

ITER

Une énergie pour notre avenir



ITER

Une collaboration scientifique internationale 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

- 1/3 de la production d'énergie primaire est aujourd'hui mobilisé pour produire de l'électricité dans le monde.
- L'Agence internationale de l'énergie (IEA) prévoit une augmentation de la demande mondiale d'électricité de 80% d'ici 2040, dont 33% procédera de la demande chinoise, 15% de la demande indienne.
- L'accès à l'électricité est le principal vecteur de développement des sociétés humaines.

Produire massivement de l'électricité sans générer de CO₂

- Combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) : 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 (solaire, éolien, hydraulique, biomasse et géothermie): 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 de l'hydrogène: doit apporter la démonstration de sa faisabilité scientifique et technique

La fusion dans l'Univers

- 1920-1930: Mise en évidence des réactions de fusion de l'hydrogène 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.
- Le grand challenge : reproduire dans une machine à fusion (Tokamak*) une réaction similaire sur Terre

* Tokamak: Acronyme russe pour « Chambre toroidale à bobines magnétiques ».

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

Une infime perte de masse
Une immense libération d'énergie

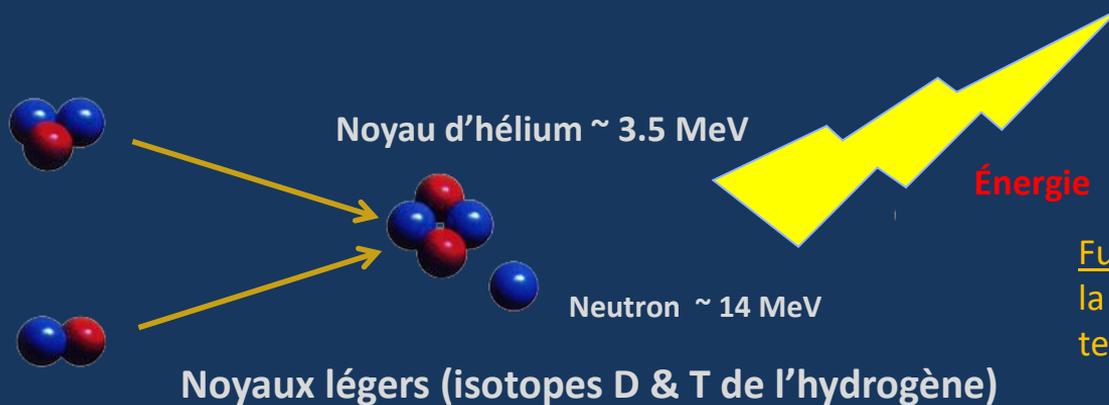
Séparer... ou réunir?

Fission



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

Fusion

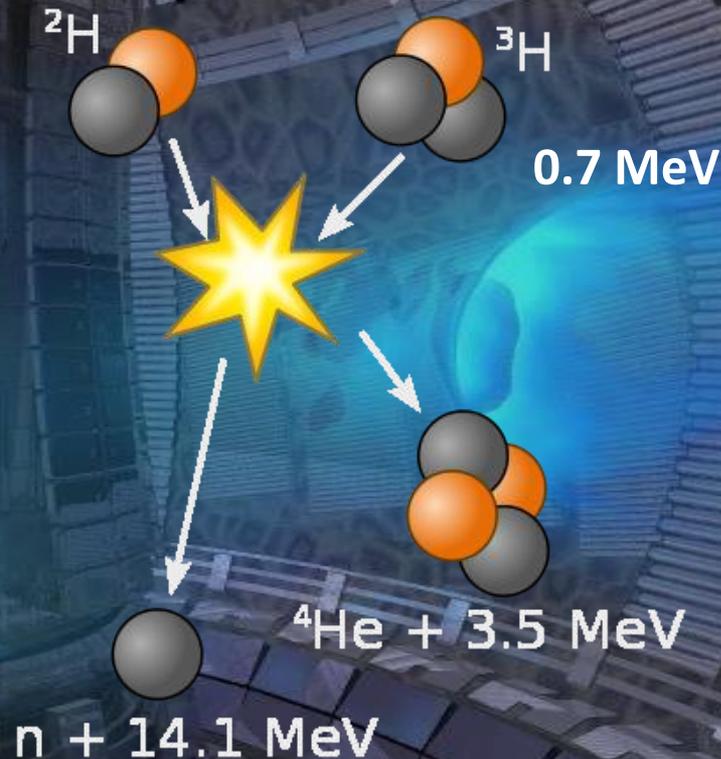


Fusion: ITER doit démontrer la faisabilité scientifique et technologique.

La fusion sur Terre

1 gramme de DT = 8 tonnes de pétrole

- Un plasma de deutérium et de tritium (isotopes de l'hydrogène) est chauffé à plus de 150 millions °C
- Le plasma chaud est façonné et confiné par de puissants champs magnétiques.
- Les noyaux d'hélium alimentent le plasma en combustion.
- Les neutrons transfèrent leur énergie à la couverture.
- Dans une centrale à fusion, un générateur de vapeur, une turbine et un alternateur classique transformeront la chaleur en électricité.



Avantages de la fusion

- Une source d'énergie massive, potentiellement continue, programmable dans le temps (possibilité d'arrêter et redémarrer), pratiquement inépuisable et universellement répartie. Parfaitement complémentaire des énergies renouvelables.
- Une technologie sûre (pas d'énergie stockée).
- Un impact très limité sur l'environnement, sans production de gaz à effet de serre, aucune émission de CO₂.
- Pas de déchets radioactifs de haute activité à vie longue à la différence de la fission.

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



Les combustibles de fusion

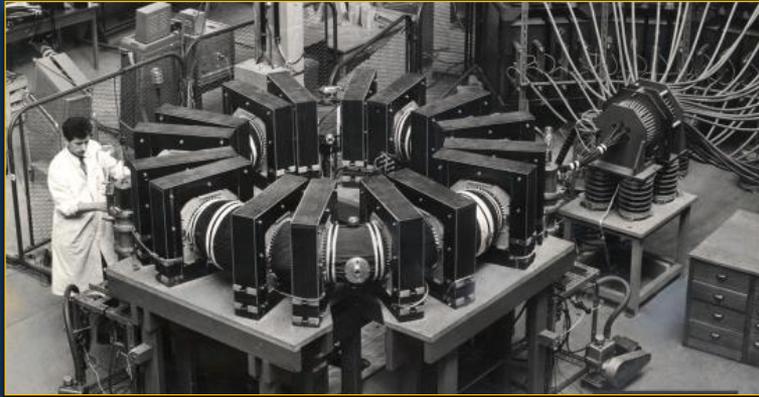


Le lithium* contenu dans la batterie d'un seul ordinateur portable et le deutérium d'une demi-baignoire d'eau peuvent fournir 200 000 kwh d'électricité.

C'est suffisant pour couvrir les besoins en électricité d'une personne en Europe occidentale pendant 30 ans.

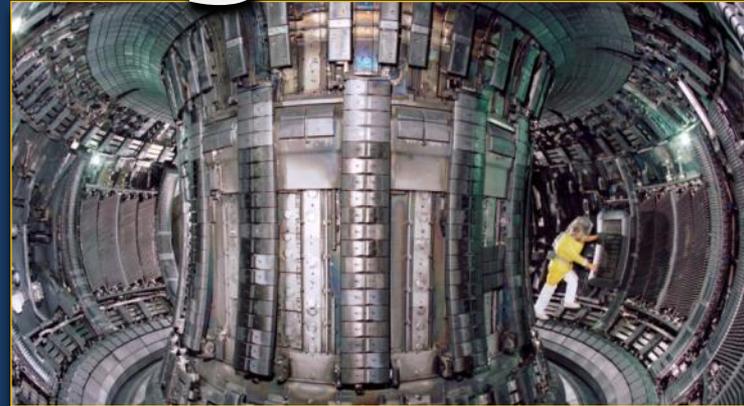
** Les neutrons percutant le lithium génèrent du tritium.*

60 ans de progrès



▶ TA-2000,
France, 1957

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



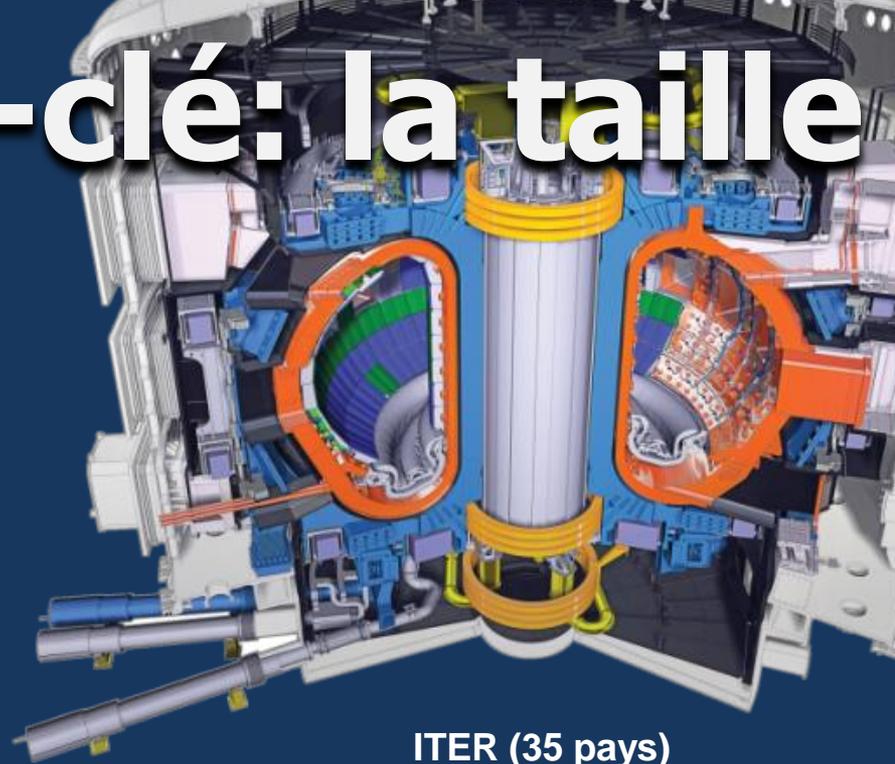
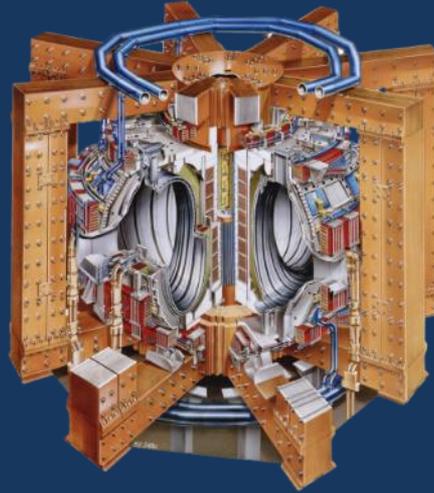
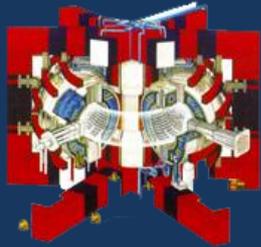
▶ JT-60SA
Japon-UE
Mise en service
imminente



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



Un 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

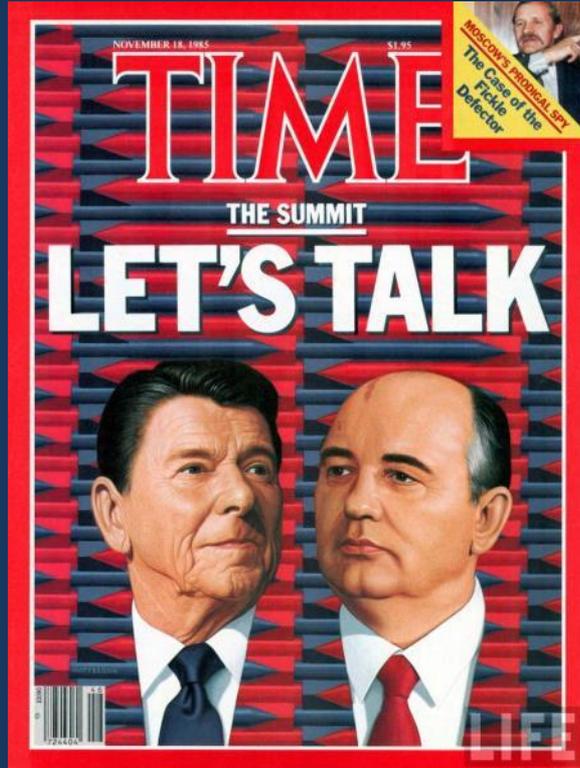
JET (Europe)

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

Un projet qui vient de loin...



Années 1950-1960:

- Exploration de la physique des plasmas
- Construction de machines de plus en plus performantes.
- Les spécialistes comprennent qu'ils auront 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

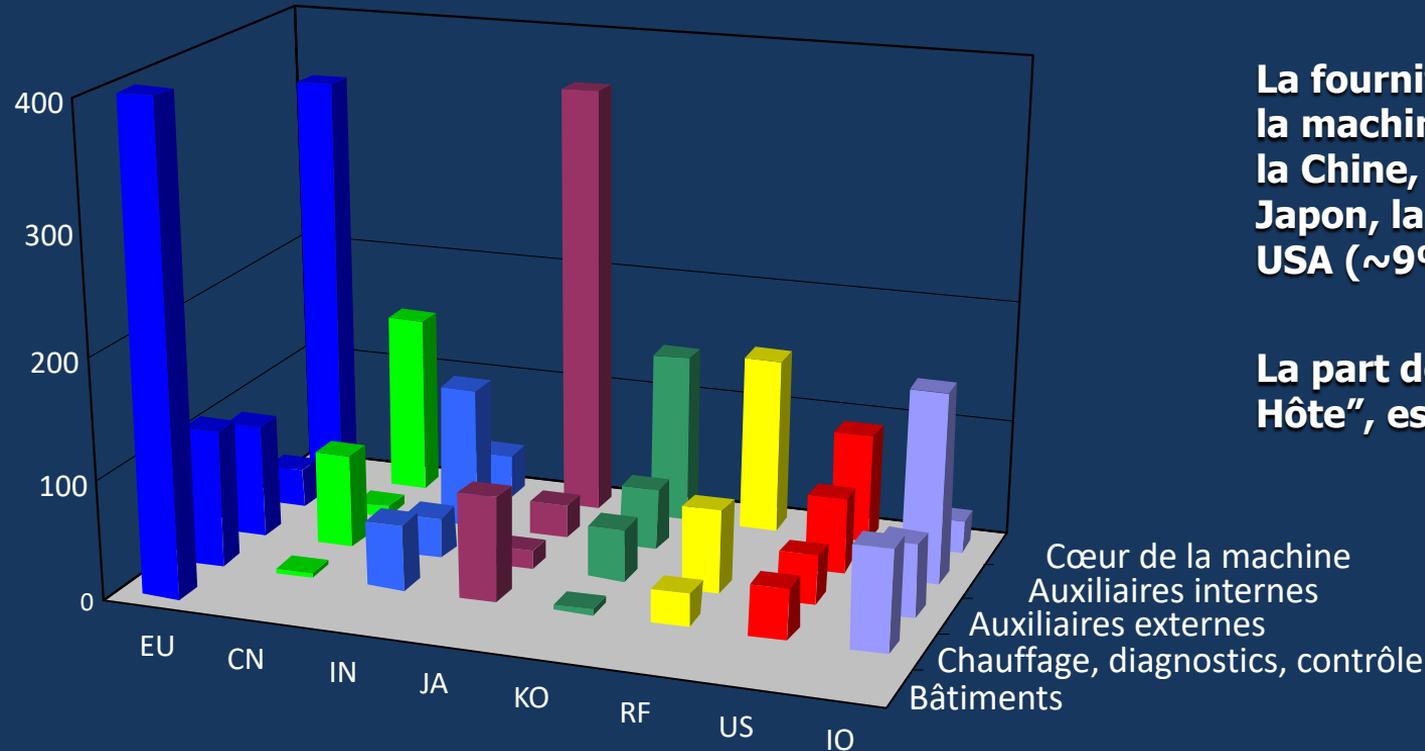
Une organisation intégrée

ITER Organization-Équipe centrale et 7 Agences domestiques

- Les 7 membres d'ITER contribuent financièrement (~ 10%) et en nature (~ 90%) au programme ITER. Ils ont créé chacun une "Agence domestique" pour gérer les contrats avec l'industrie.
- Chaque agence domestique est responsable des travaux qui lui sont attribués
- 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.



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%.

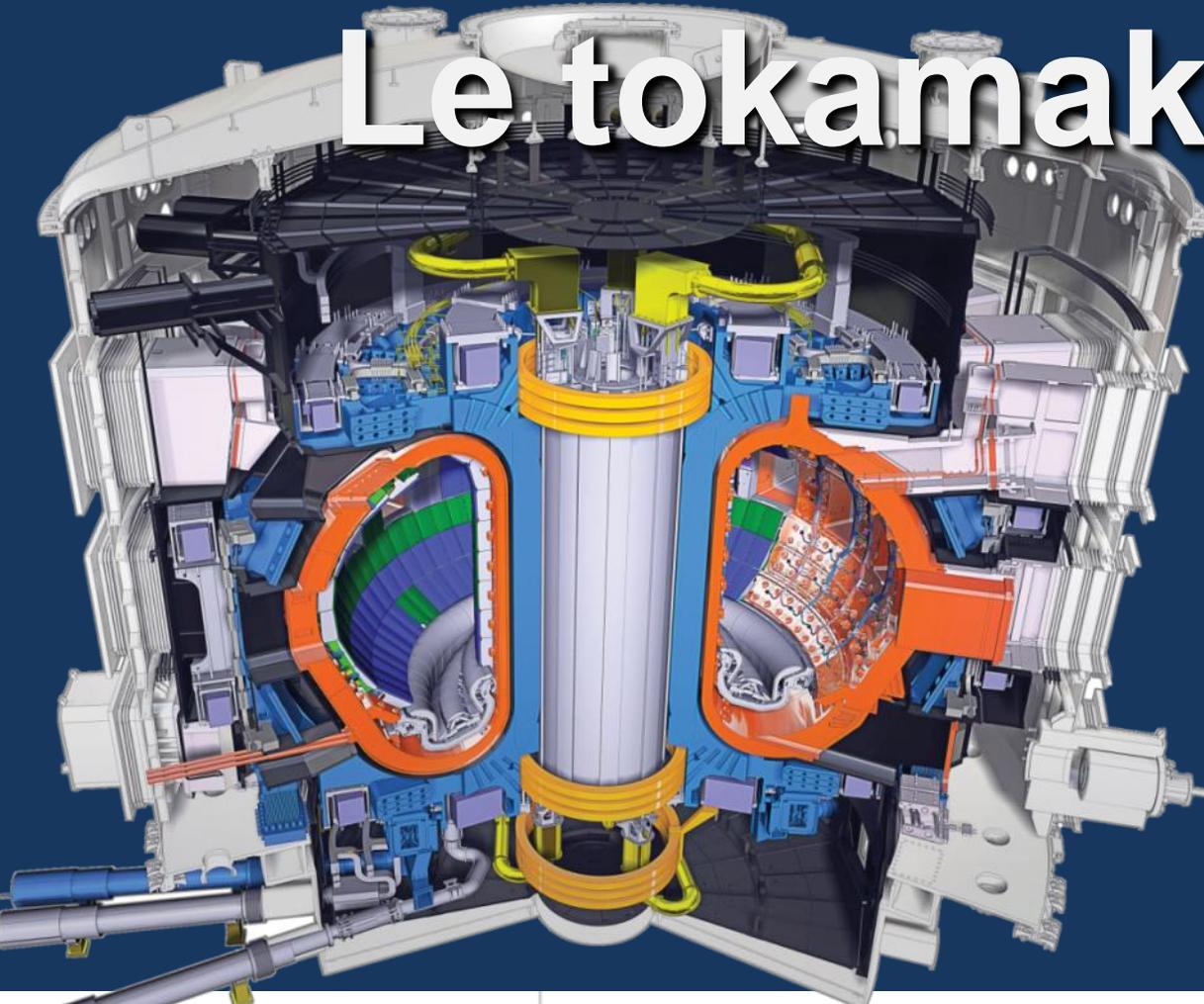
Cœur de la machine
Auxiliaires internes

Auxiliaires externes

Chauffage, diagnostics, contrôle

Bâtiments

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.



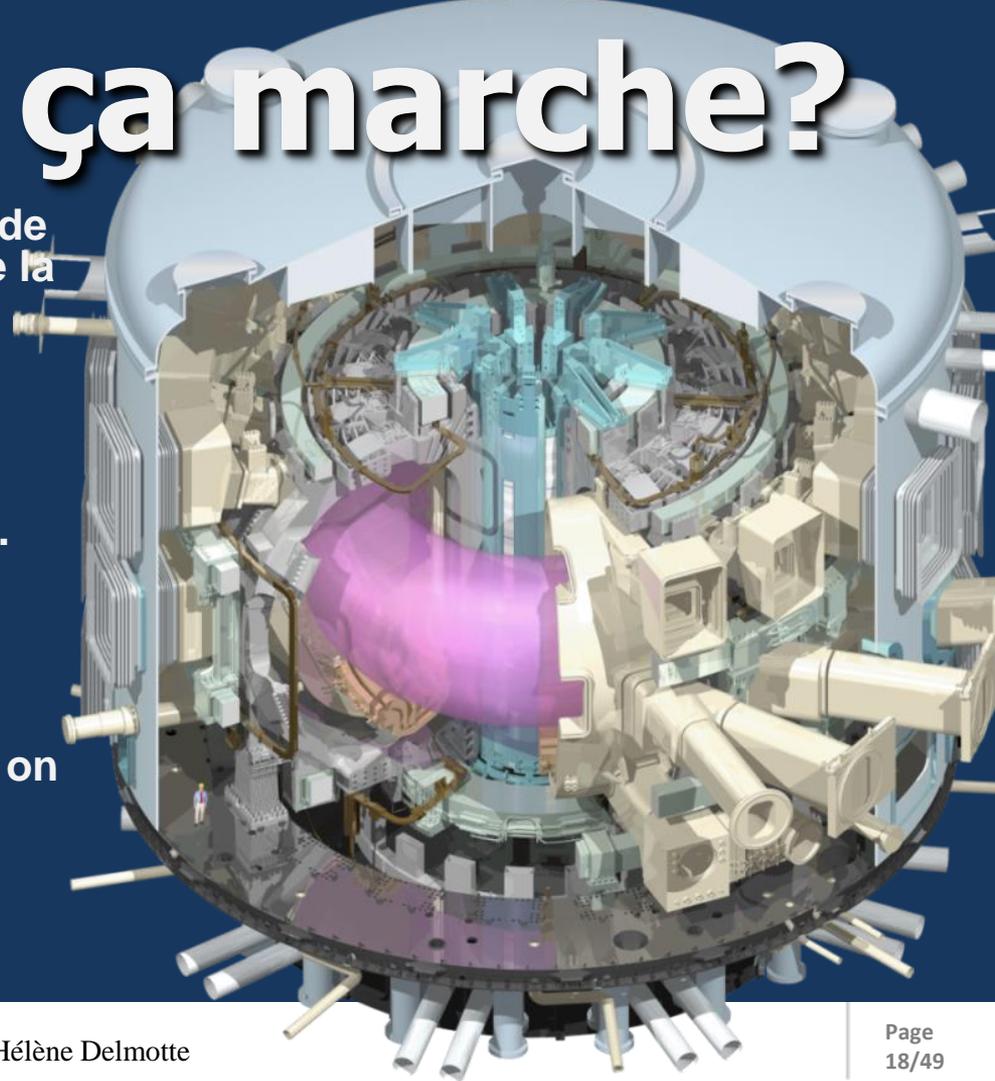
3,5 fois la masse de la Tour Eiffel!

Comment ça marche?

- Fort courant électrique dans un mélange de gaz DT. Création d'un 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 pour la fusion.

Mais dans quoi contenir un milieu porté à 150 millions °C ?



Une cage magnétique géante

Générés par un système d'aimants supraconducteurs, des champs magnétiques très puissants façonnent et 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 t. 18 m. de haut, 300 000 fois le champ magnétique terrestre;
- **18 bobines de champ toroïdal**, 17 m. de haut, 360 t. chacune;
- **6 bobines de champ poloïdal** de 8 à 24 m. de diamètre
- **18 aimants correcteurs**

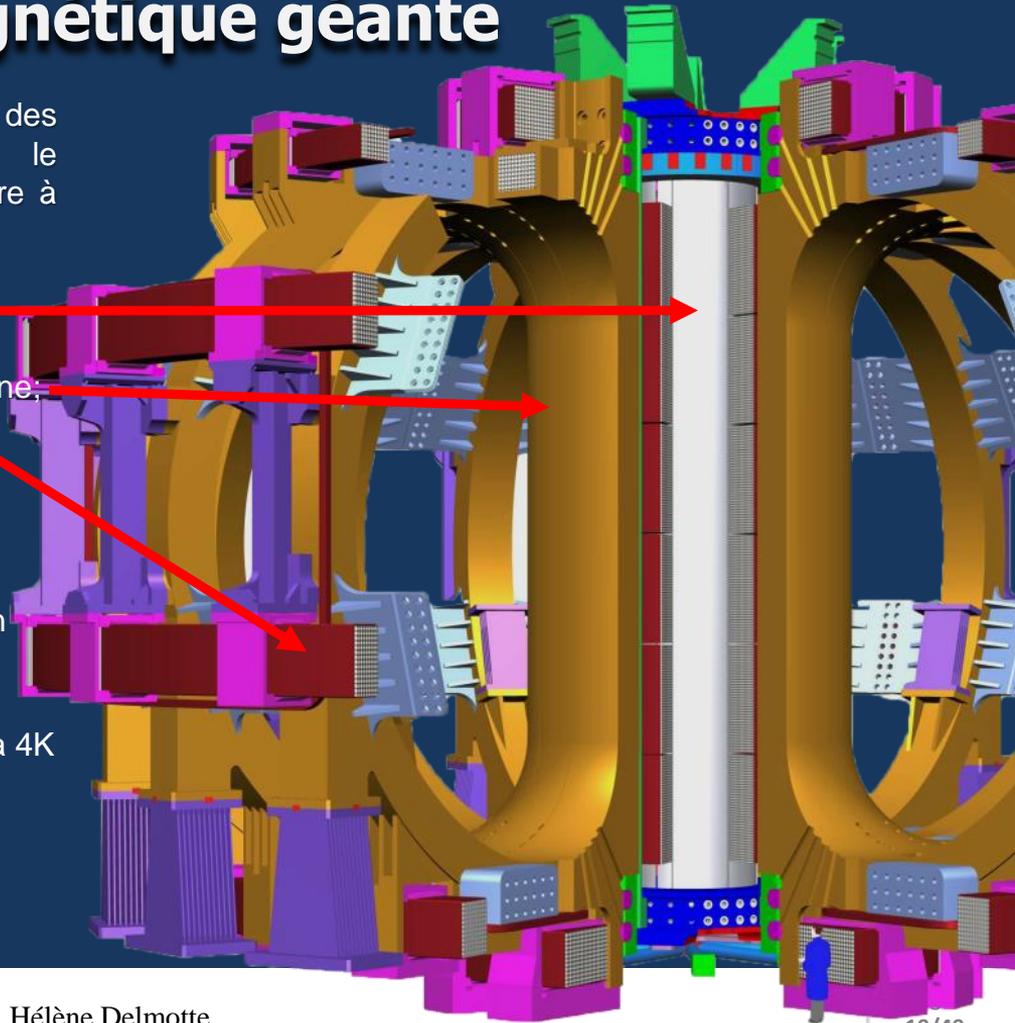
Total = 10 000 tonnes d'aimants supraconducteurs

Les aimants supraconducteurs peuvent transporter plus de courant et générer des champs magnétiques plus puissants en consommant beaucoup moins d'électricité.

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

Energie magnétique = 51 Gigajoules

Champ magnétique maximum = 11.8 tesla



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 0,2 millimètres.

2016: les 18^{ème} et 19^{ème} Conseils ITER valident la « feuille de route »



Le Conseil ITER se réunit deux fois par an (juin et novembre) au siège d'ITER à Saint-Paul-lez-Durance.

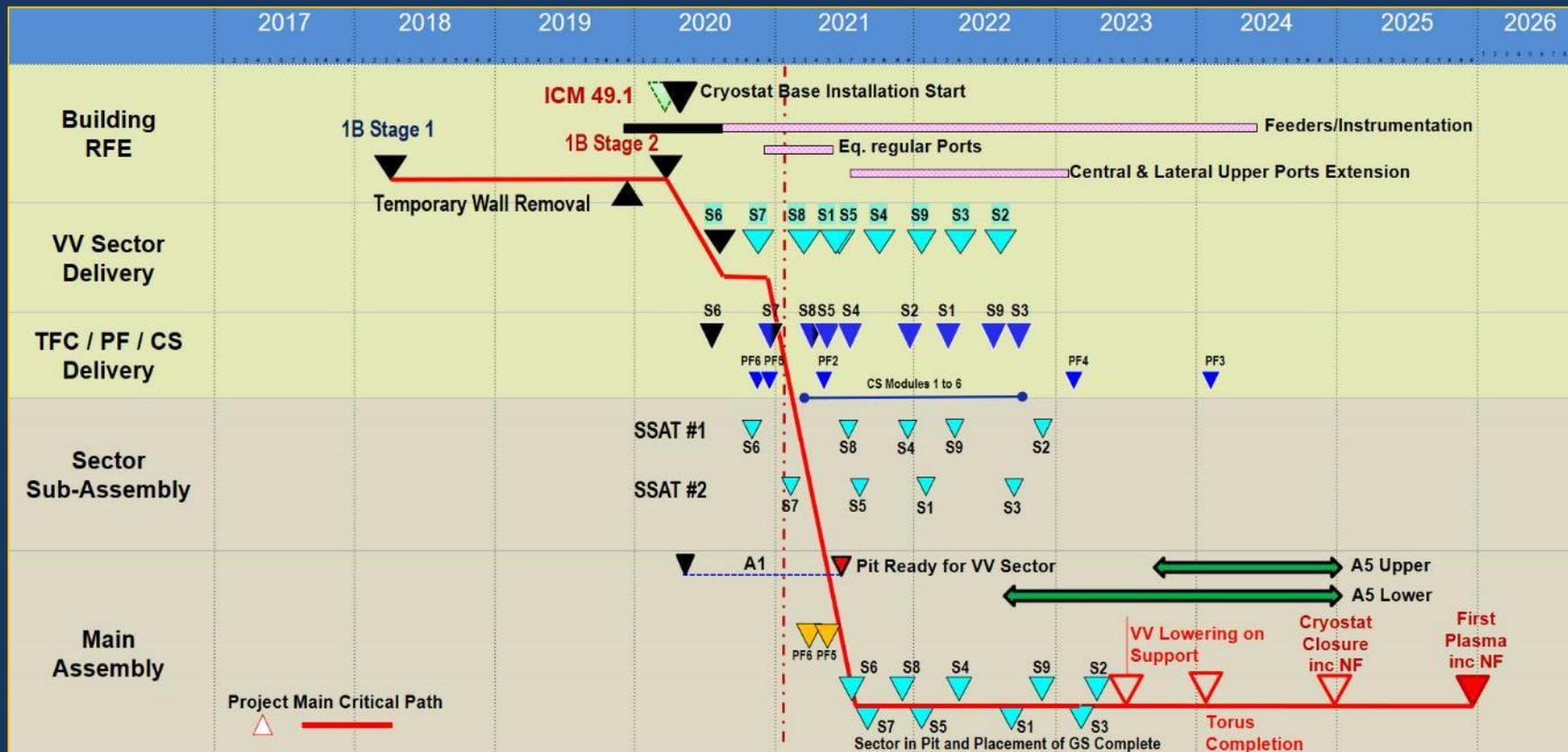
**Premier Plasma: décembre 2025;
premières expériences de physique : fin
2028; plasmas de puissance : fin 2035**

**Le calendrier actualisé est exigeant, mais
techniquement réalisable**

**Le calendrier actualisé est fondé sur les
meilleures solutions techniques
permettant d'aboutir au Premier Plasma**

**Les membres d'ITER disposent depuis
2016 de l'ensemble des éléments qui leur
permet d'engager les procédures de
validation interne du calendrier intégré et
des ressources associées**

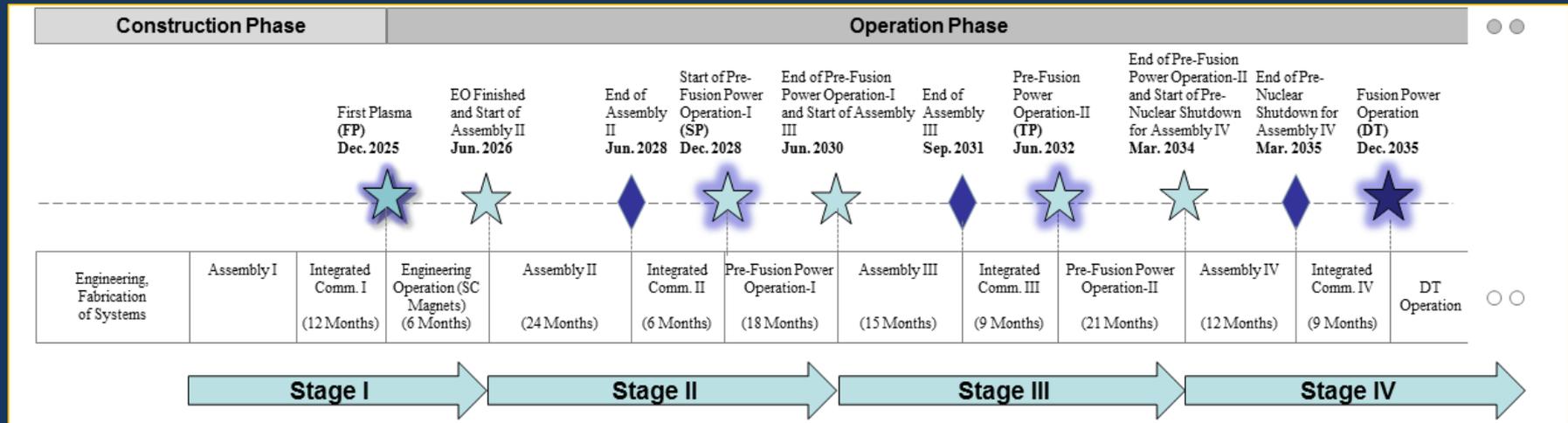
Détail du calendrier de construction



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.



Vers le « Premier plasma » : ~ 74% des tâches réalisées



”L’ensemble des taches indispensables à la production du Premier Plasma” est réalisé à ~ 73%. Depuis 2016, le taux moyen de progression mensuelle est de l’ordre de 0,7 %.

Où en est le chantier?

Cylindre principal du Cryostat
(stockage de l'hélium)

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

Bâtiment Tokamak

Zone entreprises

Siège ITER Organization

Future alimentation NBI

Systèmes électriques

Novembre 2020



28 juillet 2020: lancement officiel de la phase d'assemblage



Emmanuel Macron:

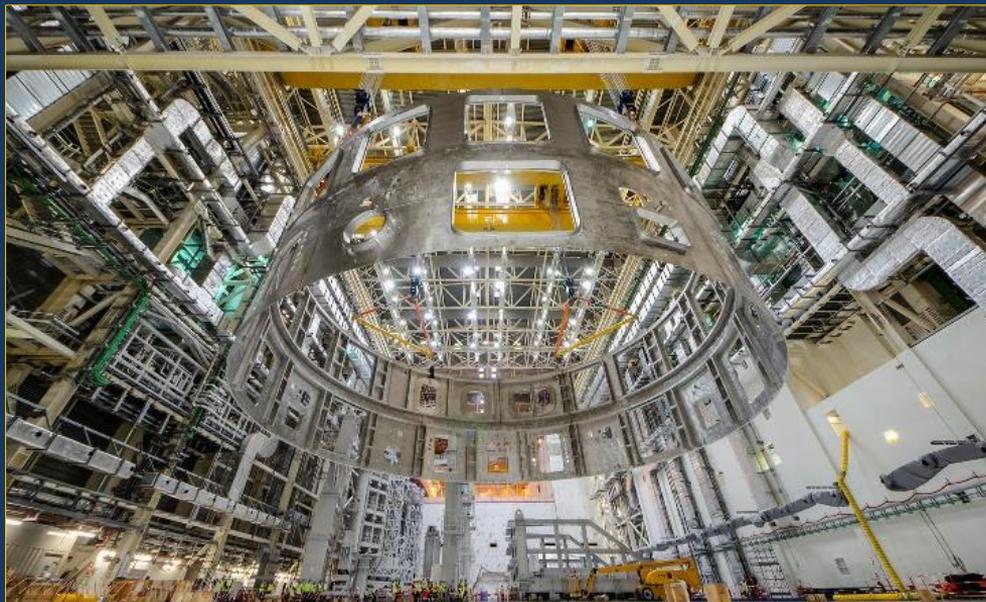
« ITER est un acte de confiance en l'avenir [...] Grâce à la science, demain peut être meilleur qu'hier. »

La phase d'assemblage est en cours

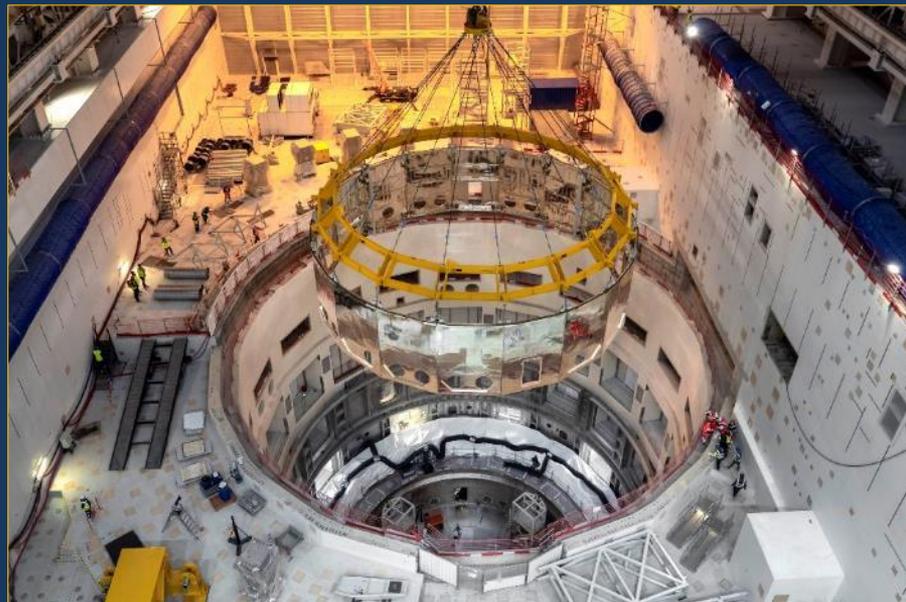


Les 26 et 27 mai 2020, la base du Cryostat a été
insérée dans le puits d'assemblage du Tokamak...

Des opérations spectaculaires

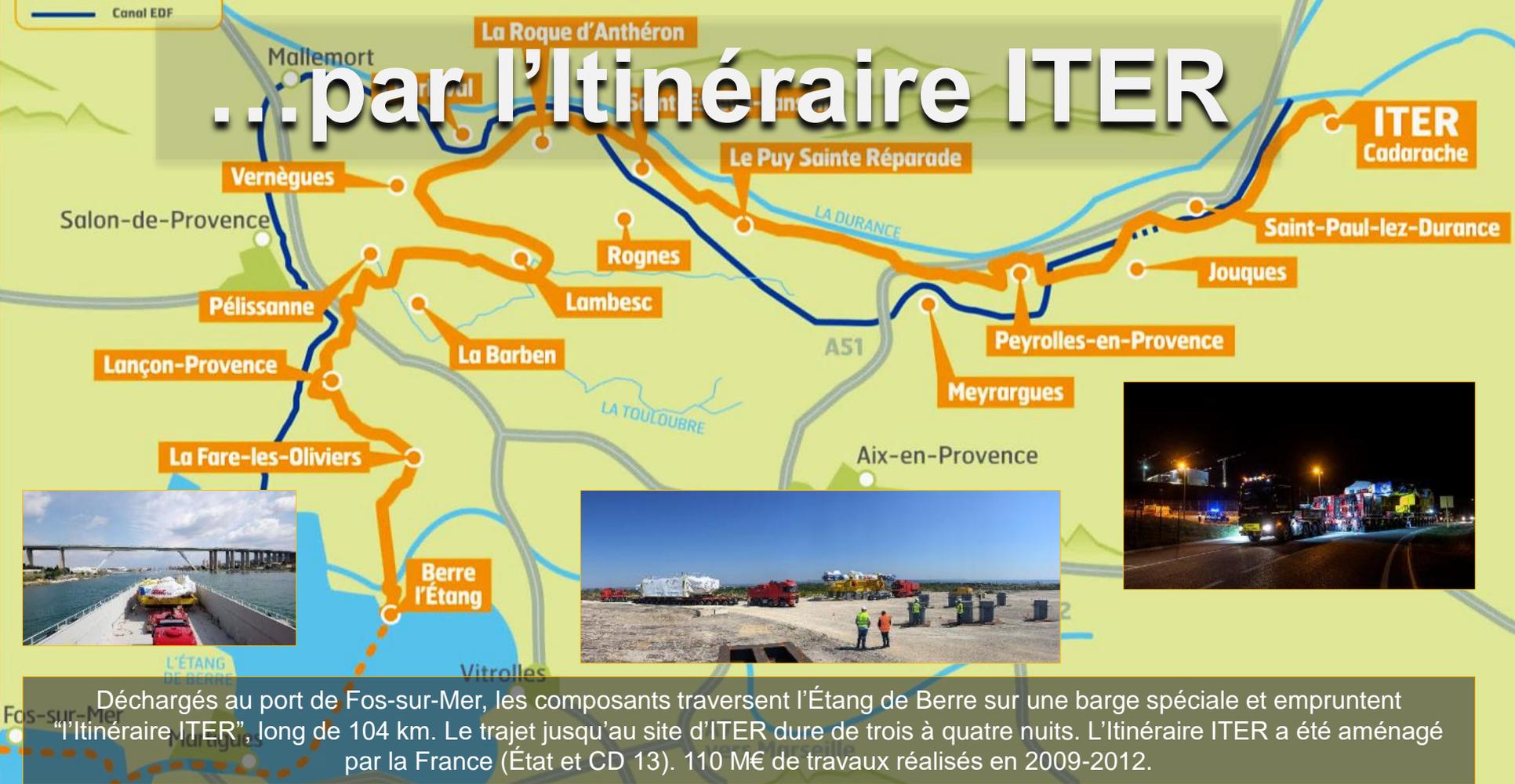


...suivie, le 31 août, par le cylindre inférieur...



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

... 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.

Arrivages massifs

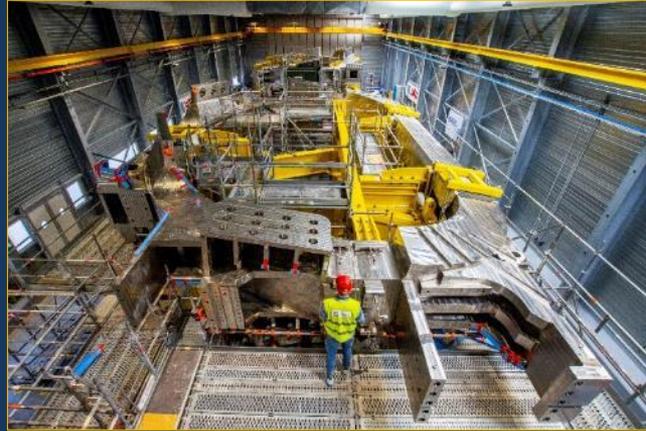


Arrivages massifs



TF 05
18 décembre 2020

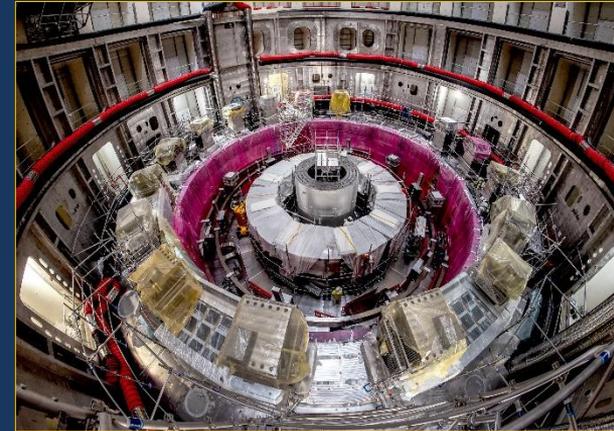
Équiper avant l'assemblage



Les bobines de champ toroidal n°9 et 12 récemment livrées sont en cours d'équipement, préalablement aux opérations de pré-assemblage.

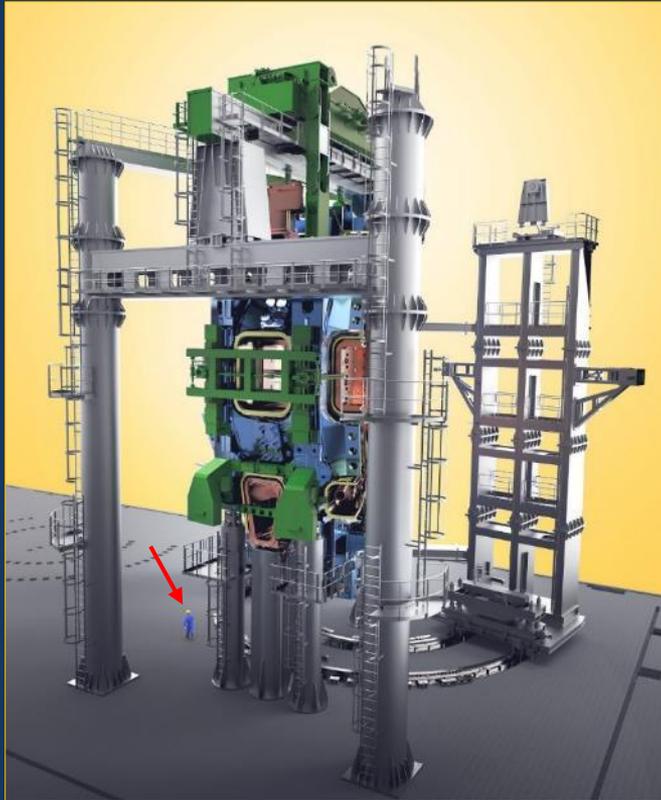


Le secteur de chambre à vide # 6, fourni par la Corée et livré début août 2020, sera accouplé aux bobines de champ toroidal #12 et #13 et à la section d'écran thermique correspondante pour former le premier « pré-assemblage ».



Livrée sur site le 26 juin, la bobine de champ poloidal n°6, fournie par l'Europe et fabriquée en Chine, a passé avec succès les tests cryogéniques et a été insérée dans le puits du tokamak en Avril 2021.

Vers le premier "pré-assemblage"



Avec la livraison, début août, d'un premier secteur de chambre à vide (VVS n° 6) fabriqué en Corée, ITER va pouvoir procéder au premier des 9 « pré-assemblages » qui constituent le cœur du Tokamak.

Un « pré-assemblage » est constitué d'un secteur de chambre à vide, deux bobines de champ toroidal et une section de bouclier thermique.

Portique de pré-assemblage (SSAT)



Installation des systèmes



◀ 5,5 km de lignes cryogéniques

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



◀ Évacuation
de la chaleur
(1 200 MW)

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



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



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 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.

Entre 2008 et 2017, ITER a mobilisé 40,000 emplois/an en Europe.

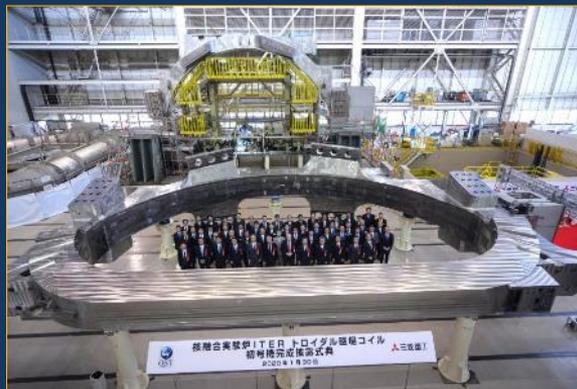
Ce nombre est appelé à doubler dans les années qui viennent.

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.



▶ 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.



▶ Fabriqués en Inde pour être assemblés et soudés sur site, les derniers éléments du Cryostat (*top lid*) ont été livrés à l'aube ce matin.

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%.

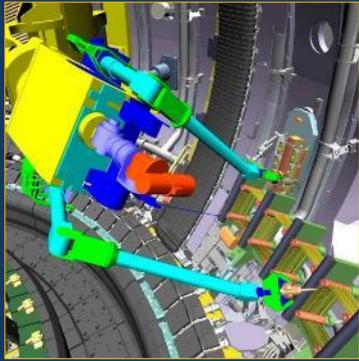


Les six modules du solénoïde central (plus une recharge) abordent les dernières étapes de la fabrication dans les ateliers de General Atomics près de San Diego en Californie. Le premier est prévu pour arriver sur site début 2021.



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.

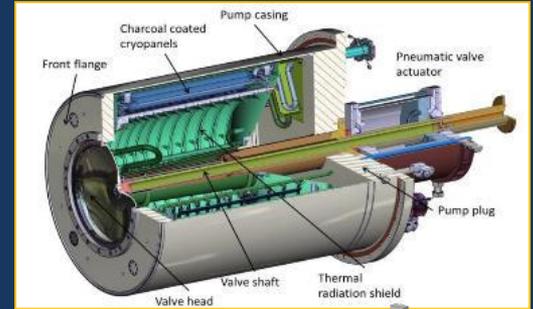
Innovation



▶ Robotique en environnement extrême



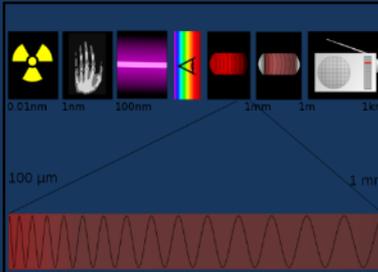
▶ Electronique de puissance



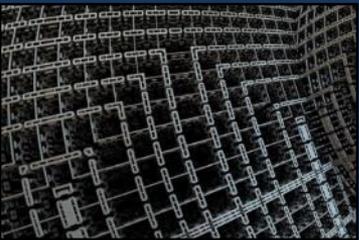
▶ Transmission de signal ultra-haut débit (TeraHertz)



▶ Supraconducteurs



▶ Transmission de signal ultra-haut débit (TeraHertz)



▶ Filtres de haute-technologie



▶ Emboutissage par explosion

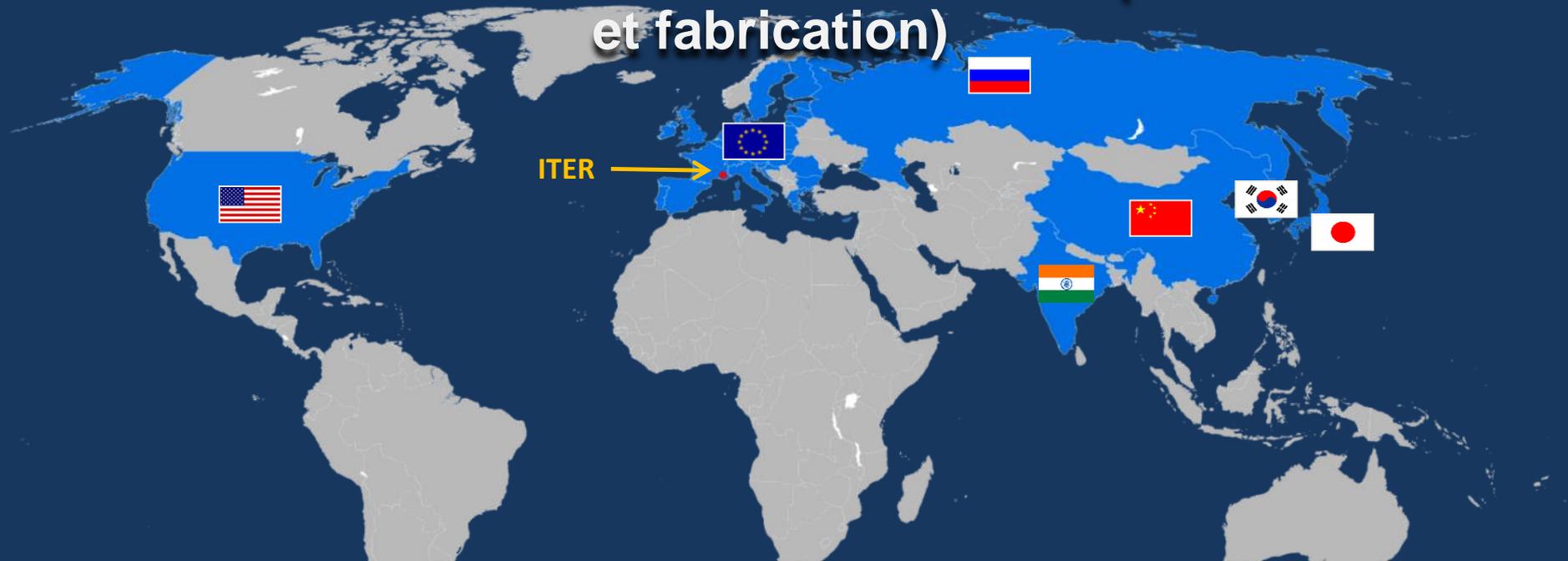
▶ Cryopompes et systèmes sous vide



Etc.

Retombées économiques

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



Total des contrats depuis 2007 en Europe ~ 6,5 milliards d'euros (y compris les travaux de génie civil)

Le chantier ITER



- 2 300 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'emballage 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

Quel coût?

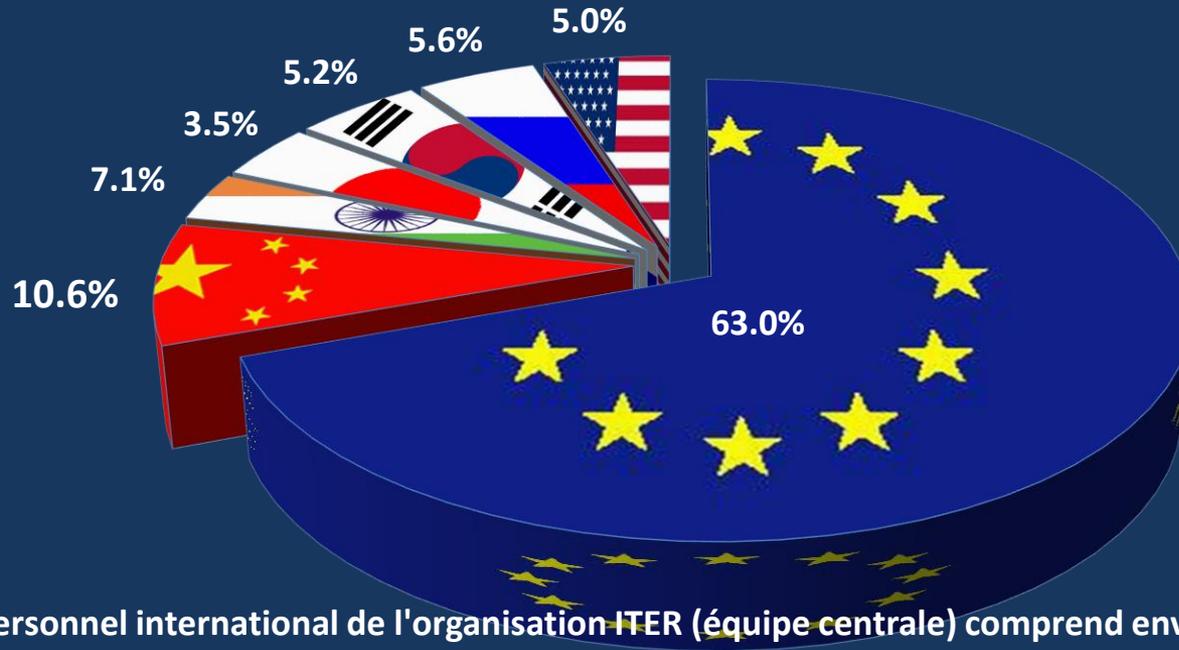
Phase de construction: Organisation ITER
Fournitures en nature par les Membres
Phase d'exploitation

8,2 milliards € (valeur 2018)
12,5 milliards € (estimation)
300 millions €/an

Phase de mise à l'arrêt
Phase de démantèlement

281 millions € (valeur 2001)
530 millions € (valeur 2001)

Qui travaille pour IO ?

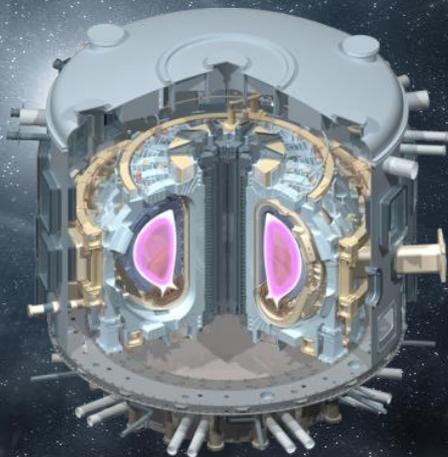


August 2019

Le personnel international de l'organisation ITER (équipe centrale) comprend environ 1 000 personnes (35 pays).
Près de 500 contractants et experts travaillent directement pour ITER à Saint-Paul-lez-Durance, en France.
Plus de 3 000 spécialistes sont impliqués dans ITER à travers le monde.

ITER et au-delà

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

En avant vers le premier plasma !

Merci de votre attention



www.iter.org