

ITER

L'énergie de notre avenir



Bernard BIGOT - Directeur général, ITER Organization

ITER

Une collaboration scientifique sans équivalent dans l'histoire

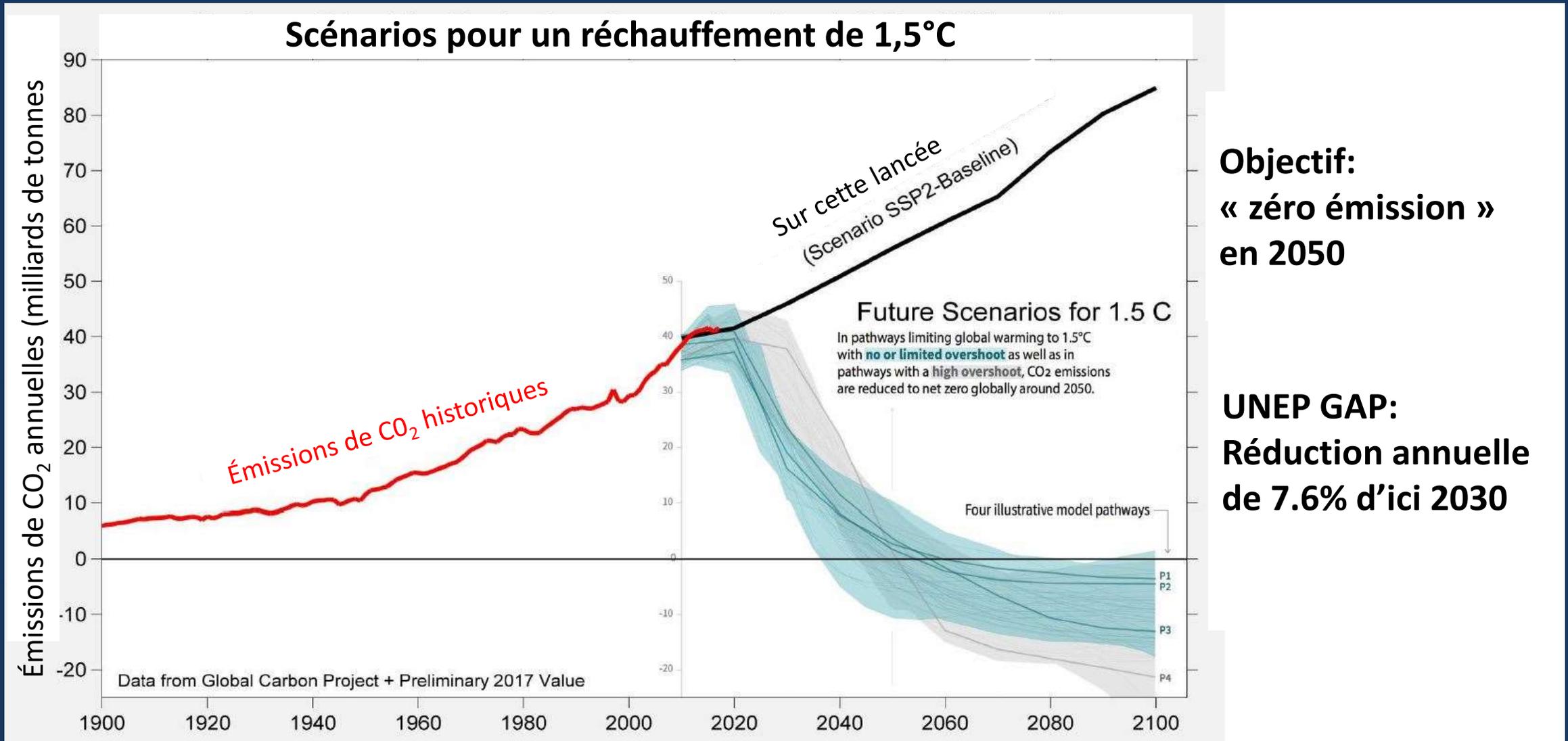
**Une expérience à grande échelle pour démontrer
la faisabilité de l'énergie de fusion**



L'un des plus grands défis de notre civilisation

- Un tiers de la production d'énergie primaire est aujourd'hui mobilisé pour produire de l'électricité.
- L'Agence internationale de l'énergie (IEA) prévoit une augmentation de la demande mondiale d'électricité de l'ordre de 80% d'ici 2040, dont 33% procédera de la demande chinoise, 15% de la demande indienne.
- L'électricité est le principal vecteur de développement des sociétés humaines.

Un modèle non-soutenable



Produire massivement de l'électricité sans générer de CO₂

- Combustibles fossiles: épuisement inéluctable à une échéance plus ou moins rapprochée qui reste à définir ; dans l'intervalle, urgence à développer la capture et le recyclage/stockage du CO₂
- Renouvelables: développer leur usage et rechercher des ruptures technologiques dans la production, la distribution et le stockage
- Fission nucléaire: enjeux de sûreté et contraintes de la gestion des déchets à vie longue
- Fusion: doit apporter la démonstration de sa faisabilité scientifique et technique

La fusion dans l'Univers

- 1920-1930: Mise en évidence des réactions thermonucléaires à l'œuvre au cœur du Soleil et des étoiles (Perrin, Eddington, Bethe, Rutherford...)
- Dans une réaction de fusion, deux noyaux atomiques légers se combinent, forment un noyau plus lourd et libèrent une grande quantité d'énergie par perte de masse.
- 1950: premiers travaux de recherche pour une utilisation pacifique des réactions de fusion.

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

Une infime perte de masse se traduit par une formidable libération d'énergie

La fusion sur Terre

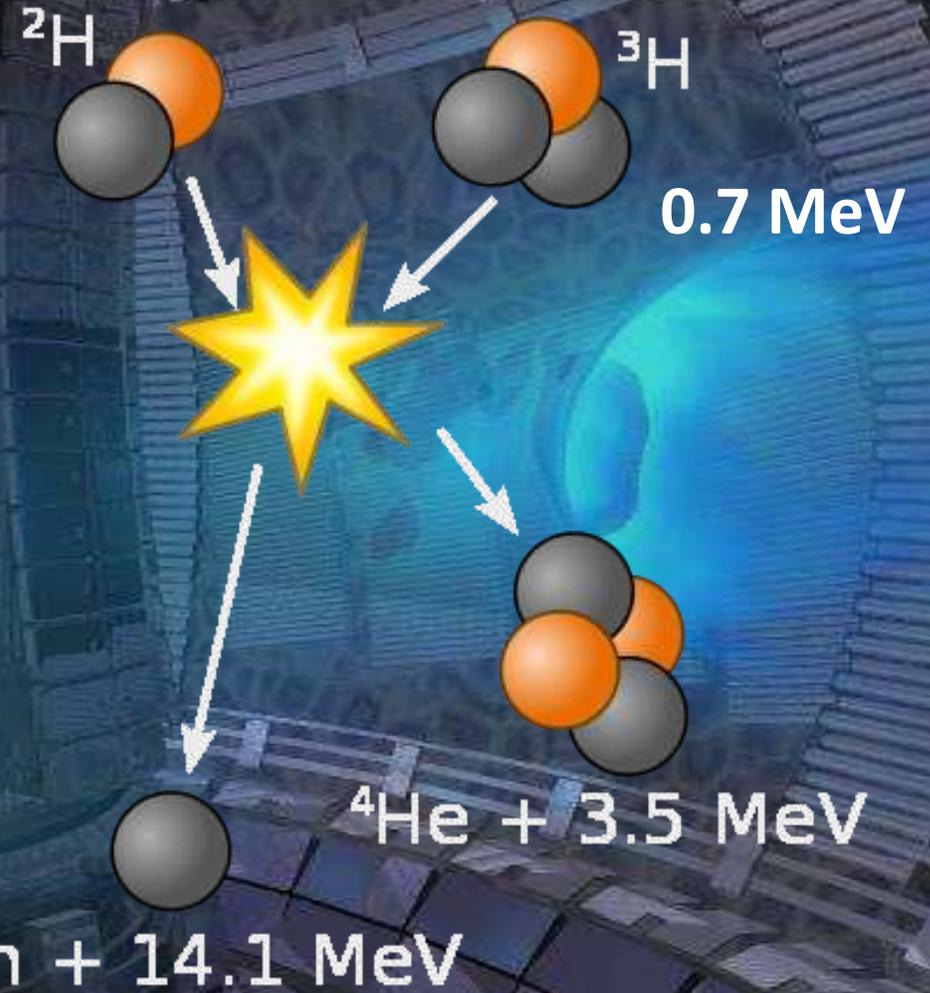
1 gramme de DT = 8 tonnes de pétrole

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

En l'état présent de la technologie, 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*



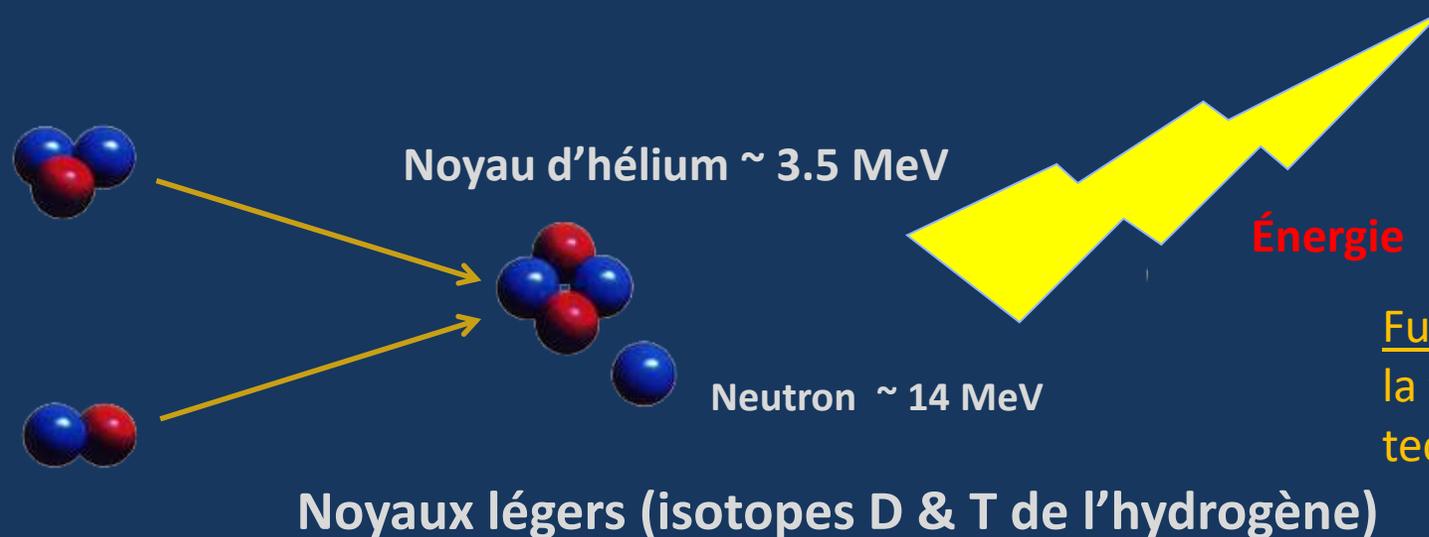
Séparer... ou réunir?

Fission



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

Fusion



Énergie Fusion: ITER doit démontrer la faisabilité scientifique et technologique.

Les combustibles

Deutérium & Tritium, isotopes de l'hydrogène



+



Le lithium que contient la batterie d'un ordinateur portable et le deutérium de l'eau d'une demi-baignoire peuvent fournir 200,000 kilowatt/heures d'électricité.

Assez pour couvrir les besoins d'un Européen moyen pendant 30 ans.

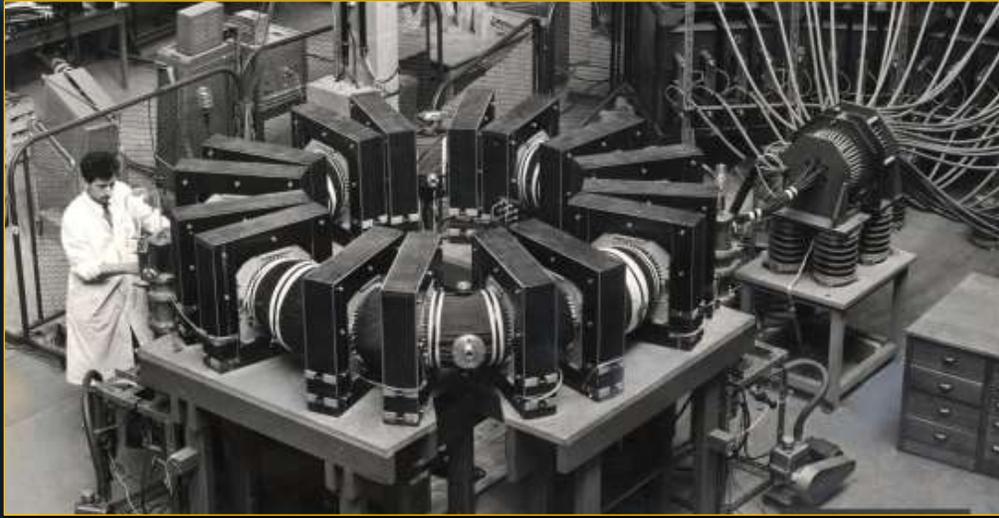
- Deutérium: 33 mg/m³ – techniques d'extraction industrielle maîtrisées;
- Tritium: ITER expérimentera la production de tritium dans l'enceinte même de la machine par interaction neutron-lithium (modules tritigènes).

Avantages de la fusion

- Une source d'énergie massive, potentiellement continue, programmable dans le temps, pratiquement inépuisable et universellement répartie. Parfaitement complémentaires des sources d'énergie renouvelables.
- Une technologie intrinsèquement sûre.
- Un impact très limité sur l'environnement, sans production de gaz à effet de serre.
- Pas de risque de prolifération.
- Des déchets radioactifs, mais pas de déchets de haute activité à vie longue à la différence de la fission.

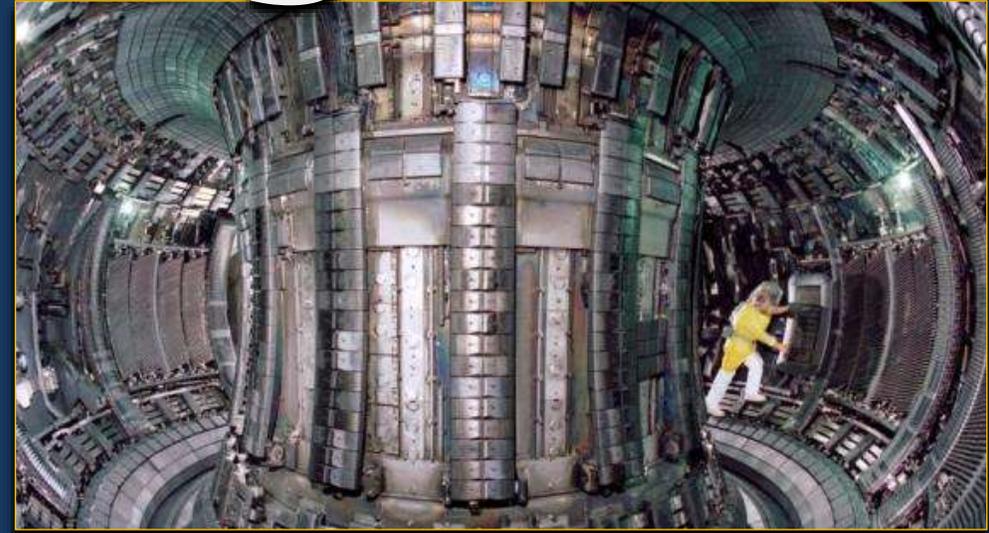
◀ Un plasma dans le tokamak WEST (CEA-Cadarache)

60 ans de progrès



◀ TA-2000,
France, 1957

JET, Euratom, 1983-
présent ▶
(Opérations DT)



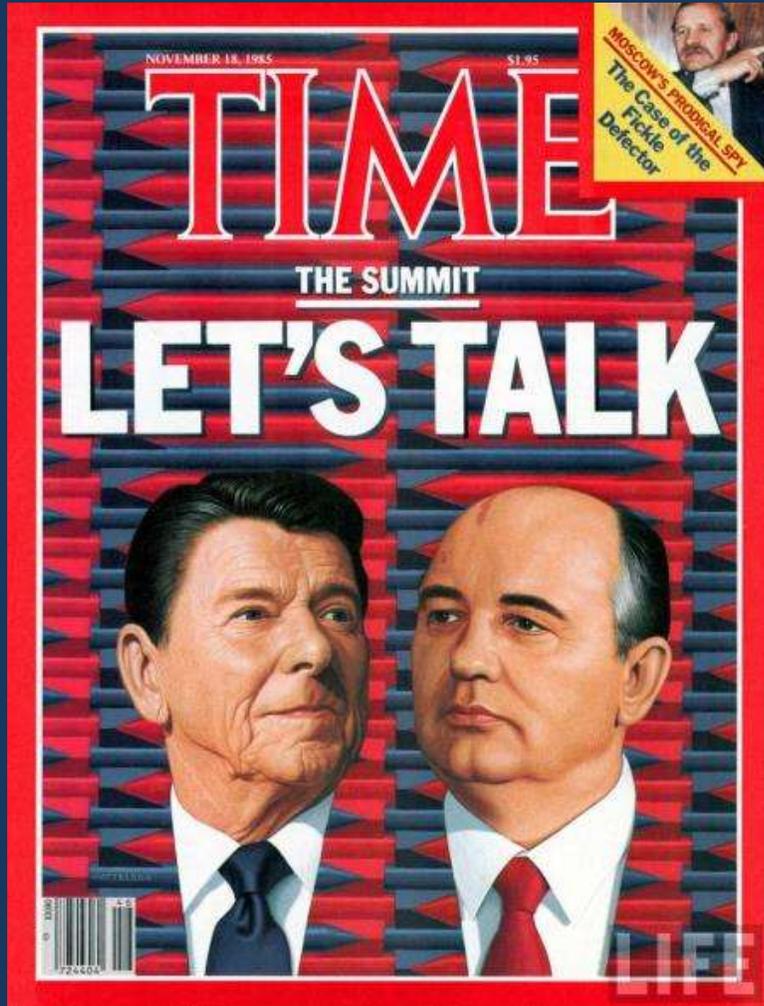
◀ JT-60SA
Japon-UE
Mise en service
imminente



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



Un projet qui vient de loin...



Années 1950-1960:

- Exploration de la physique des plasmas
- Construction de machines de plus en plus performantes.
- Besoin d'une machine de très grande taille pour démontrer la faisabilité de la fusion

Novembre 1985:

- Première rencontre Reagan-Gorbatchev à Genève.
- Décision de lancer une grande coopération internationale dans le domaine de l'énergie de fusion « *pour le bénéfice de toute l'humanité* »

Défi global, réponse globale



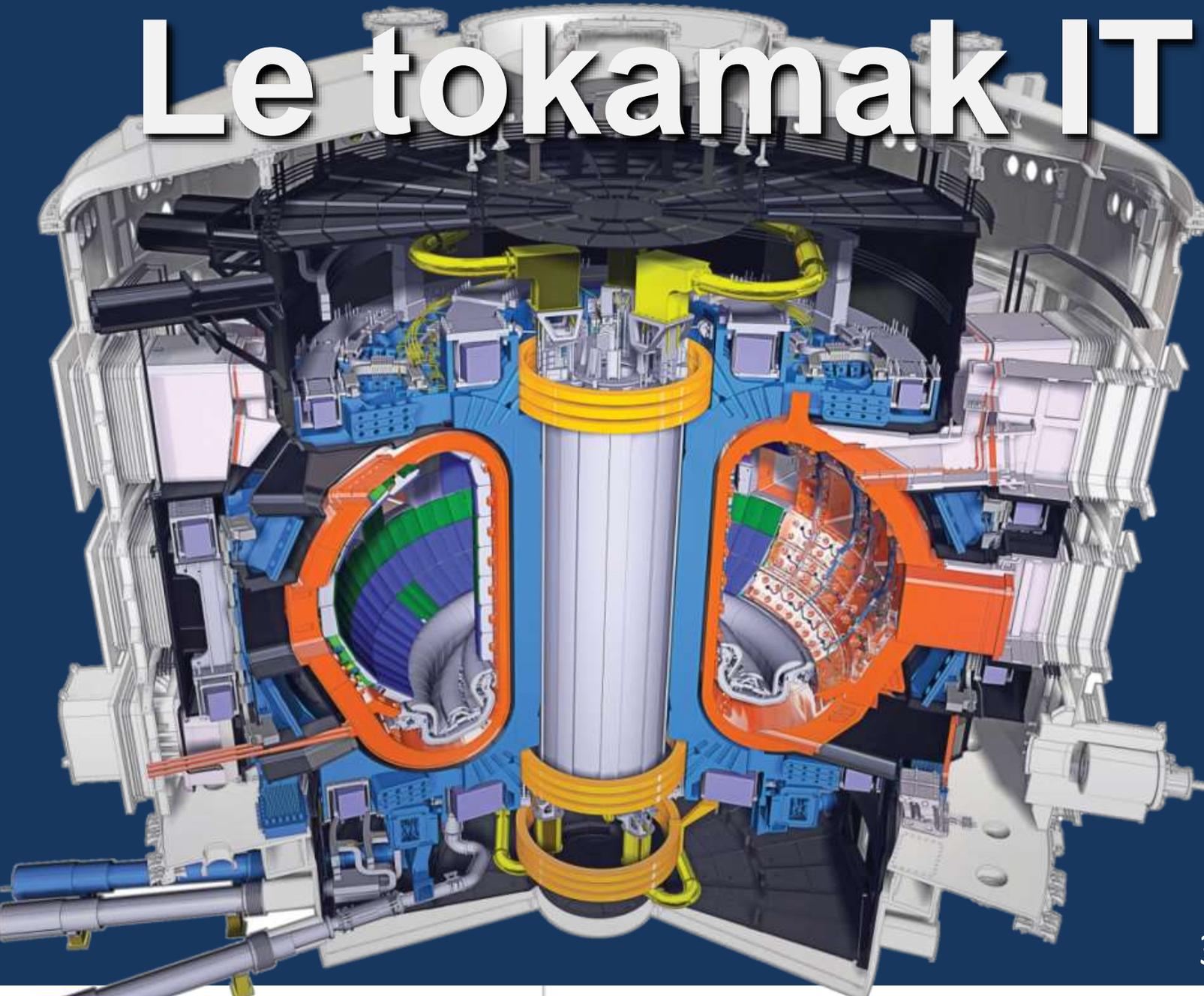
Le 28 juin 2005, les Membres d'ITER ont unanimement choisi le site de Cadarache, proposé par l'Europe

Le 21 novembre 2006, l'Accord ITER a été signé au palais de l'Élysée

Les sept Membres d'ITER représentent plus de 50% de la population mondiale et 85% du PIB de la planète

Chine UE Inde Japon Corée Russie USA

Le tokamak ITER



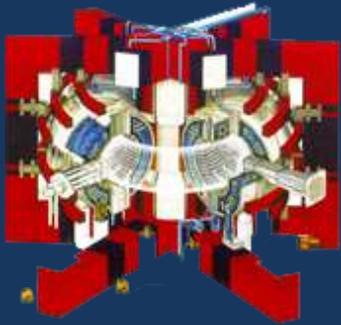
Chambre à vide: ~ 8 000 t.
Bobines TF: 18 x 360 t.
Bobines PF: 6 de ~ 200 à ~400 t.
Solénoïde central: ~ 1 000 t.
Etc.

Total ~ 23 000 t.



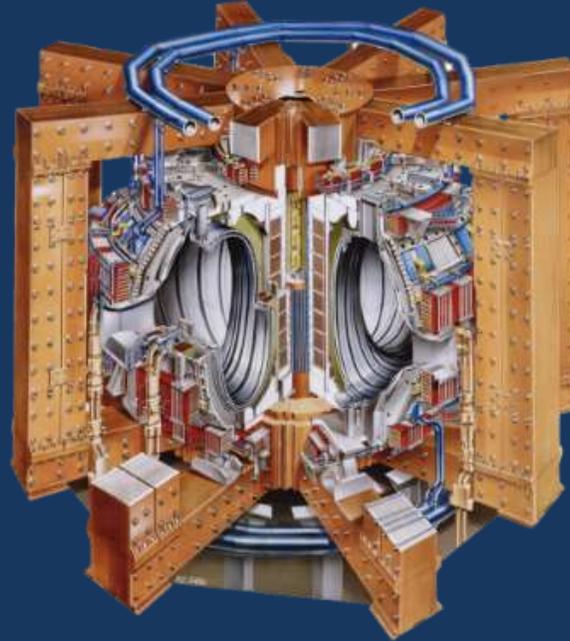
3,5 fois la masse de la Tour Eiffel!

Un paramètre-clé: la taille



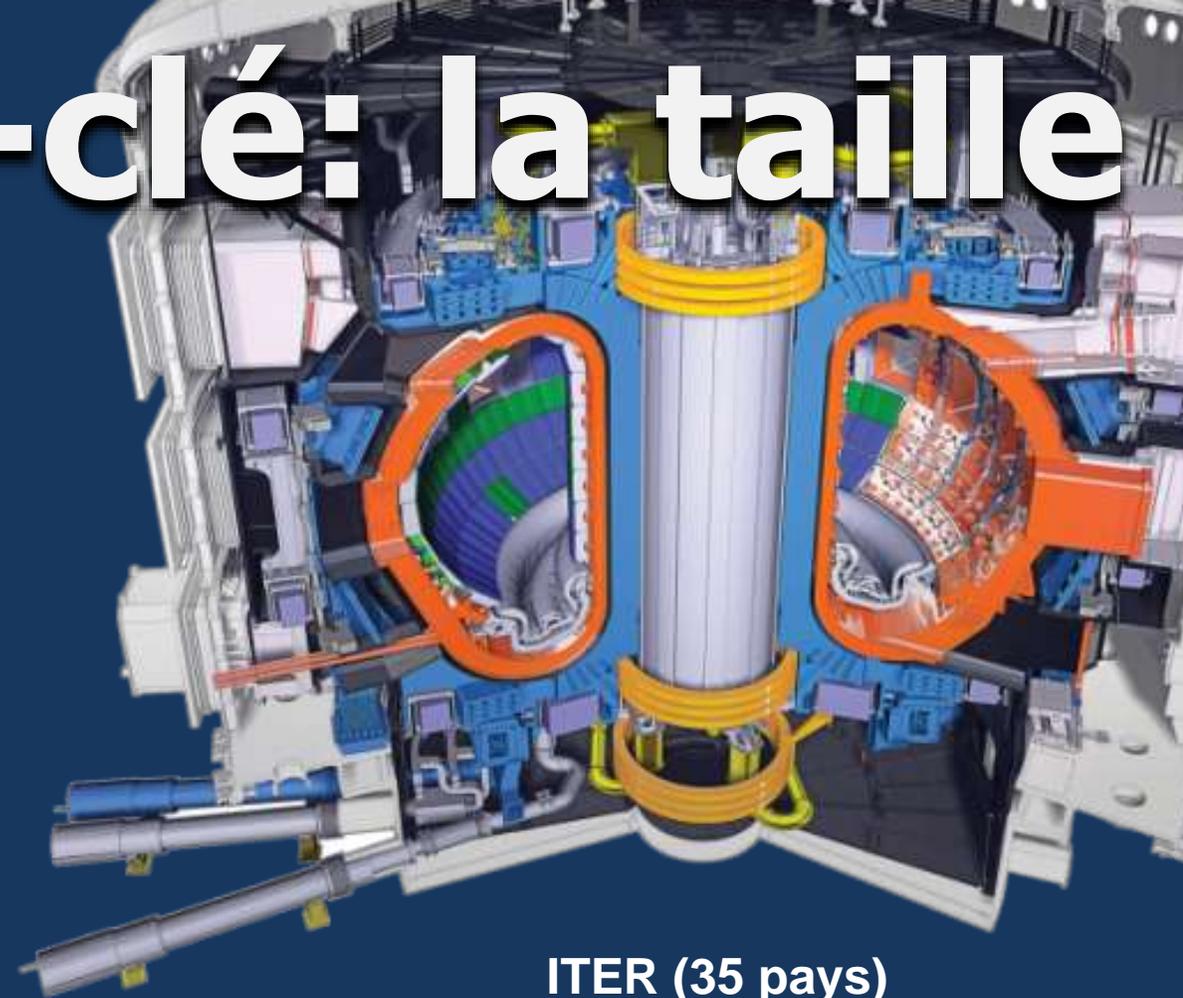
Tore Supra-WEST (France-CEA)

V_{plasma} 25 m³
 P_{fusion} ~0
 $P_{\text{chauffage}}$ ~15 MW
 T_{plasma} ~400 s



JET (Europe)

V_{plasma} 80 m³
 P_{fusion} ~16 MW
 $P_{\text{chauffage}}$ ~23 MW
 T_{plasma} ~30 s



ITER (35 pays)

V_{plasma} 830 m³
 P_{fusion} ~500 MW
 $P_{\text{chauffage}}$ ~ 50 MW
 T_{plasma} > 400 s

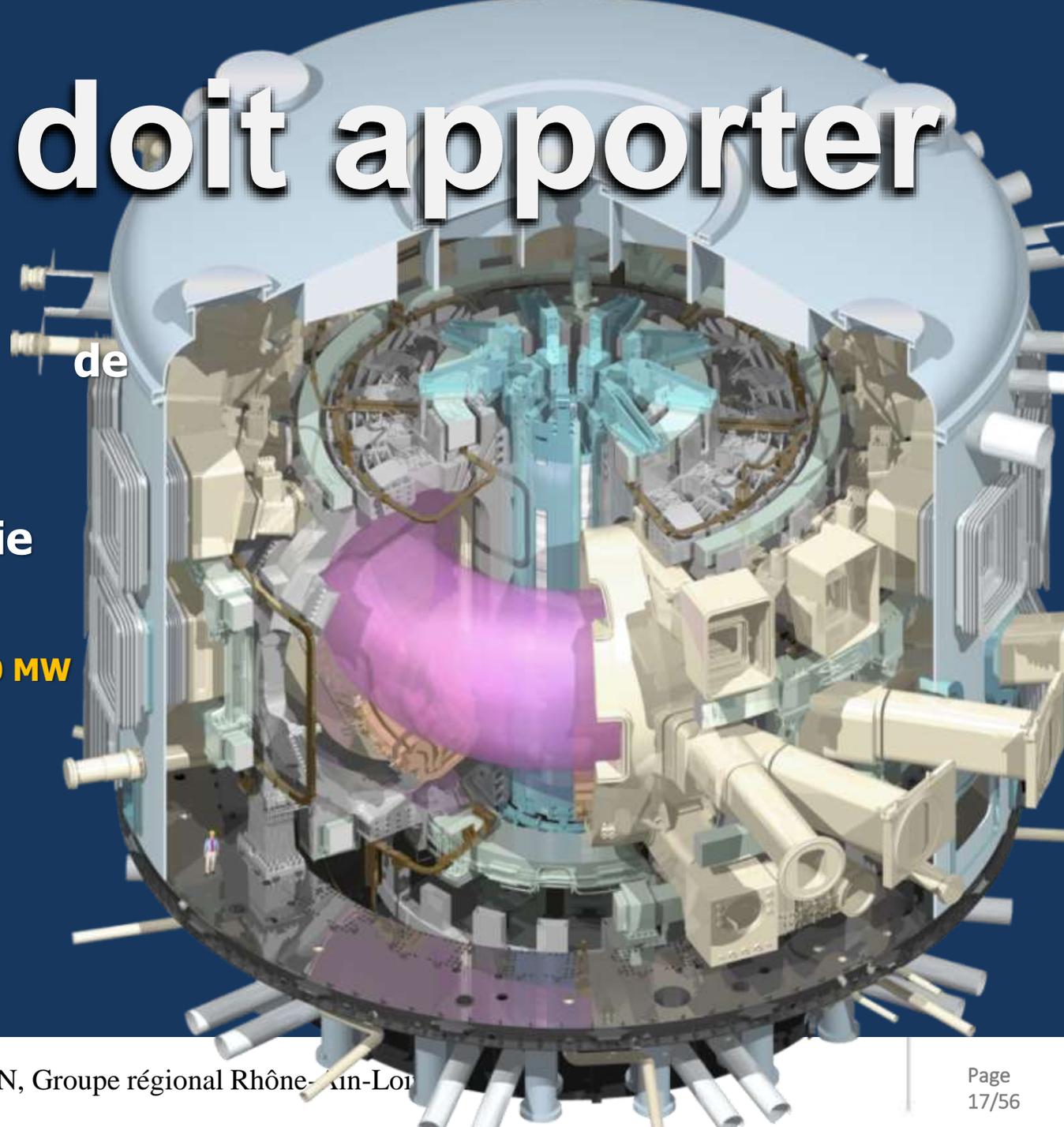
Ce qu'ITER doit apporter

ITER doit démontrer la maîtrise des technologies requises par un réacteur fusion;

Une fois "allumé", le plasma deutérium-tritium doit générer 10 fois plus d'énergie qu'il n'en aura reçu;

Puissance de chauffage 50 MW ► Puissance de fusion 500 MW

ITER est une étape indispensable pour préparer les réacteurs de fusion commerciaux.



Comment ça marche?

- Claquage d'un mélange gazeux DT. Le gaz se mue en plasma, 4^{ème} état de la matière.
- Chauffage par effet Joule, sous l'effet du courant plasma (15 MA).
- Chauffage par ondes électromagnétiques.
- Chauffage par injection de particules neutres de haute énergie.
- En combinant ces trois modes de chauffage on atteint la température désirée.

Mais dans quoi contenir un milieu porté à 150 000 000 de degrés?

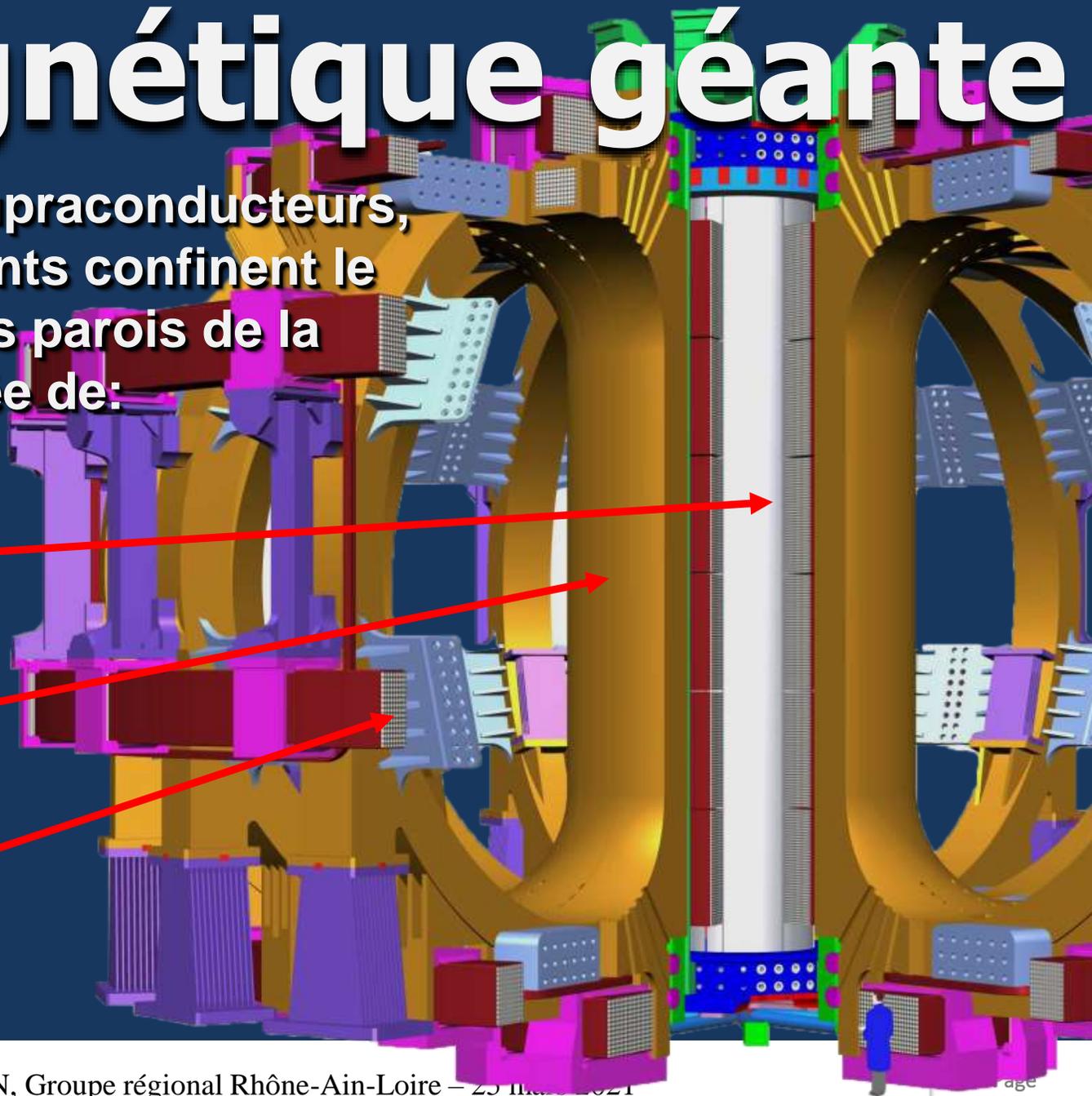
Une cage magnétique géante

Générés par un système d'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:

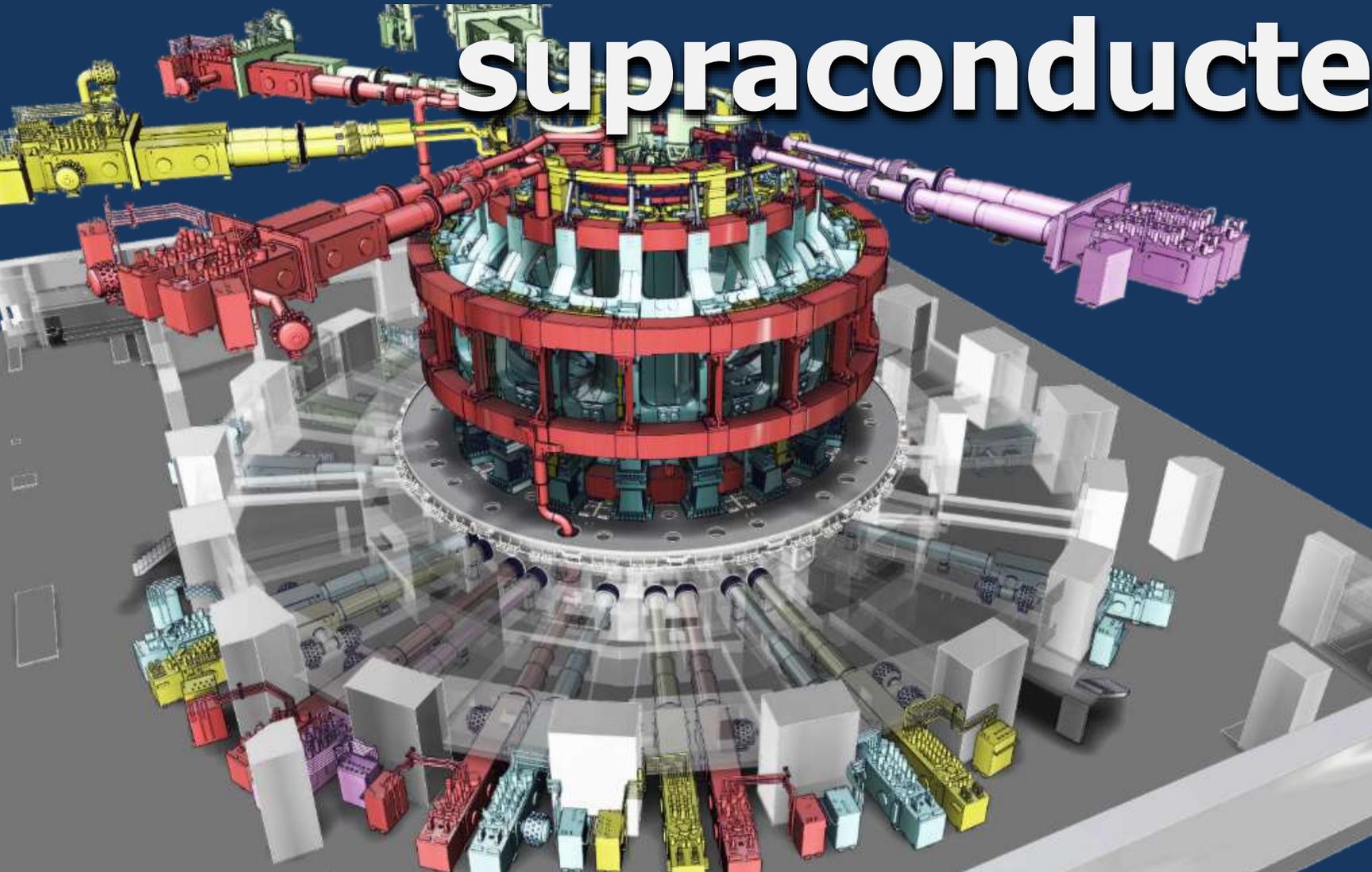
1 solénoïde central, 1 000 tonnes, 18 m. de haut, 300 000 fois le champ magnétique terrestre;

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

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



10 000 tonnes d'aimants supraconducteurs



10 000 tonnes d'aimants supraconducteurs produisent le champ magnétique qui génère, confine, modère et contrôle le plasma dans la machine.

Les aimants de niobium-étain ou niobium-titane sont refroidis à 4K ($- 269\text{ }^{\circ}\text{C}$) par un flux d'hélium supercritique.

Les dimensions de la construction navale...

Ces portiques géants, fournis par la Corée, vont manipuler des charges qui, une fois préassemblées, pèseront ~ 1 500 tonnes.



... la précision de l'horlogerie



Dans les ateliers de Mitsubishi Heavy Industry, au Japon, insertion verticale du bobinage d'un aimant de champ toroidal (TF) dans son boîtier. L'ensemble pèse plus de 300 tonnes et les tolérances d'assemblage sont de l'ordre de 0,2 millimètres.

Une organisation intégrée

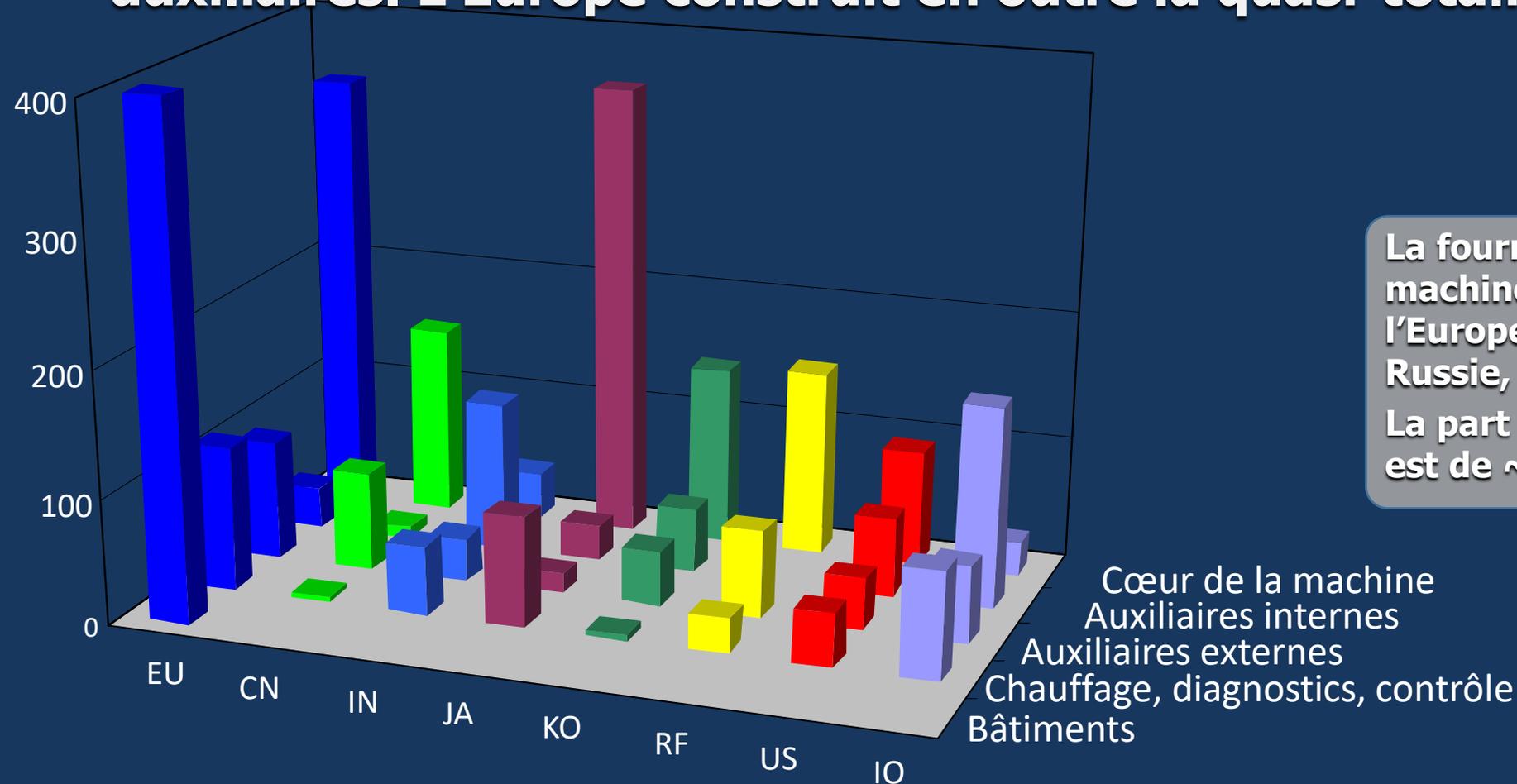
ITER Organization—Équipe centrale et 7 Agences domestiques

- Les 7 membres d'ITER contribuent financièrement (~10%) et en nature (~90%) au programme ITER. À cette fin, ils ont créé chacun une "Agence domestique".
- ITER Organization coordonne le programme ITER en étroite collaboration avec les sept Agences domestiques.
- Les membres d'ITER partagent la totalité de la propriété intellectuelle.



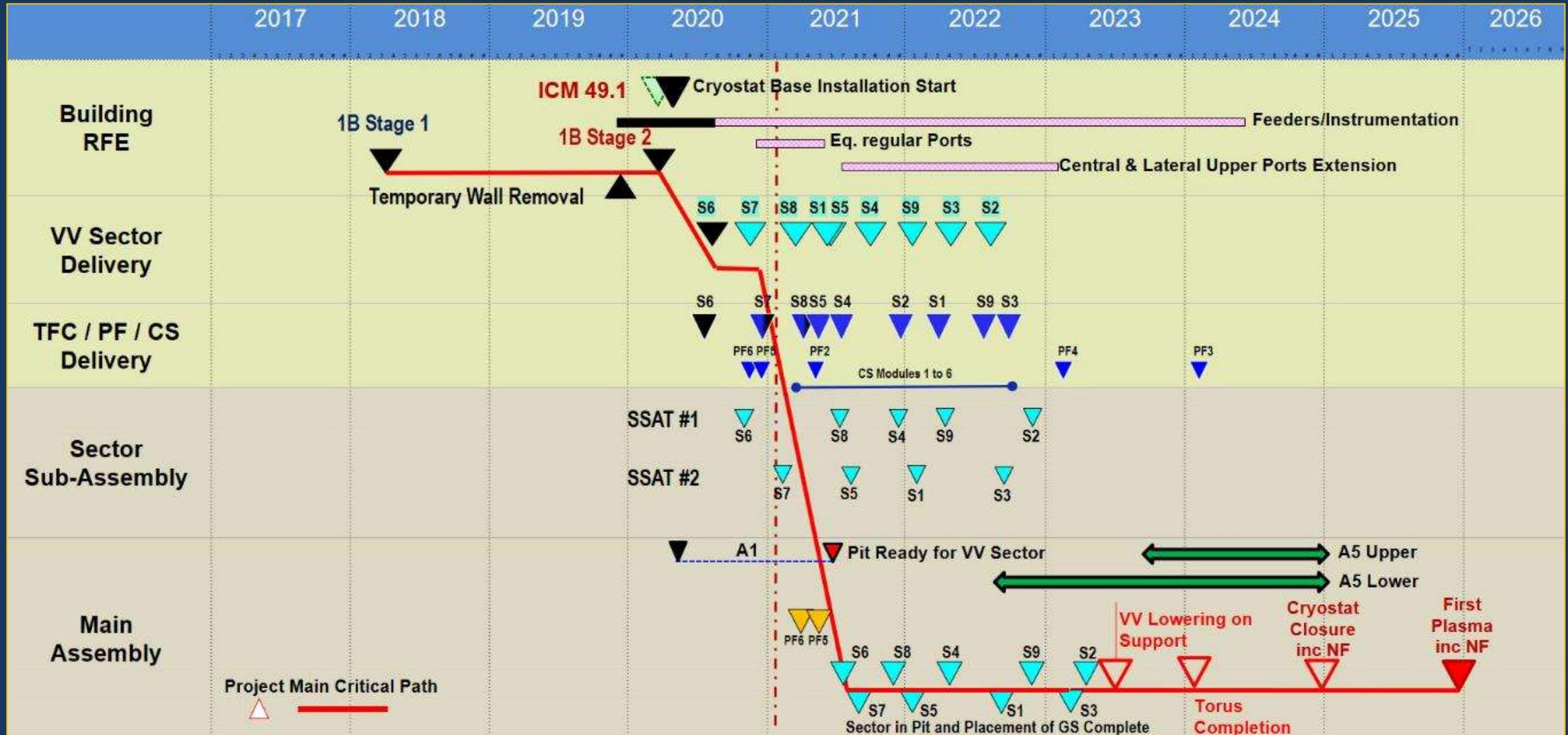
Des fournitures « en nature »

Les sept Membres d'ITER fabriquent les pièces de la machine et des auxiliaires. L'Europe construit en outre la quasi-totalité des bâtiments



La fourniture des éléments de la machine est répartie entre la Chine, l'Europe, l'Inde, le Japon, la Corée, la Russie, les USA (~9%).
La part de l'Europe, "Membre Hôte", est de ~ 45%.

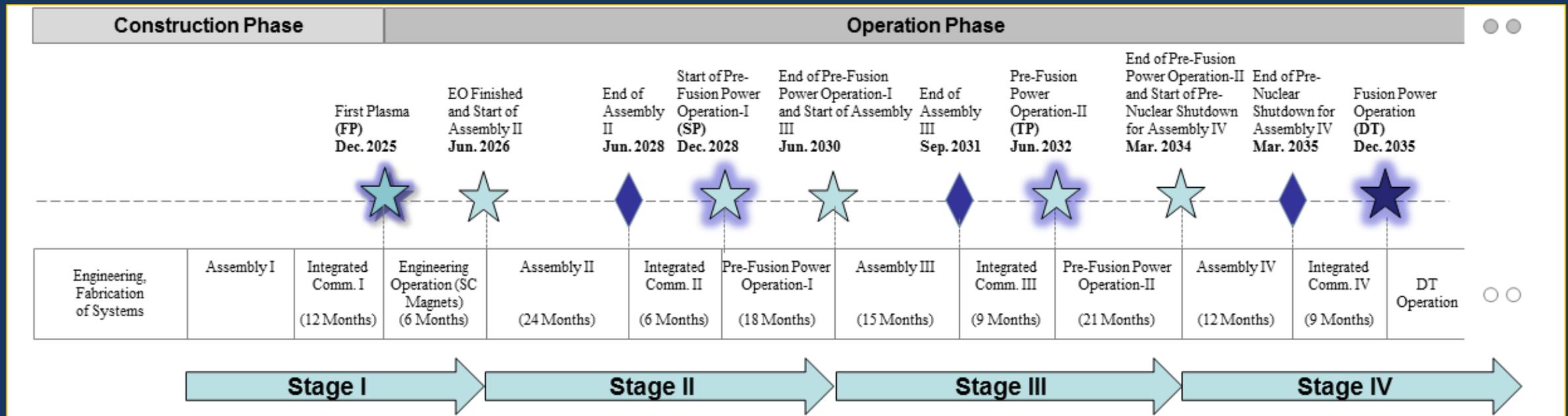
Détail du calendrier de construction



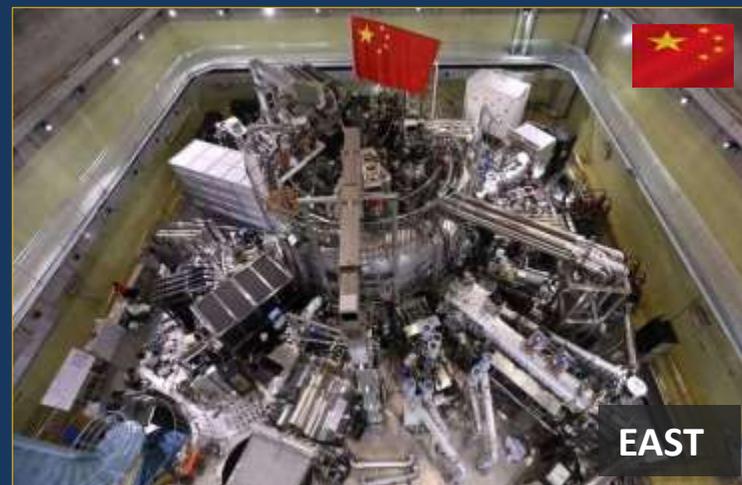
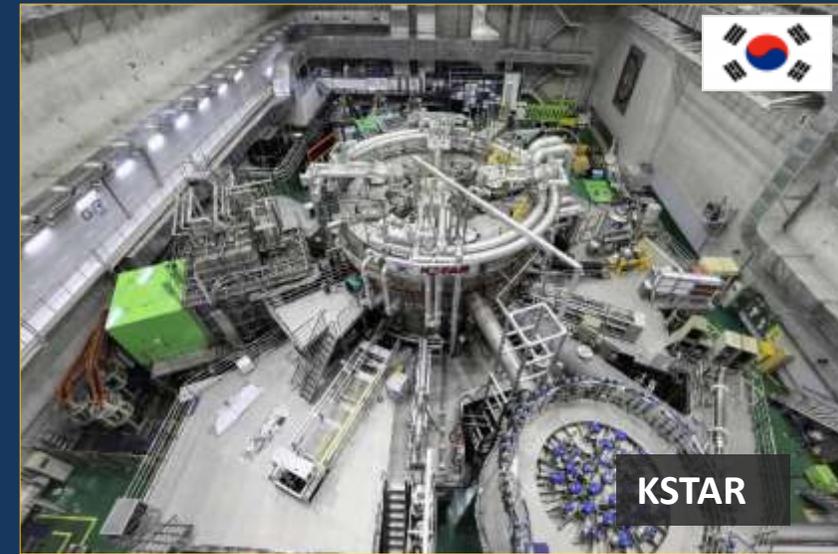
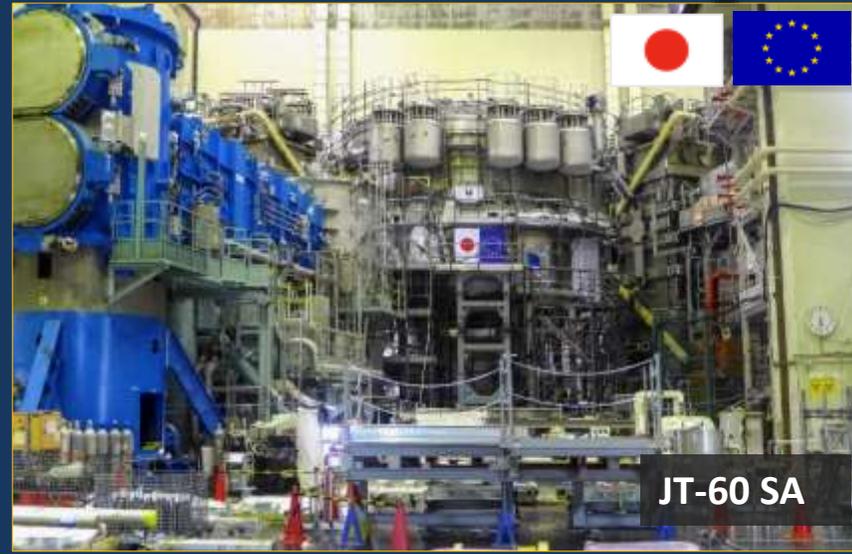
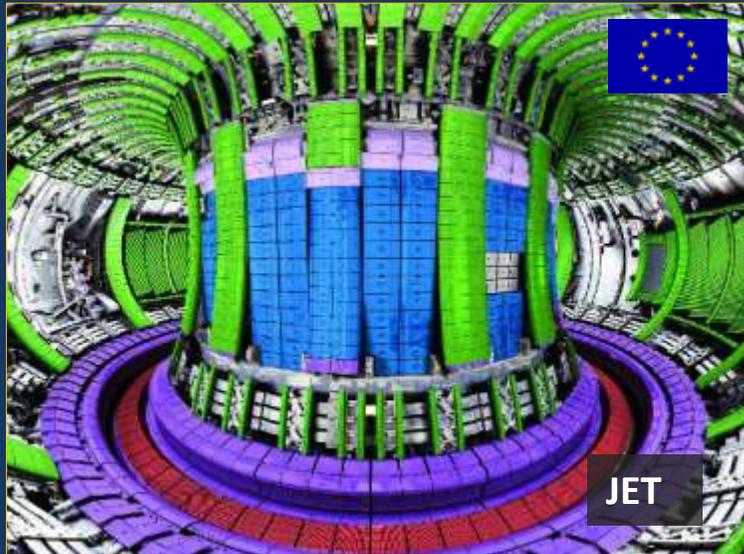
Plasma DT: une approche par étapes

Cette proposition de calendrier a été élaborée en étroite coordination avec les Agences domestiques

- ✓ Le calendrier et le budget prévisionnel d'ici au premier plasma (2025) prend en compte les contraintes budgétaires des Membres d'ITER;
- ✓ L'approche en quatre étapes vers les opérations Deuterium-Tritium (2035) prend en compte les contraintes budgétaires et techniques des Membres d'ITER.



Tous ensemble pour ITER



- JET
 - ✓ Préparation campagne DT
- 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

Vers le « Premier plasma » : ~ 72,5% des tâches réalisées



”L’ensemble des tâches indispensables à la production du Premier Plasma” est réalisé à ~ 72,5%. Depuis 2016, le taux moyen de progression mensuelle est de l’ordre de 0,7 %.

Six ans de progrès

Avril 2014 – Novembre 2020



Les travaux de génie civil, réalisés par l'Europe, sont finalisés à hauteur de 78%.

ITER au temps du Covid-19

Maintenir les activités critiques – garantir la sécurité des personnels

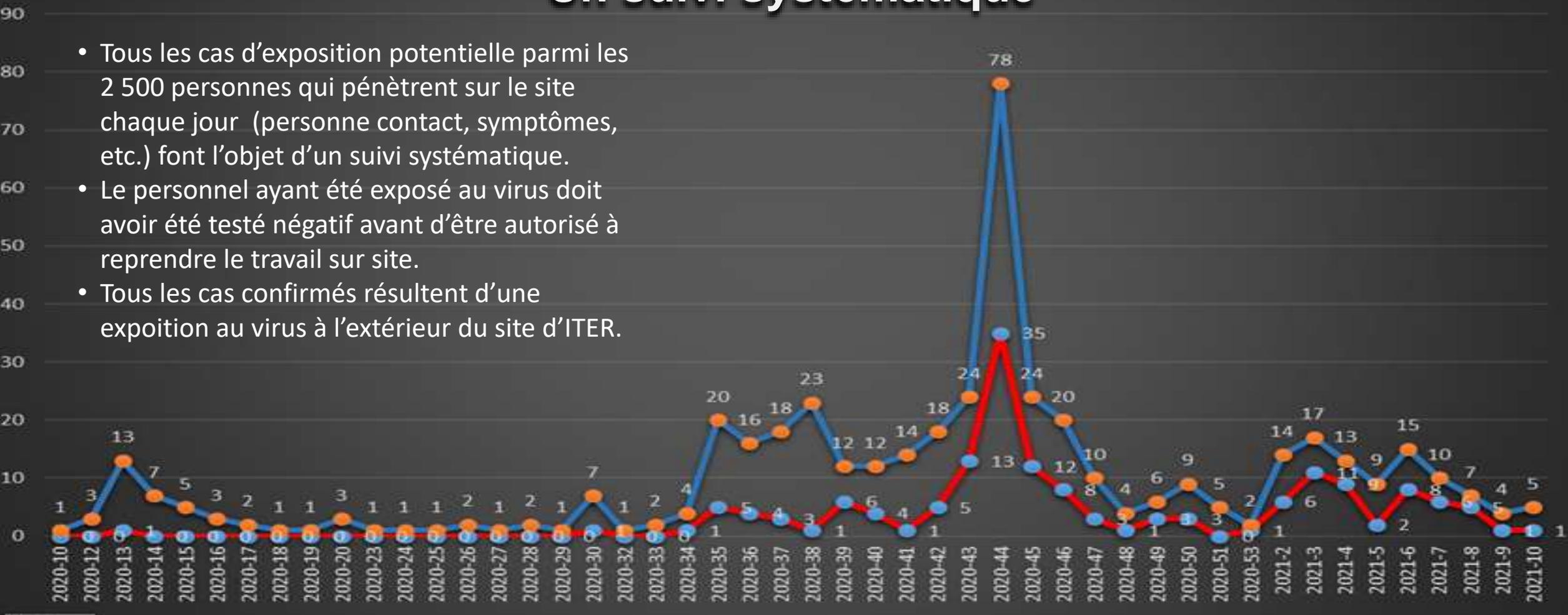
- Anticipation (test des réseaux, réorganisation du chantier, etc.)
- Strict respect des consignes des autorités sanitaires;
- Télétravail
- Soutien efficace des Membres d'ITER (livraison de masques par la Chine et la Corée; dérogations ponctuelles)
- « Nouvelle normalité » plébiscitée par 96% du personnel.

Count Confirmed Count Cases

ITER au temps du Covid-19

Un suivi systématique

- Tous les cas d'exposition potentielle parmi les 2 500 personnes qui pénètrent sur le site chaque jour (personne contact, symptômes, etc.) font l'objet d'un suivi systématique.
- Le personnel ayant été exposé au virus doit avoir été testé négatif avant d'être autorisé à reprendre le travail sur site.
- Tous les cas confirmés résultent d'une exposition au virus à l'extérieur du site d'ITER.



Où en est le chantier?



Cylindre d'acier du Cryostat (stockage de l'acier)

Atelier du Cryostat

Usine de bobinage

Bât. Préparation assemblage

Poste électrique 400 kV

Hall d'Assemblage

Évacuation de la chaleur

Unité cryogénique

Conversion électrique

Bâtiment Radiofréquence

Complexe Tokamak

Bâtiment Tokamak

Zone entreprises

Siège ITER Organization

Future alimentation Injection de neutres

Systemes électriques

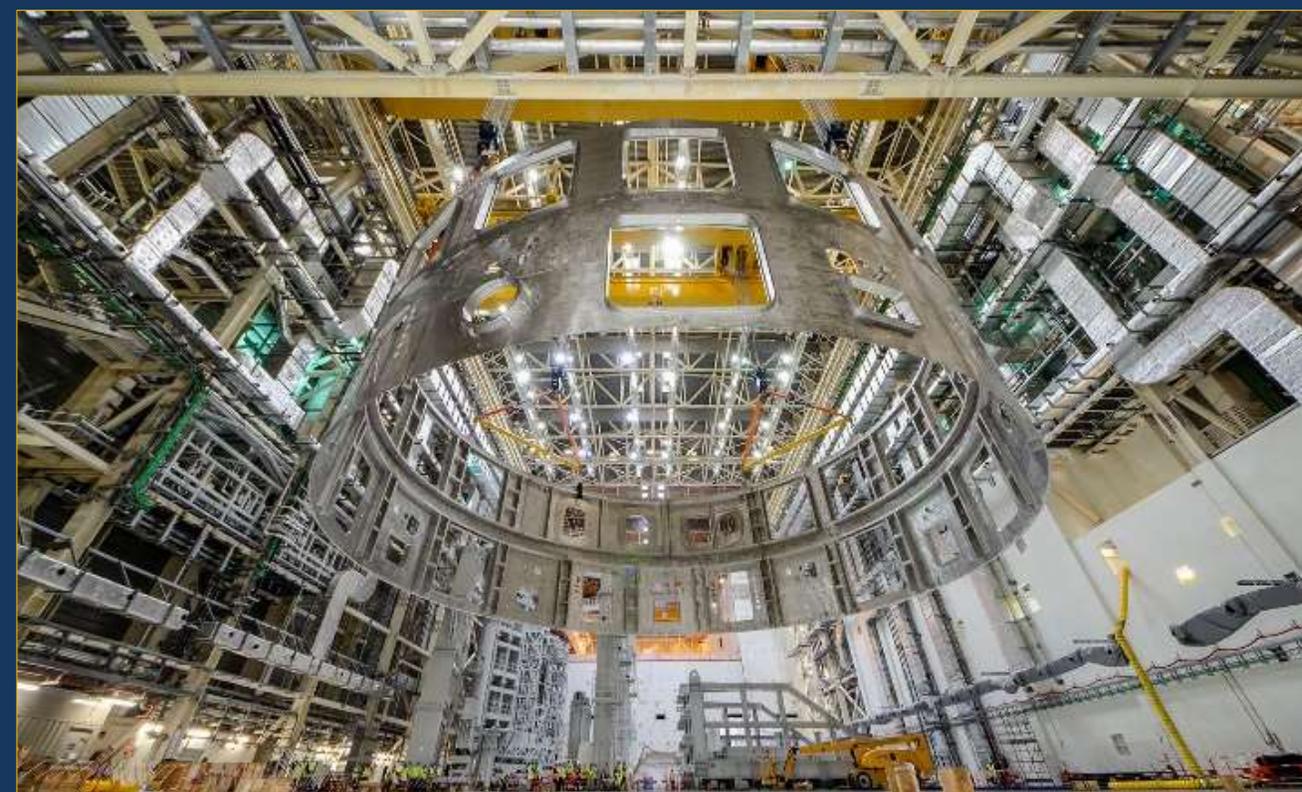
Novembre 2020

Des opérations spectaculaires

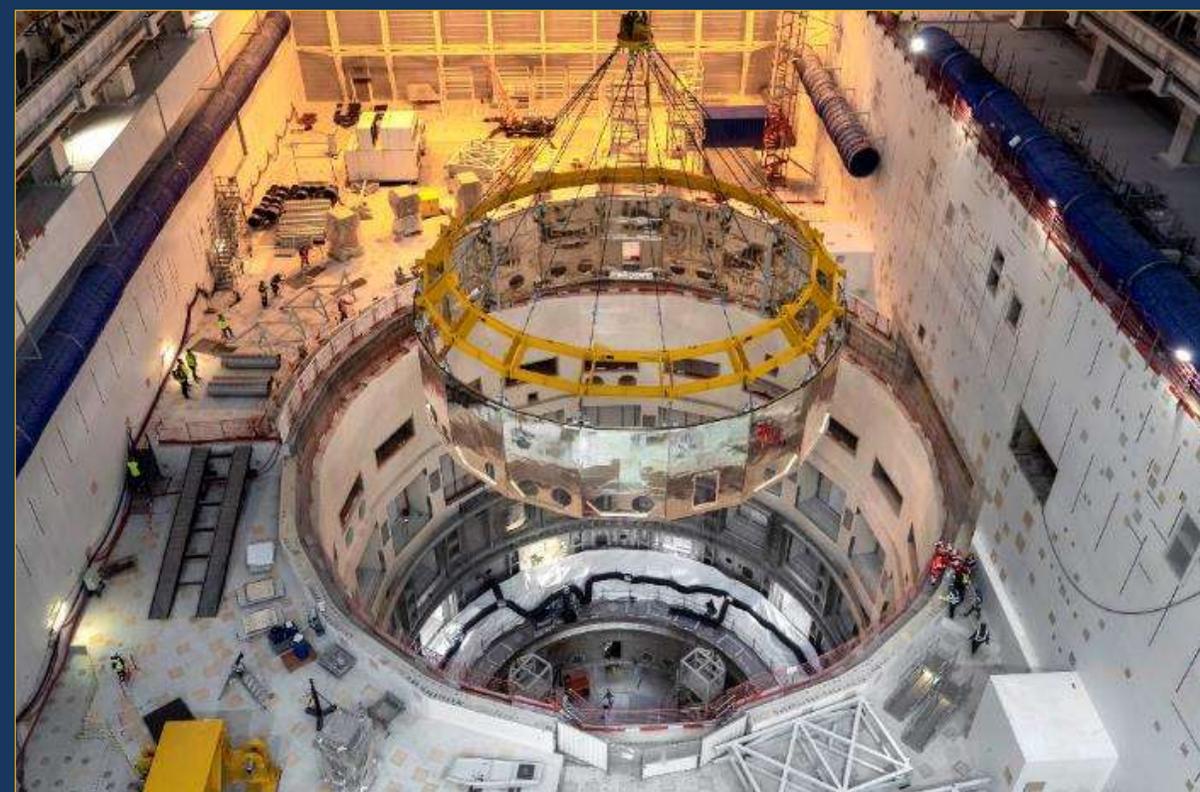


Les 26 et 27 mai 2020, la base du Cryostat a été insérée dans le puits d'assemblage du Tokamak...

Des opérations spectaculaires



...suivie, le 31 août, par le cylindre inférieur...



...et le 14 janvier 2021 par l'écran thermique du cryostat.

Au millimètre près...



La base du Cryostat (30 mètres de diamètre, 1 250 tonnes) est la plus massive des pièces de la machine. C'est une des quatre sections du « thermos » géant, fourni par l'Inde, qui enveloppe le Tokamak.



Elle repose sur un système de support (ancrages et rotules) qui redistribue les forces horizontales et de torsion générées par la production de plasma dans le Tokamak.



Un système de vérins hydrauliques a supporté la base dans l'attente des opérations finales d'ajustement avec des coins de plus de 1m de diamètre ajustés au mm près.

28 juillet: lancement officiel de la phase d'assemblage



Emmanuel Macron:

« ITER est une promesse de paix et un acte de confiance en l'avenir [...] C'est la preuve que ce qui rassemble les hommes et les États est plus fort que ce qui les divise. »

Arrivages massifs



Arrivages massifs



TF 05 (Europe)
18 décembre 2020



TF 08 (Japon)
12 mars 2021

... par l'itinéraire ITER



Déchargés au port de Fos-sur-Mer, les composants traversent l'Étang de Berre sur une barge spéciale et empruntent "l'itinéraire ITER", long de 104 km. Le trajet jusqu'au site d'ITER dure de trois à quatre nuits. L'itinéraire ITER a été aménagé par la France (État et CD 13). 110 M€ de travaux réalisés en 2009-2012.

Installer les systèmes



◀ 5,5 km de lignes cryogéniques



◀ Évacuation de la chaleur (1 200 MW)



◀ Conversion alternatif/continu (8 km de jeux de barres)

10,000 km de câbles électriques de toute nature



◀ Compensation de la puissance réactive (1 hectare d'équipements de très haute technologie)

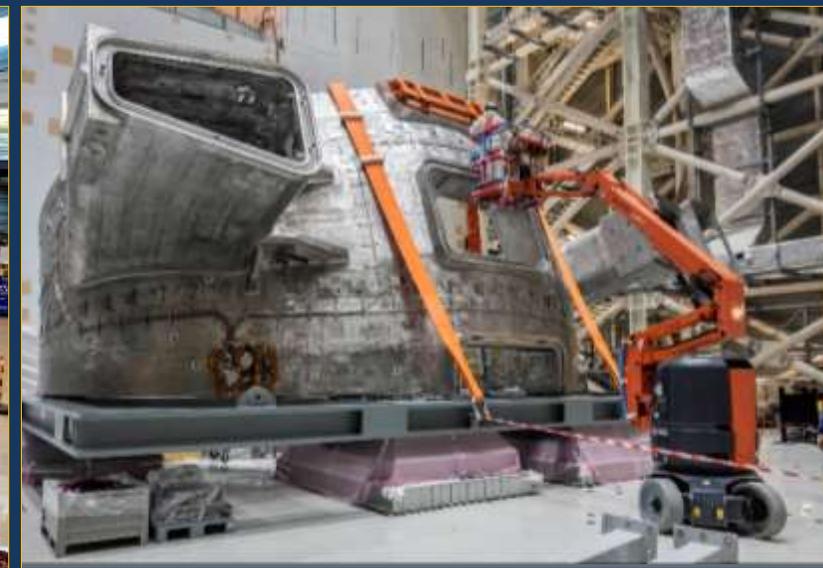
Équiper avant l'assemblage



Les bobines de champ toroidal n°12 et 13 (Japon) sont en cours d'équipement, préalablement aux opérations de pré-assemblage.



Livrée sur site le 26 juin, la bobine de champ poloidal n°6, fournie par l'Europe et fabriquée en Chine, a été finalisée sur site. Elle a passé avec succès les tests à très basse température et sera insérée dans le puits d'assemblage de la machine au mois d'avril 2021.



Le secteur de chambre à vide # 6, fourni par la Corée et livré début août 2020, sera accouplé aux bobines de champ toroidal # 12 et 13 et à une section d'écran thermique correspondante pour former le premier « pré-assemblage ».

Vers le premier "pré-assemblage"



1 secteur de chambre à vide (40°) + segment d'écran thermique correspondant + 2 bobines de champ toroïdal = 1 pré-assemblage.

L'équipement des composants du premier pré-assemblages est quasiment finalisé. 9 pré-assemblages successifs sont requis pour réaliser le tore de la machine.

Qui fournit quoi?

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



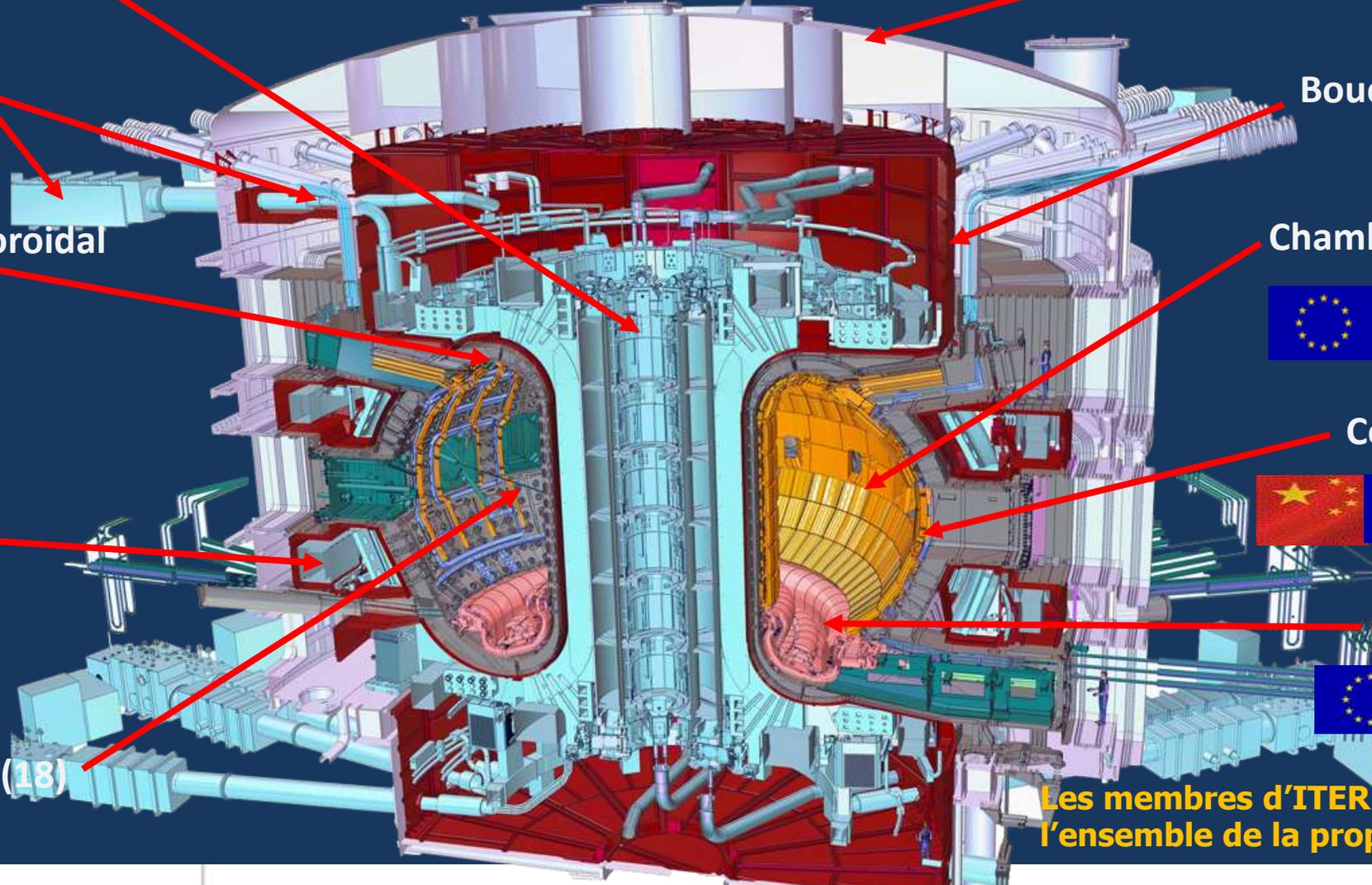
Couverture



Divertor



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



Fabrications en cours



Bobines de champ toroïdal: les 70 « doubles galettes » destinées aux dix bobines verticales (sur un total de 19) et dont la fabrication incombe à l'Europe sont réalisées. La première bobine a été livrée sur site au mois d'avril 2020, la seconde en septembre, la troisième en décembre.



Chambre à vide: l'Europe fabrique 5 des 9 secteurs de la chambre à vide du Tokamak. Tous sont en cours de fabrication avec des taux de finalisation allant de 66% à 89%.



Bobines de champ poloïdal: Du fait de leur taille (17-24 m de diamètre), 4 des 6 bobines annulaires sont fabriquées sur site par l'Europe; PF n°5 et PF n°2 sont finalisées. La fabrication de PF n°4 est en cours.

Fabrications en cours

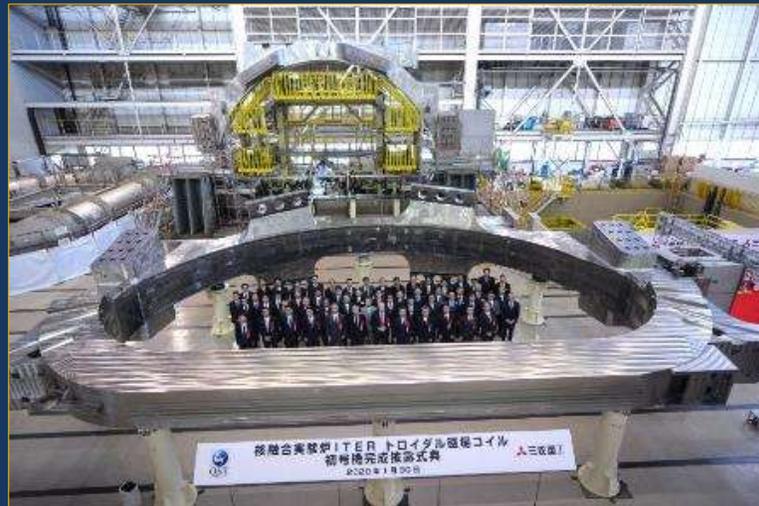


Plus de 1 600 tonnes d'équipements, destinés au système d'alimentation des aimants ("feeders") sont fournis par la Chine.



Fabriquées en Inde les différentes sections du Cryostat sont assemblées et soudées sur site. La base et le cylindre inférieur sont en place dans la fosse d'assemblage, le cylindre supérieur est stocké dans l'attente de son installation et les éléments du "couvercle" sont prêts à être ajustés avant soudage.

Le Japon fournit 9 des 19 bobines de champ toroïdal (dont une rechange) du tokamak. La première d'entre elles (TF12) a été livrée le 17 avril 2020, la deuxième (TF13) le 3 juillet et la quatrième (TF8)



Fabrications en cours



La Corée est responsable de la construction de 4 des 9 secteurs de la chambre à vide. Le premier a été livré. Taux de finalisation des trois autres: de 86 à 99%.

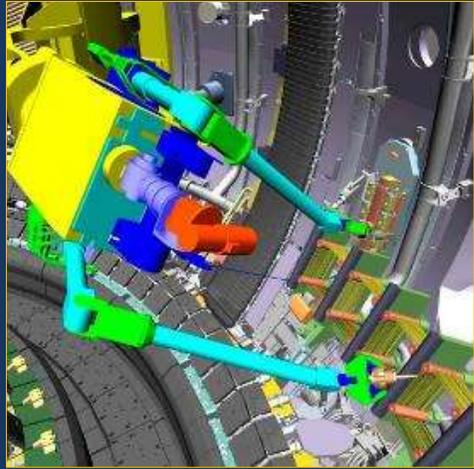


Les six modules du solénoïde central (plus une recharge) abordent les dernières étapes de la fabrication dans les ateliers de General Atomics près de San Diego en Californie. Les tests du premier module sont finalisés. Il devrait être livré sur site mi-2021.



La fabrication de la bobine poloïdale n°1 (9 mètres de diamètre, 193 tonnes) entre dans sa phase ultime. Cette bobine est la plus petite des six bobines annulaires de la machine. Elle sera installée peu avant la fermeture du cryostat.

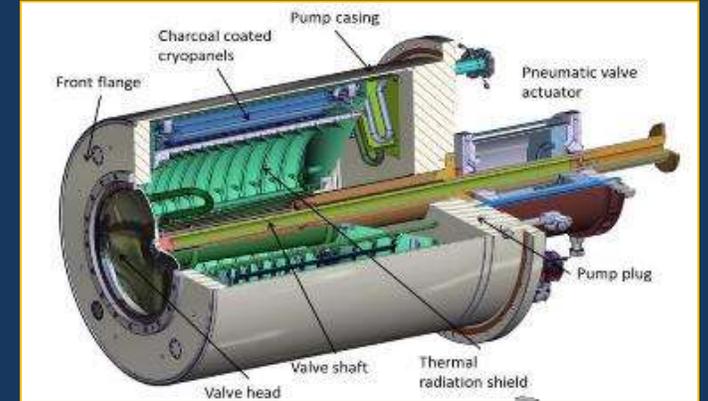
Innovation



▶ Robotique en environnement extrême



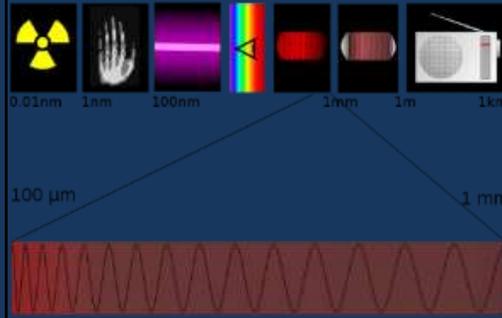
▶ Électronique de puissance



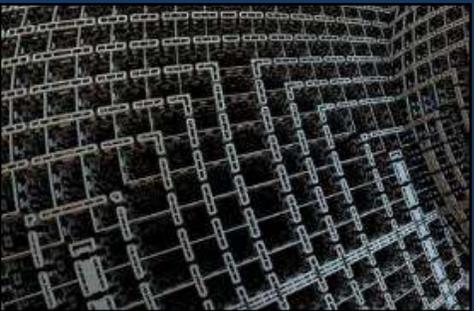
▶ Transmission de signal ultra-haut débit (TeraHertz)



▶ Supraconducteurs



▶ Cryopompes et systèmes sous vide



▶ Filtres de haute-technologie



▶ Emboutissage par explosion



Etc.

La contribution de la France



L'itinéraire ITER



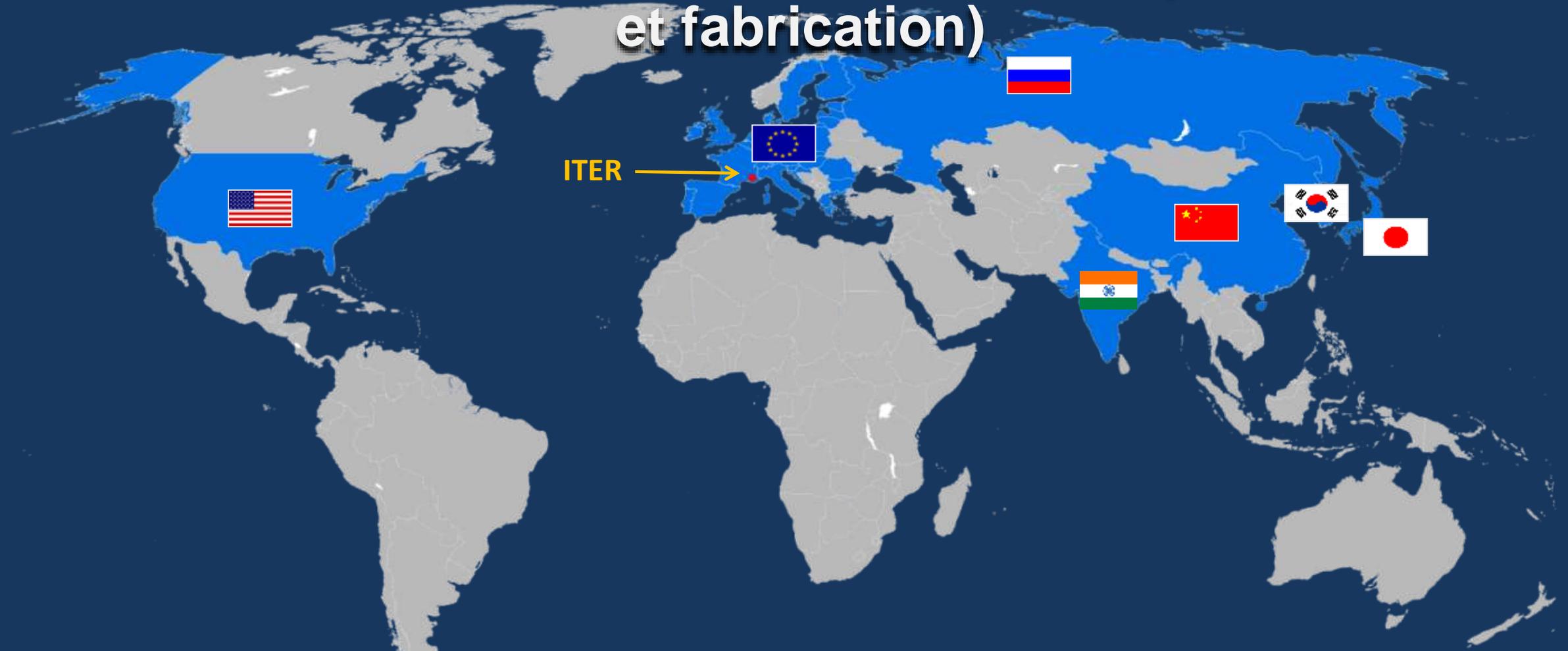
L'école internationale

La France contribue à la construction d'ITER à hauteur de 9,1% (actuellement 1,1 milliard d'euros aux conditions économiques de 2008), dont 467 M€ pris en charge par les huit collectivités territoriales de la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur.

Entre 2007 et 2010, 208 millions d'euros ont été consacrés à l'aménagement du site et à la construction des équipements régionaux (« Itinéraire ITER », École internationale à Manosque).

Retombées économiques

Plus de 12 milliards d'euros de contrats (construction et fabrication)



Retombées économiques

Construction



Total des contrats passés depuis 2007
Part des entreprises françaises

7,16 milliards d'euros (dont génie civil)
~ 4,3 milliards d'euros

Le chantier ITER



~ 2 800 personnes en temps normal, 600 au plus fort de la crise sanitaire, jusqu'à 3 000 dans les années qui viennent.

La construction d'ITER représente 18 millions d'heures de travail.

Près de 500 sociétés européennes (dont 80% françaises) sont présentes en sous-traitance sur le chantier ITER.

La sûreté d'ITER



- La réaction de fusion est intrinsèquement sûre.
- Il n'y a jamais plus d'un gramme de combustible en réaction dans la chambre à vide.
- La moindre perturbation met fin au plasma.
- L'emballement de la réaction et la fonte du coeur sont physiquement impossibles.
- En cas de perte d'alimentation électrique, la chaleur s'évacue naturellement.
- Importantes marges de sûreté pour les risques externes (séismes, inondations...)

ITER est une « Installation nucléaire de base » observant la réglementation française et soumise à ce titre aux inspections de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN).

Radioactivité et déchets

ITER ne générera pas de déchets de haute activité à vie longue

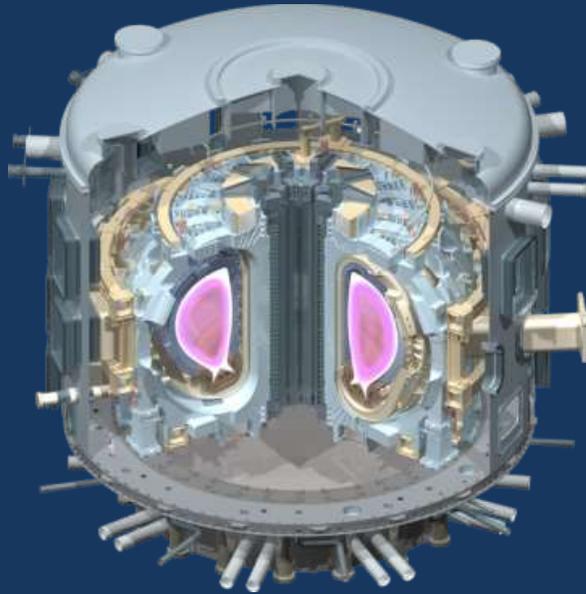
En phase d'opération normale, l'impact radiologique d'ITER sur les populations les plus exposées sera mille fois inférieur à celui de la radioactivité naturelle

Les scénarios les plus improbables, comme un incendie survenant dans l'installation tritium, auraient sur les populations voisines un impact moindre que celui de la radioactivité naturelle

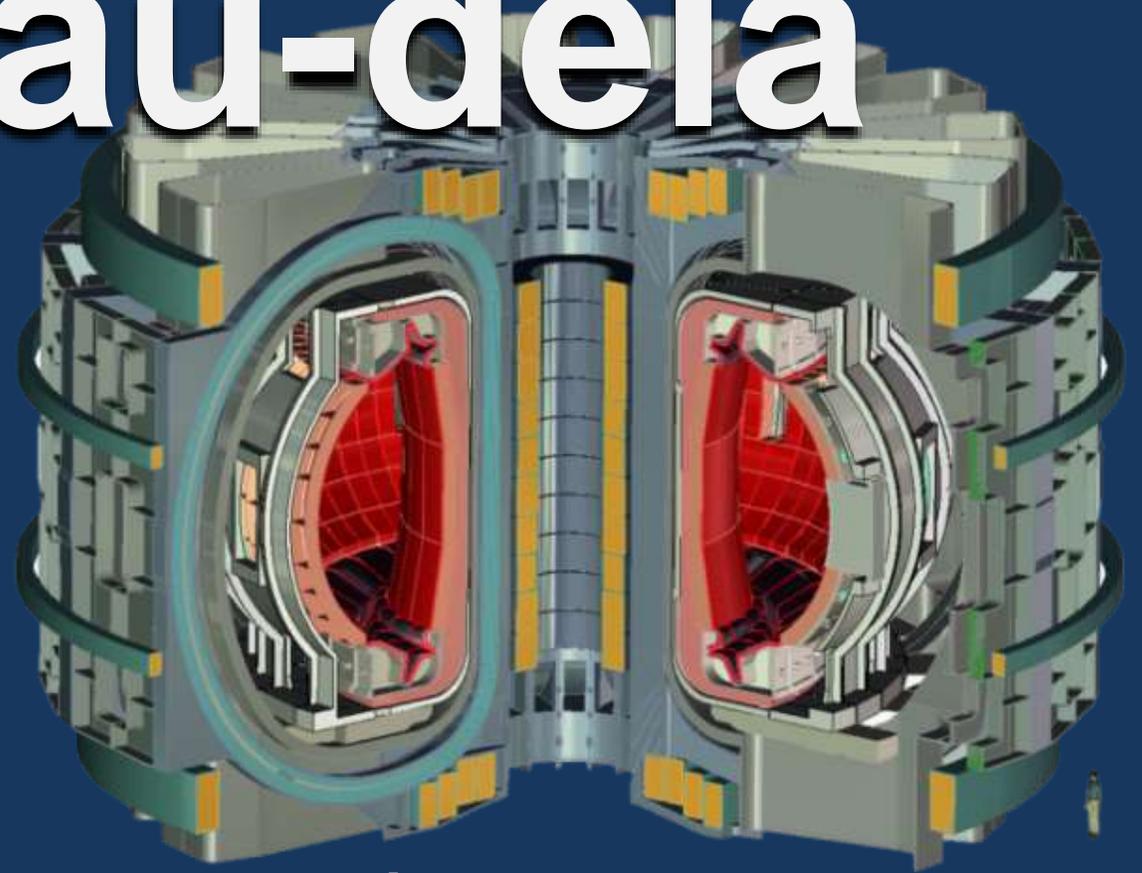
ITER est soumis à la réglementation française en matière de sûreté et de sécurité

ITER et au-delà

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



ITER
800 m³
~ 500 MW_{th}



DEMO, démonstrateur industriel

~ 500 Mw_e, 1 200 MW_{th},
Dernière étape avant la série

Vers l'industrialisation

~ 2040:

Au terme de cinq années d'opérations à pleine puissance et d'optimisation des systèmes, ITER devrait avoir démontré la faisabilité de la fusion de l'hydrogène et convaincu décideurs politiques et industriels de son potentiel.



~ 2045:

L'industrie pourrait envisager de lancer la construction des premières centrales de fusion.

~ 2055-2060:

Phase d'industrialisation

À partir de ~ 2060:

Vers un mix énergétique 50-60% fusion/fission, 40-50% renouvelables

Objectif 2025!



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