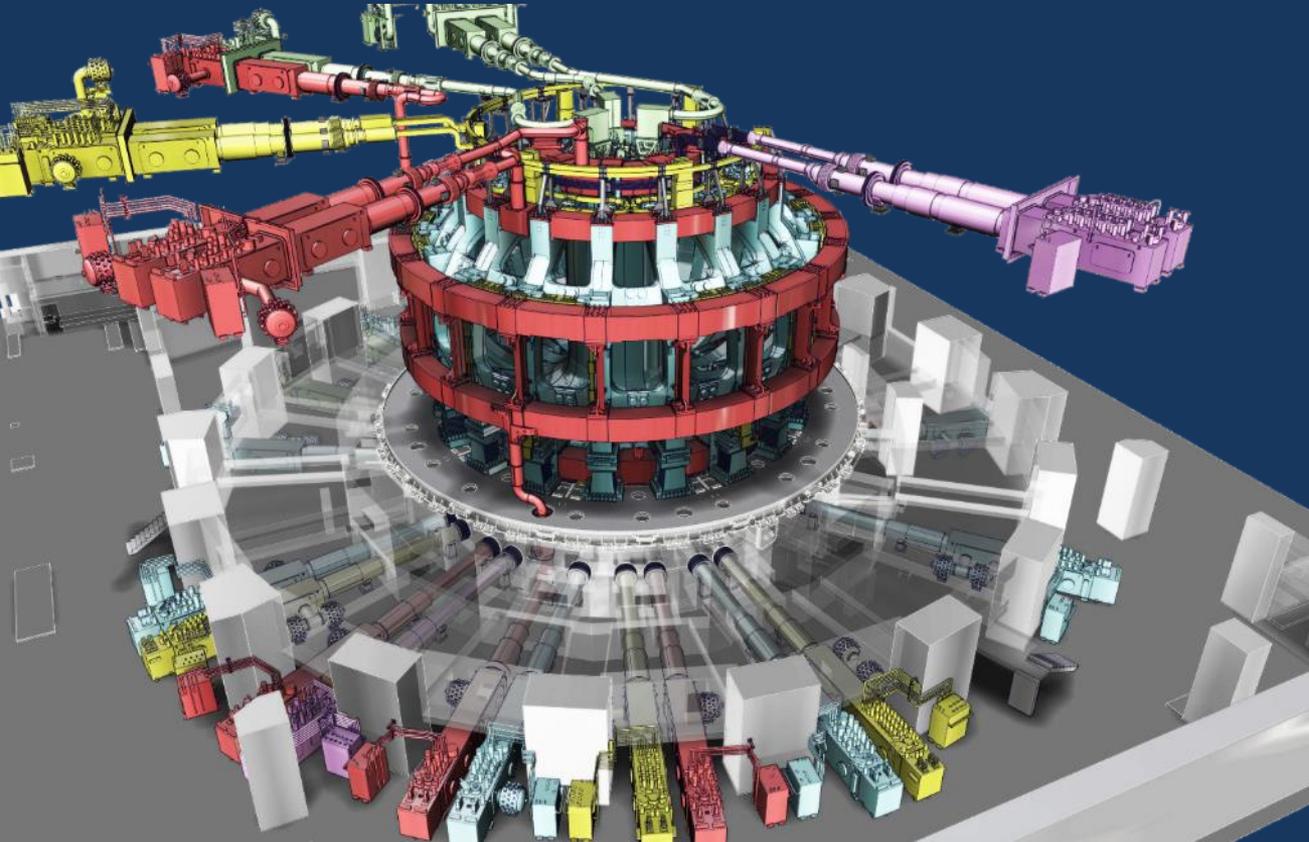


First-completed double pancake of PF1 after vacuum pressure impregnation with epoxy resin



Fabrication and qualification tests of PF6 winding pack stack sample were successfully completed.

# 10 000 tonnes d'aimants supraconducteurs

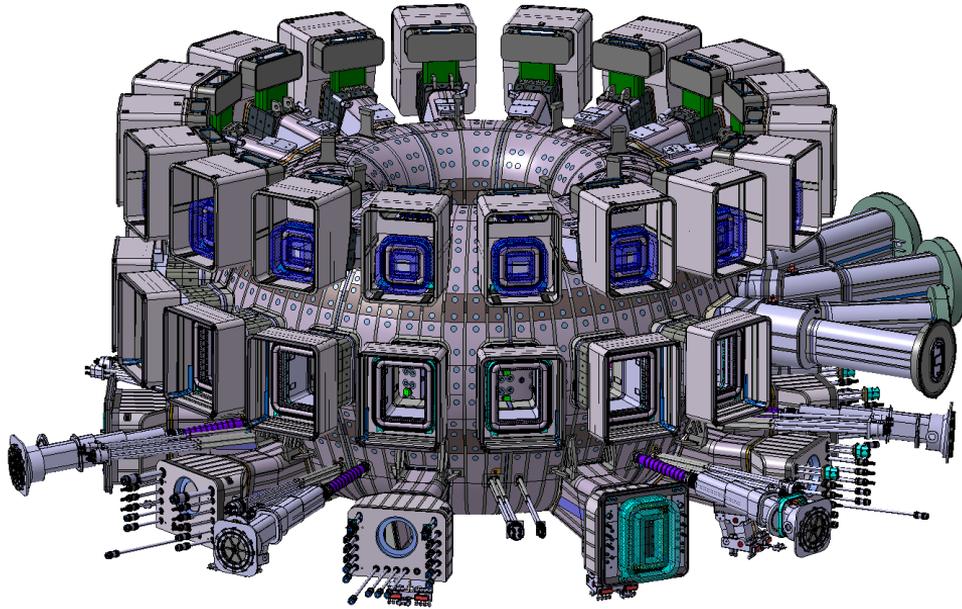


10 000 tonnes d'aimants supraconducteurs (total 51 Gigajoules) produisent le champ magnétique qui génère, confine, modèle et contrôle le plasma dans la machine.

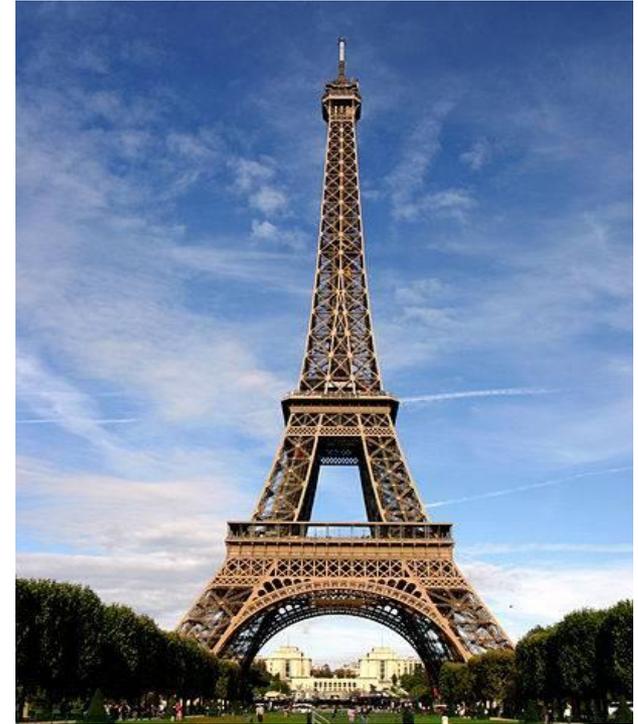
Les aimants de **niobium-étain** ou **niobium-titane** sont refroidis à 4K (– 269 °C) par un flux d'hélium supercritique.

Les amenées de courant utilisent des **supraconducteurs haute température**

# The ITER Vacuum Vessel



**29 m outside diameter x 11.3 m tall, ~8000 t**  
**Double walled (60 mm thick) toroidal structure with internal shield plates (primary shielding) and ferromagnetic inserts between the walls (to reduce the toroidal field ripple).**



**Weight of Eiffel Tower :**  
**~7300 t**  
**324 m tall**

# Cryostat

Provides Vacuum Insulation  
for Superconducting Coils

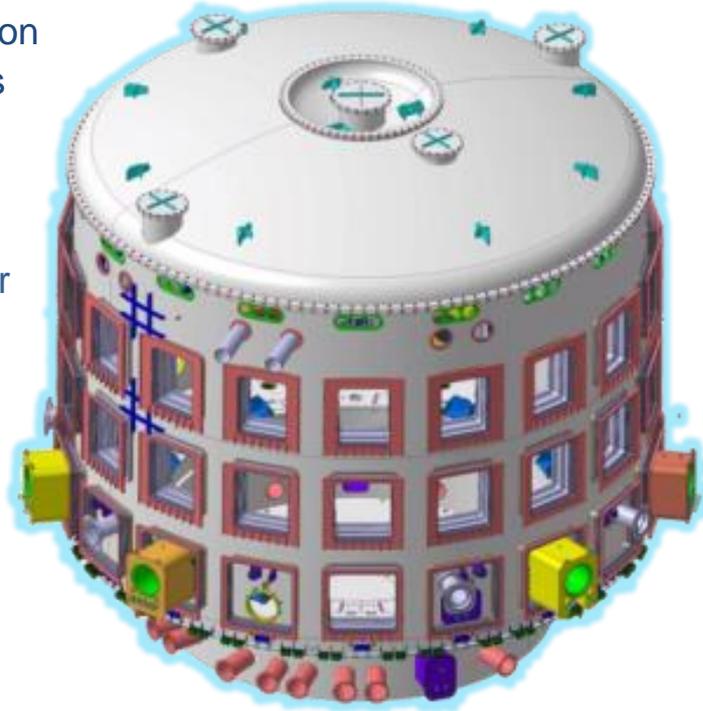
Diameter: 29.4 m

Height: ~29 m

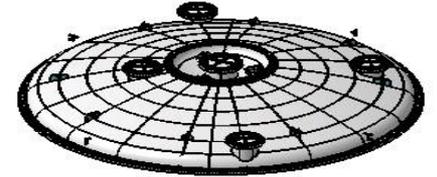
Mass: ~3500 t

Base pressure  $<10^{-4}$  mbar

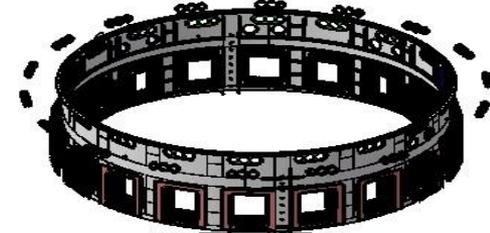
Stainless steel 40 – 180  
mm thick



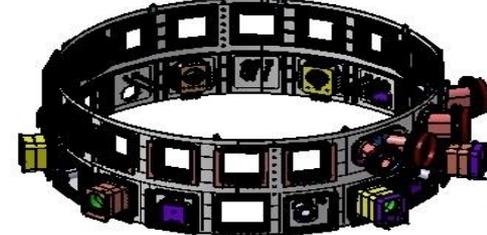
Top lid



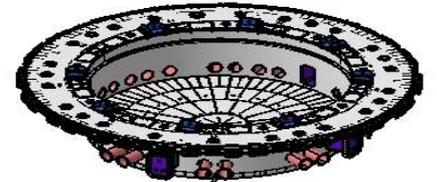
Upper  
cylinder



Lower  
cylinder

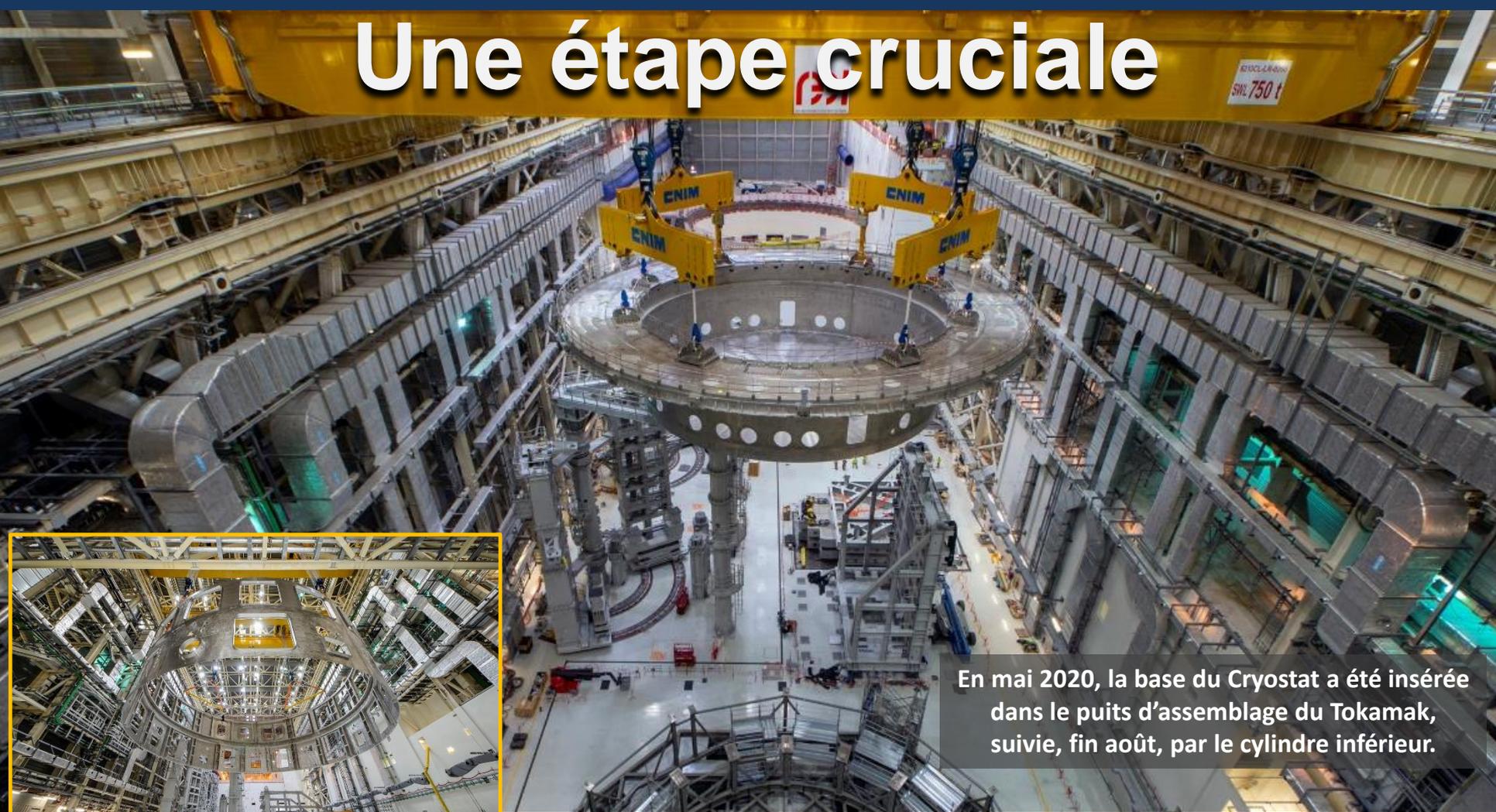


Base  
section



Manufactured in India, the cryostat (the insulating vacuum vessel that encloses the machine) is dispatched in 54 modules to ITER. They are then assembled and welded together on site at the Cryostat Workshop on the ITER site

# Une étape cruciale



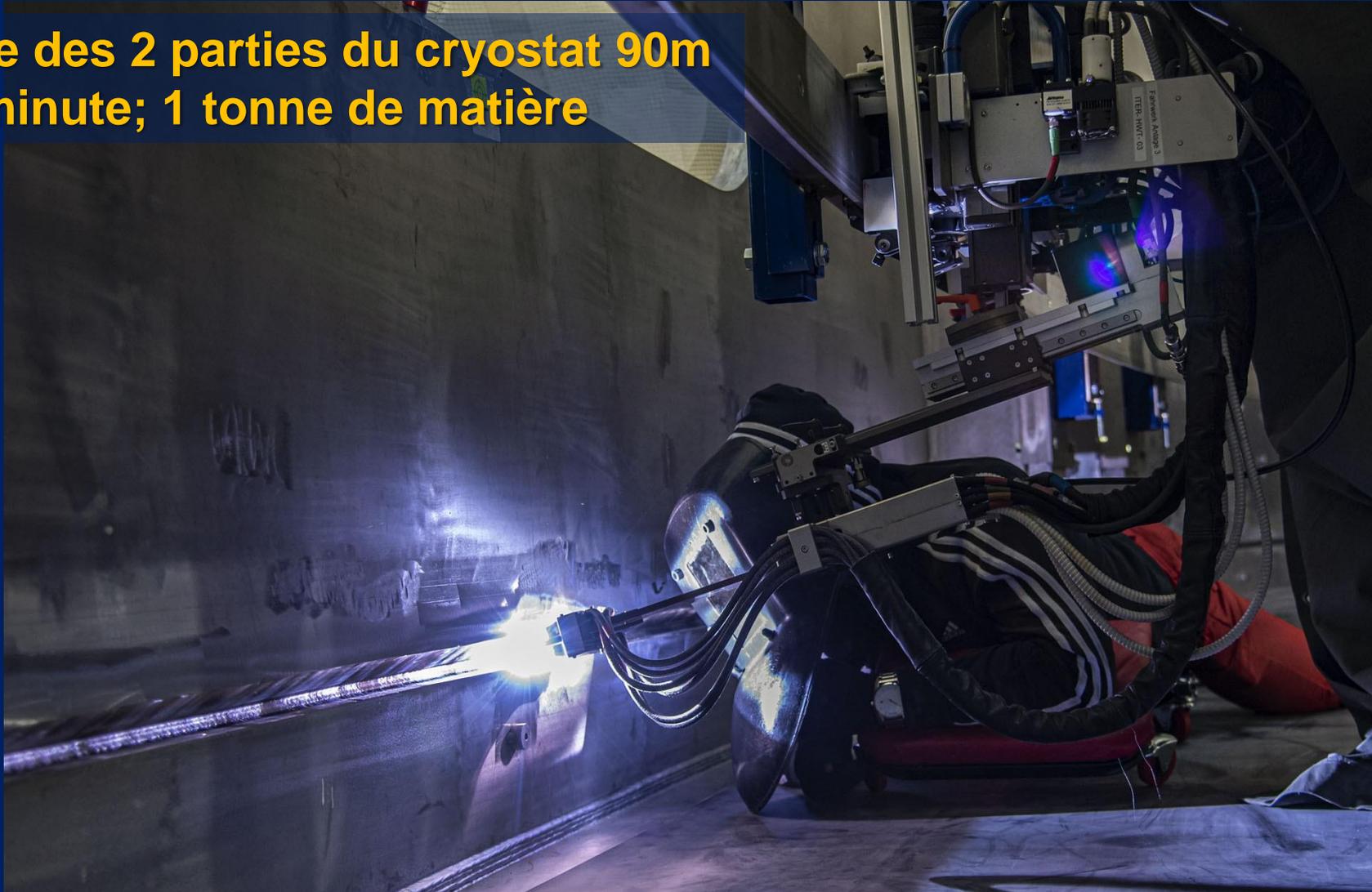
En mai 2020, la base du Cryostat a été insérée dans le puits d'assemblage du Tokamak, suivie, fin août, par le cylindre inférieur.





**Mise en  
place de la  
moitié  
inférieure  
du  
cryostat**

**Soudure des 2 parties du cryostat 90m  
à 8cm/minute; 1 tonne de matière**



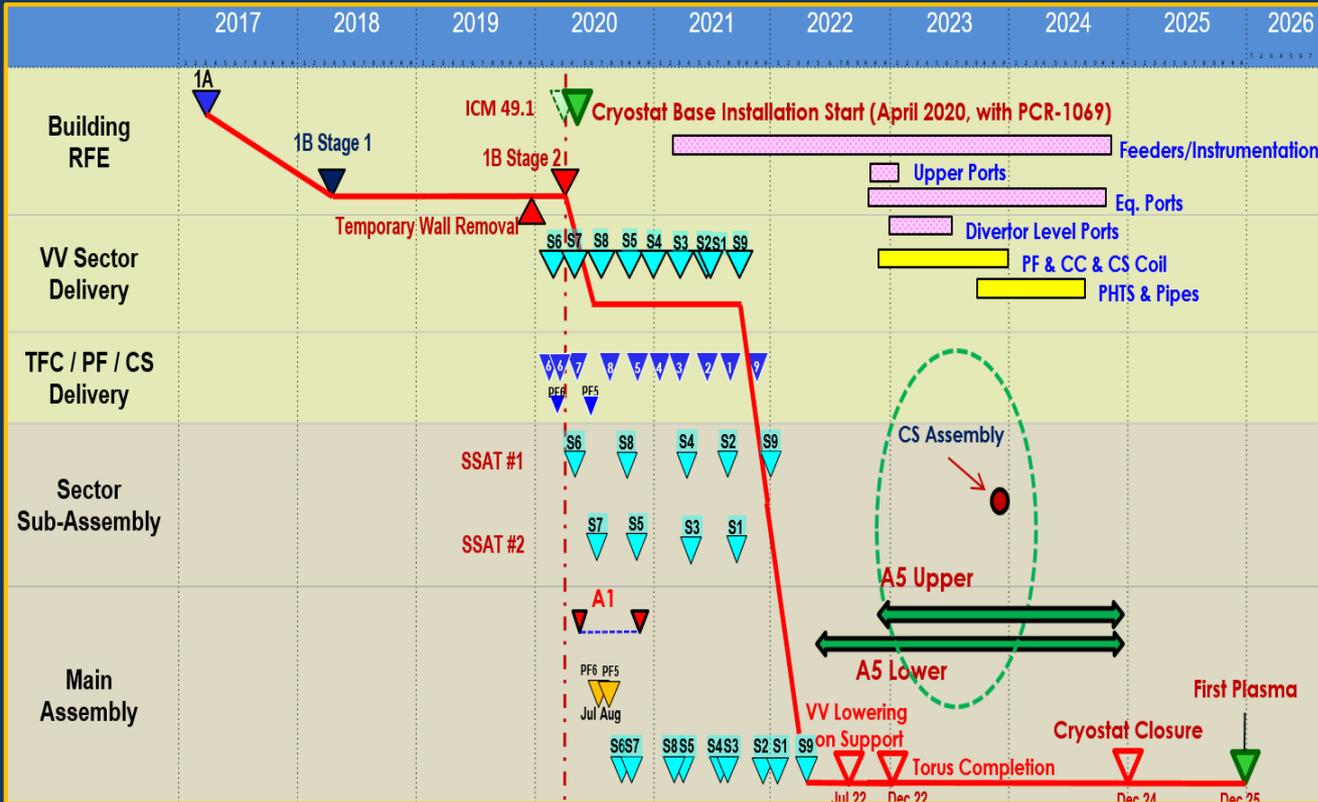
# 28 juillet: lancement officiel de la phase d'assemblage



**Emmanuel Macron:**

*« ITER est un acte de confiance en l'avenir [...] Grâce à la science, demain peut être meilleur qu'hier. »*

# Principales étapes à venir



**Novembre 2020: à 71% du 1<sup>er</sup> plasma**

**2018: Début assemblage machine sous le cryostat**

**2020: Installation de la moitié inférieure du cryostat**

**2022: Fin de l'assemblage des secteurs**

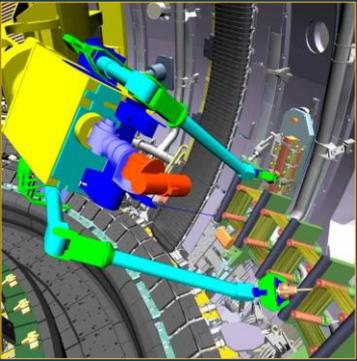
**2024: Fermeture du cryostat**

**2025: Tests intégrés**

**Fin 2025: 1<sup>er</sup> plasma**

**2035: Pleine puissance**

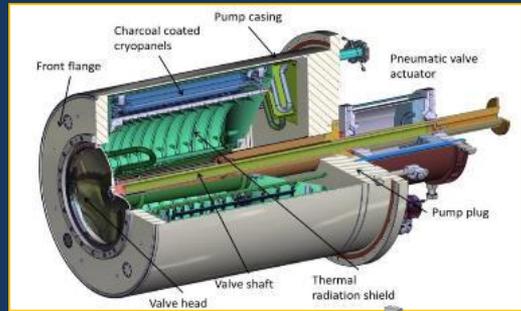
# Innovation



▶ Robotique en environnement extrême



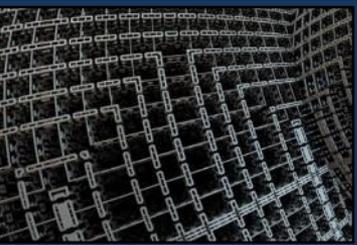
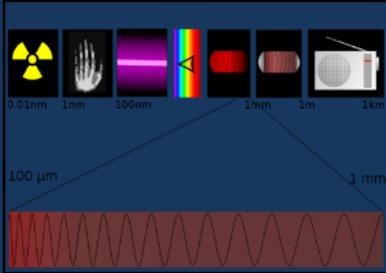
▶ Electronique de puissance



▶ Transmission de signal ultra-haut débit (TeraHertz)



▶ Supraconducteurs

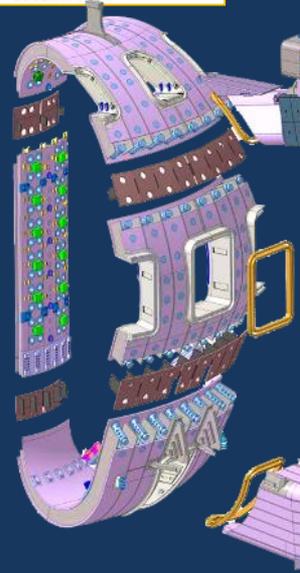


▶ Filtres de haute-technologie



▶ Emboutissage par explosion

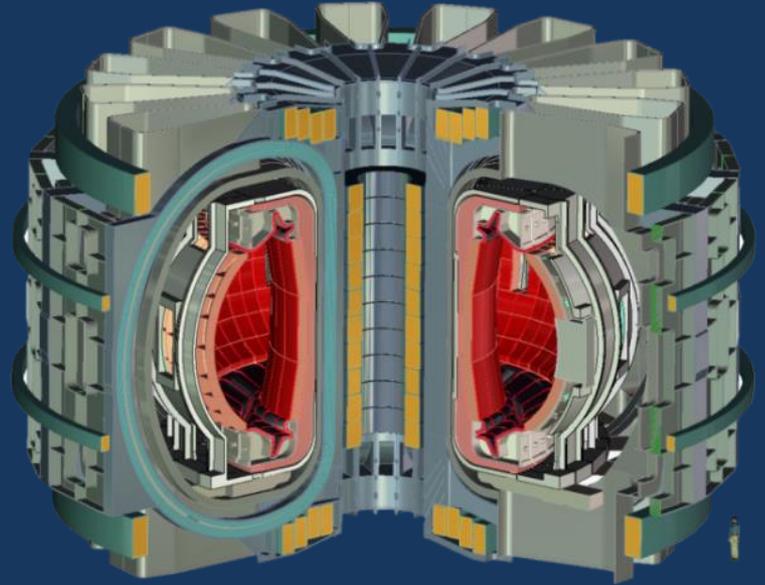
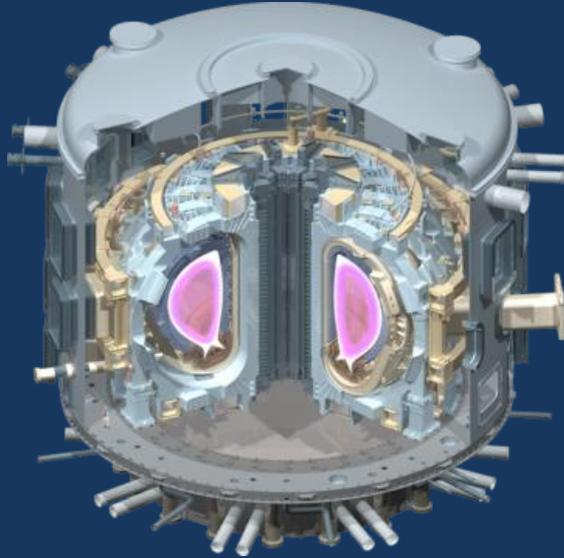
▶ Cryopompes et systèmes sous vide



Etc.

# ITER et au-delà

Les Membres d'ITER ont engagé, individuellement, les **études conceptuelles** de la « machine suivante », collectivement baptisée « **DEMO** ».



**En parallèle:**

**Développement des matériaux**

Fusion Material Irradiation Facility  
DONES (Spain) + IFMIF (Japan)

**ITER**

800 m<sup>3</sup>

~ 500 MW<sub>th</sub>

**DEMO, démonstrateur industriel**

~ 500 MW<sub>e</sub>, 1 200 MW<sub>th</sub>

**Dernière étape avant la série**

# Le DEMO européen



Le DEMO européen est une “installation de démonstration” d’une puissance de 300 à 500 MW électriques, dernière étape avant la centrale industrielle de fusion.

# Un pôle scientifique mondial en France

- **Sur ITER à Cadarache:** ~ 2200 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', GI-PLATO, 'Erasmus Mundus'
- **Retour économique très important**

A circular fisheye aerial photograph of the ITER facility in Cadarache, France. The central part of the image shows the large, complex industrial site with various buildings and structures. The surrounding area is a mix of green fields and dense forests. The entire scene is framed by a blue sky and the curvature of the Earth.

***Merci pour votre attention***

***Si jamais vous m'invitez encore  
dans 15 ans, alors ....***

[www.iter.org](http://www.iter.org)