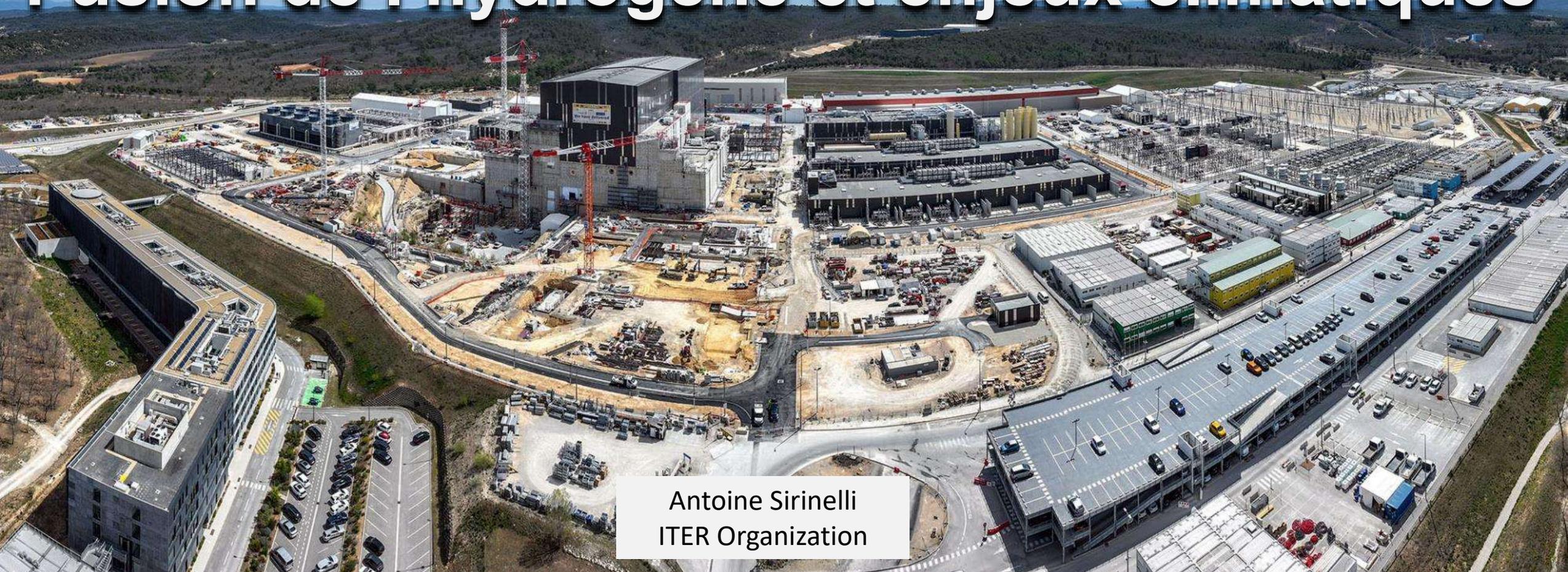


ITER

Fusion de l'hydrogène et enjeux climatiques



Antoine Sirinelli
ITER Organization

Répondre aux besoins de la société sans nuire à la planète

- Les combustibles fossiles assurent encore 65% de la production d'électricité dans le monde.
- 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.

Quelles options pour une production massive et décarbonée?

- Renouvelables: production intermittente, faible densité, ne peuvent répondre aux besoins de l'industrie et des mégapoles.
- 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, technique et industrielle

Fusion de l'hydrogène: l'énergie du Soleil et des étoiles

- 1920-1930: Mise en évidence des réactions de fusion de l'hydrogène 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.

$$E=mc^2$$

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

La fusion sur Terre

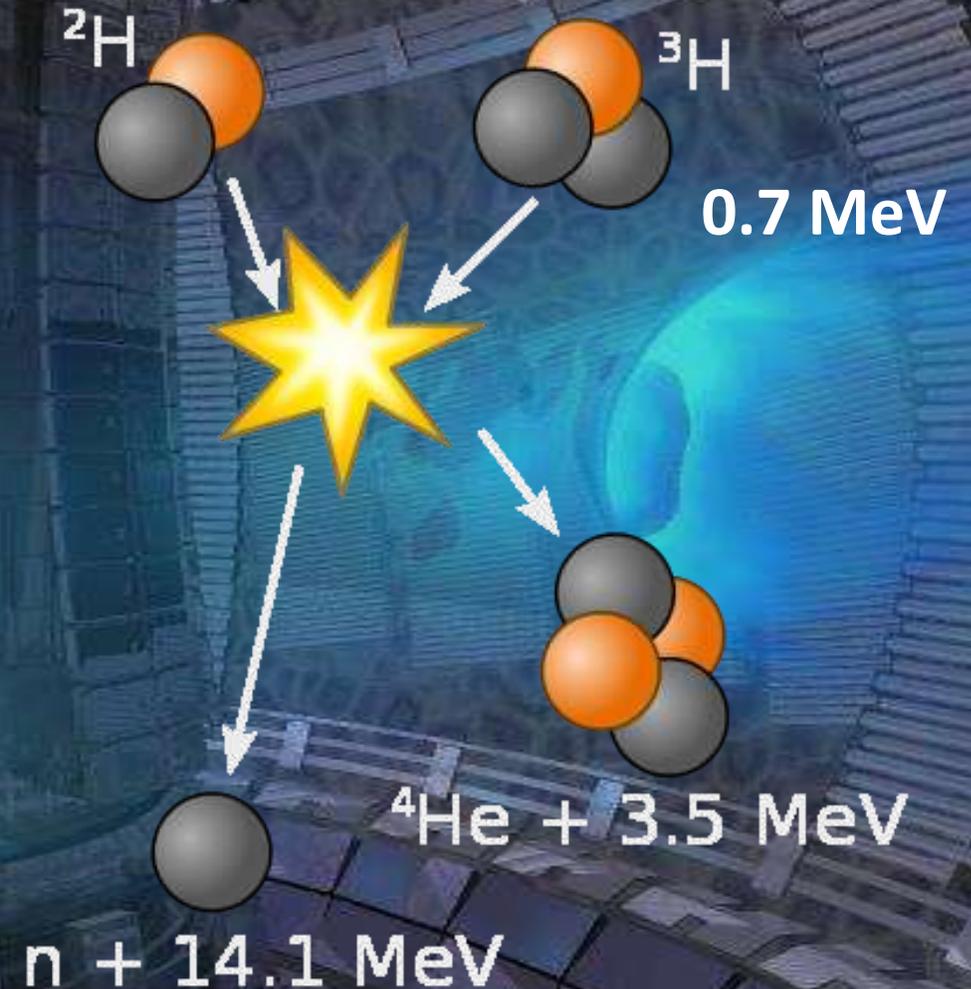
1 gramme de DT = 8 tonnes de pétrole

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*



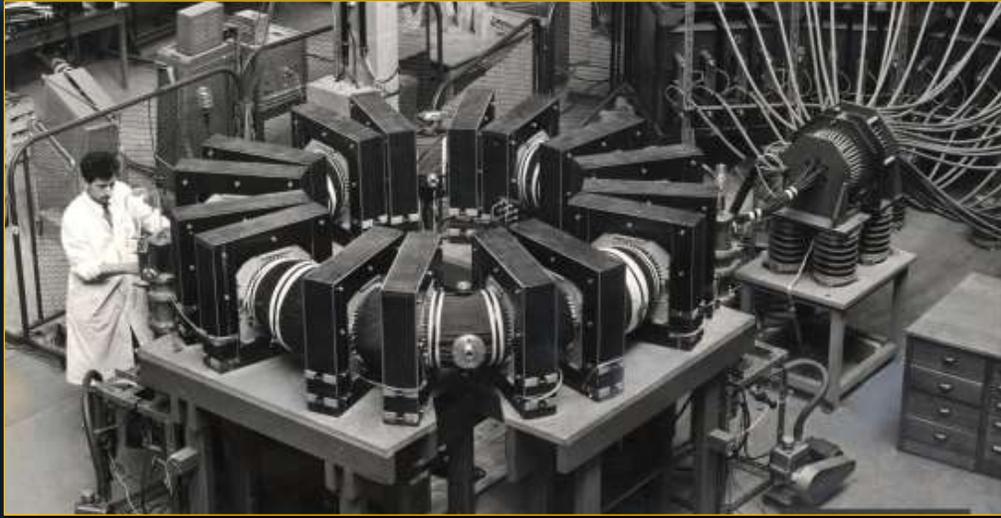
De remarquables atouts



- Une source d'énergie massive, continue, 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.

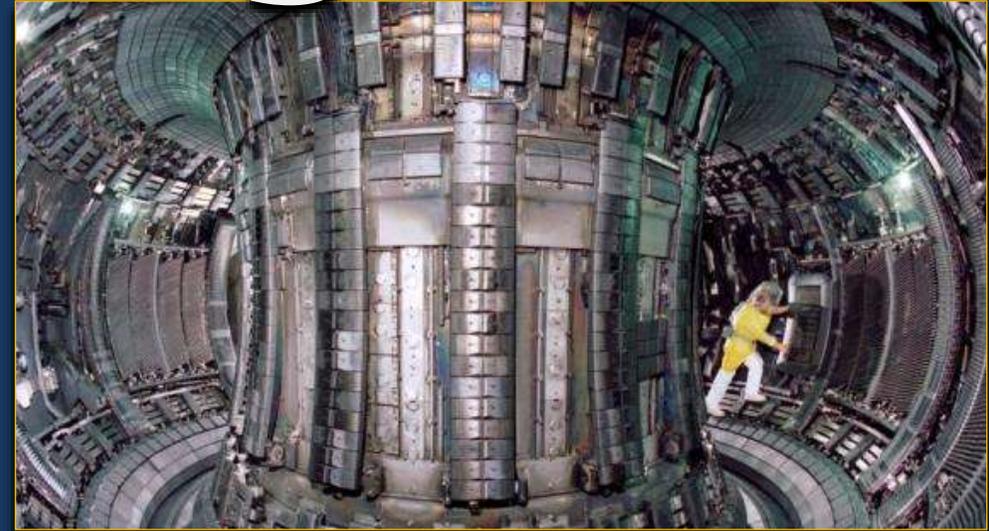
◀ Un plasma dans le tokamak WEST (CEA-Cadarache)

65 ans de progrès



◀ TA-2000,
France, 1957

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

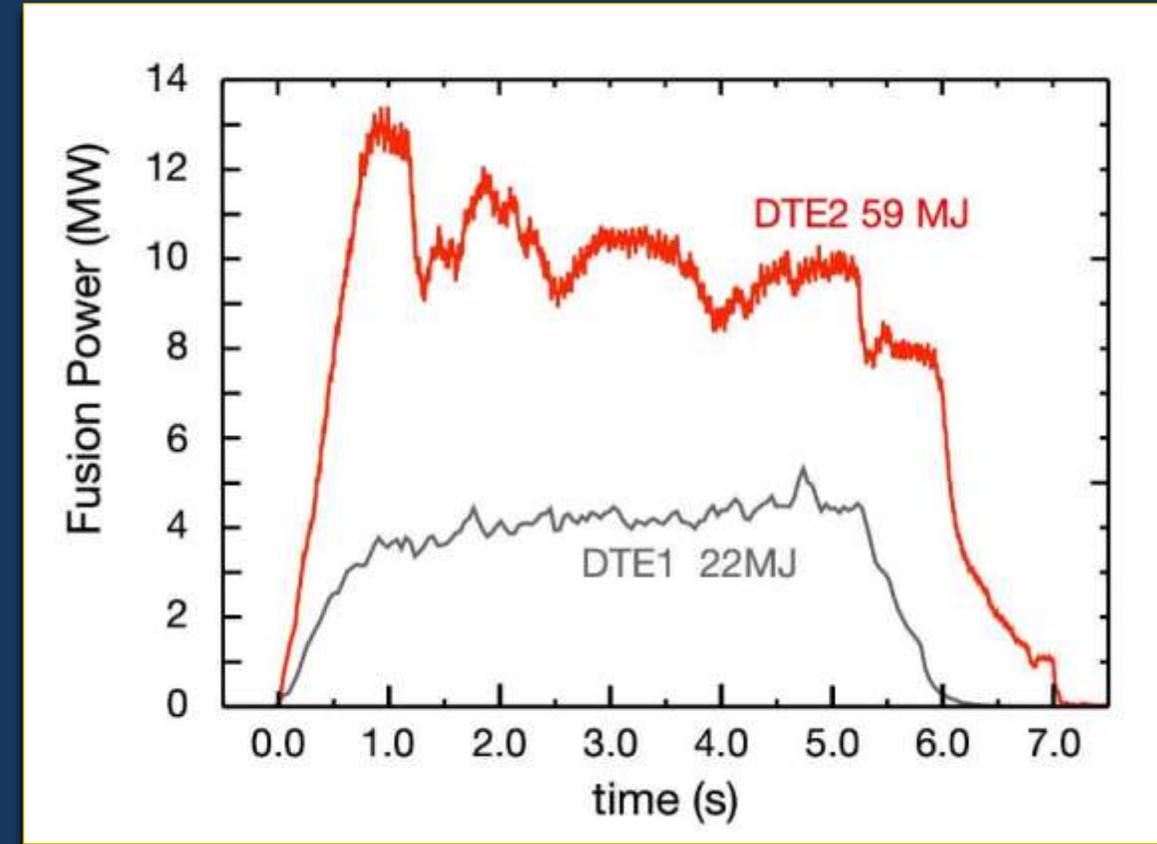


◀ JT-60SA
Japon-UE
Mise en service
en cours

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



La fusion ça marche!



La machine européenne JET a été la première à mettre en œuvre les « vrais » combustibles de la fusion, générant jusqu'à 22 MJ de puissance en 1997. Au mois de décembre 2021, JET a établi un nouveau record à 59 MJ, confirmant les hypothèses et le futur fonctionnement d'ITER. La fusion, ça marche...

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 »



Le **28 juin 2005**, les Membres d'ITER ont unanimement choisi le site de Cadarache (13), proposé par l'Europe. Le **21 novembre 2006**, l'Accord ITER était signé au palais de l'Élysée



Janvier 2007

Aménagement du site par la France (défrichage, nivellement, viabilisation). Début de la construction **août 2010**.

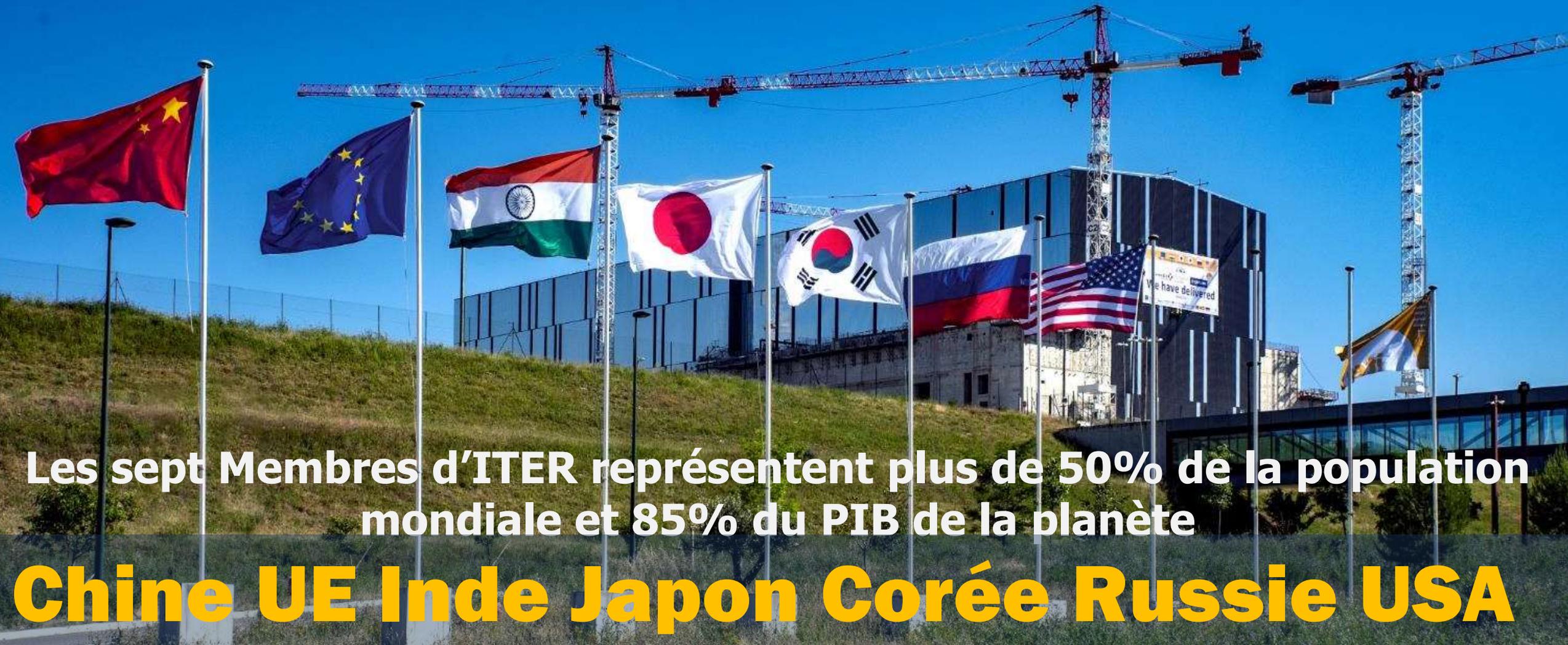


Aujourd'hui

Bien qu'affectés par la pandémie, les travaux (construction et fabrications) se poursuivent à un rythme soutenu. Génie civil finalisé à 85%.



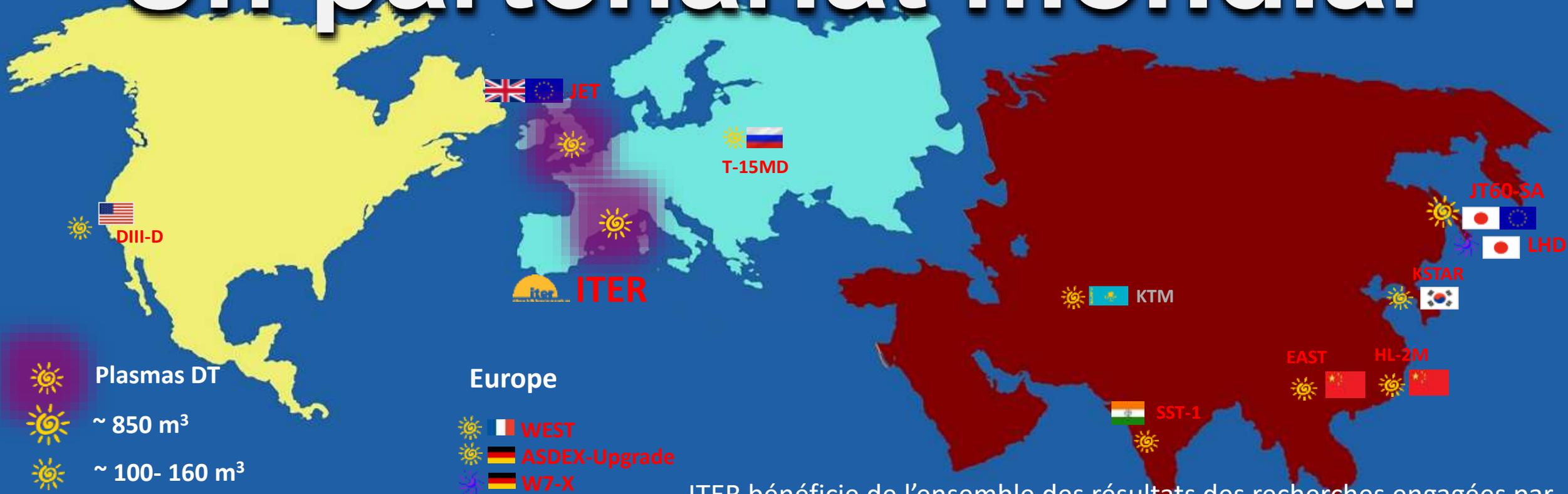
Défi global, réponse globale



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

Un partenariat mondial



- Plasmas DT
- ~ 850 m³
- ~ 100- 160 m³
- ~ 20-25 m³
- ~ Stellarator - Heliotron

Europe

- WEST
- ASDEX-Upgrade
- W7-X
- MAST-U
- TCV

ITER bénéficie de l'ensemble des résultats des recherches engagées par la communauté internationale depuis le début des années 1950. La taille de la machine, ses fonctionnalités vont permettre, pour la première fois, d'observer un état de la matière qui n'existe qu'au cœur des étoiles. Et de démontrer la faisabilité de la fusion de l'hydrogène comme source d'énergie propre, sûre et virtuellement inépuisable

Une organisation intégrée

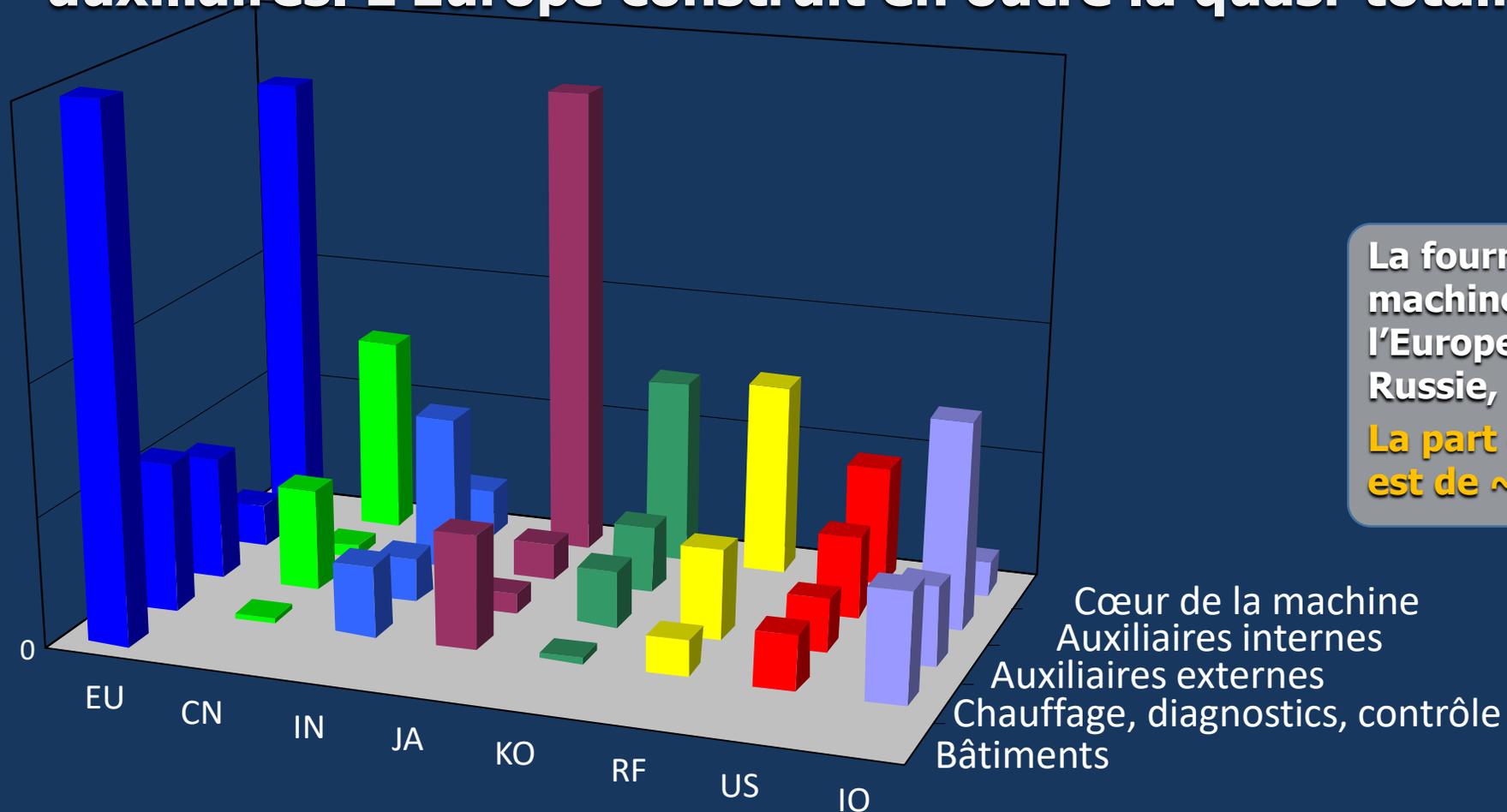
ITER Organization-Équipe centrale et 7 Agences domestiques

- Les 7 membres 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 »

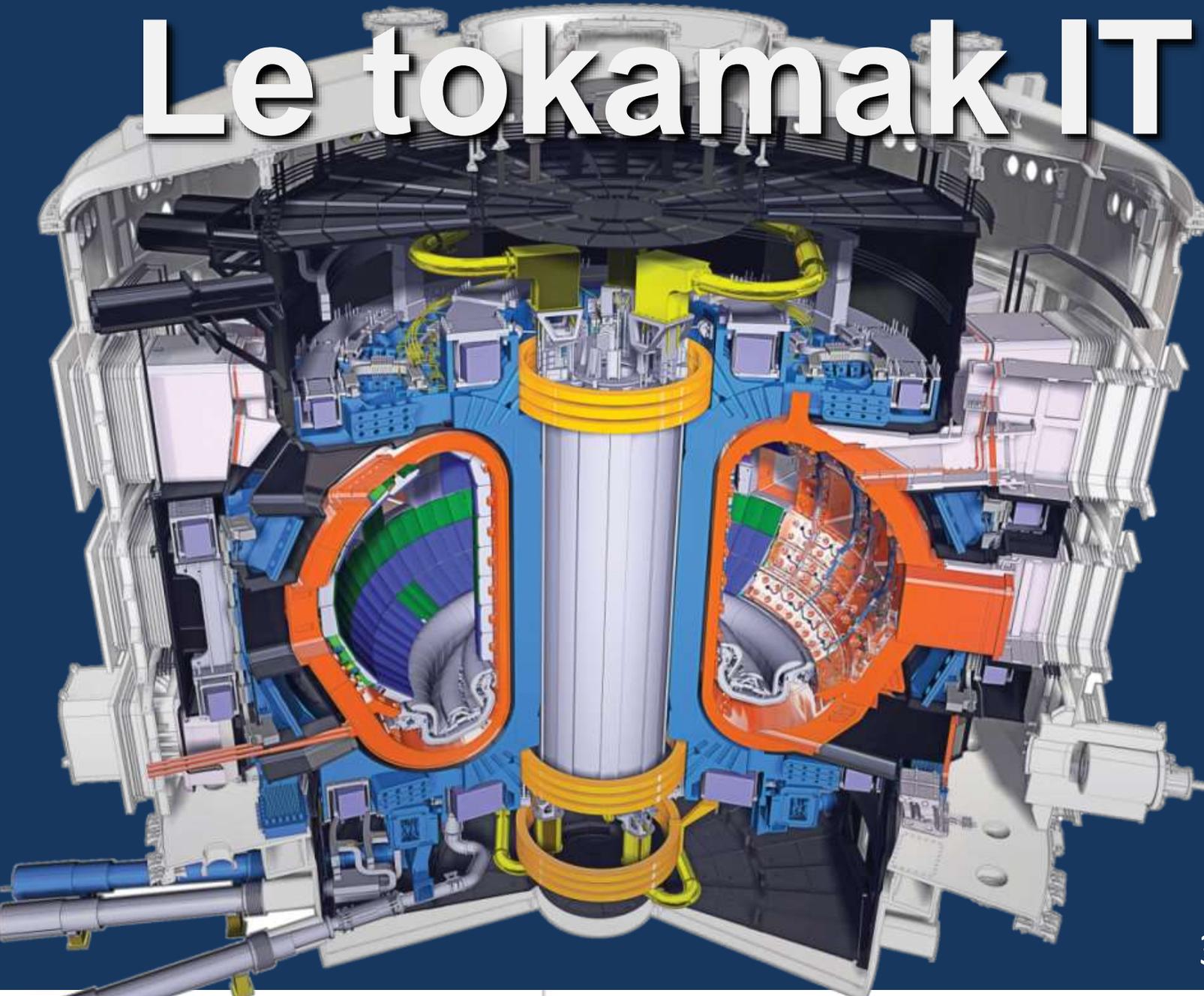
Les sept Membres d'ITER fabriquent les pièces de la machine et des auxiliaires. L'Europe construit en outre la quasi-totalité des bâtiments



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%.

Le tokamak ITER



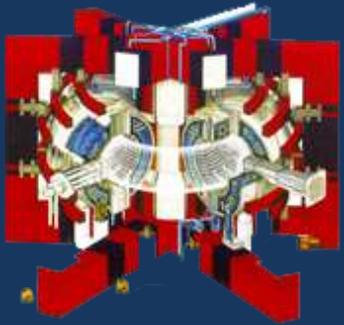
Chambre à vide: ~ 8 000 t.
Bobines TF: 18 x 360 t.
Bobines PF: 6 de ~ 200 à ~400 t.
Solénoïde central: ~ 1 000 t.
Etc.

Total ~ 23 000 t.



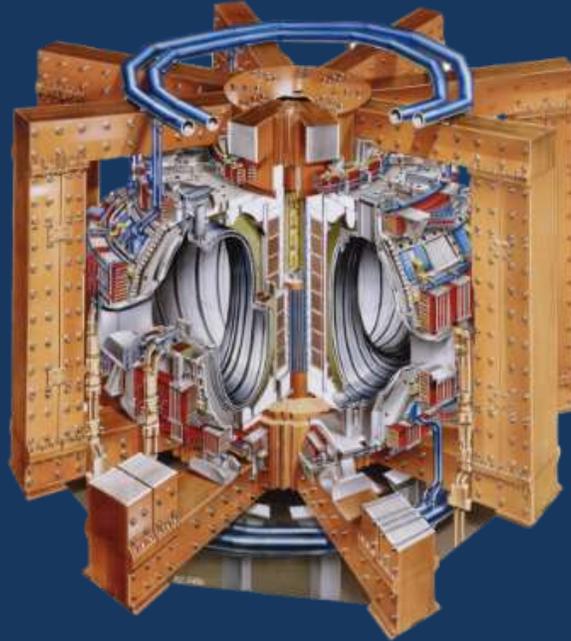
3,5 fois la masse de la Tour Eiffel!

Un paramètre-clé: la taille



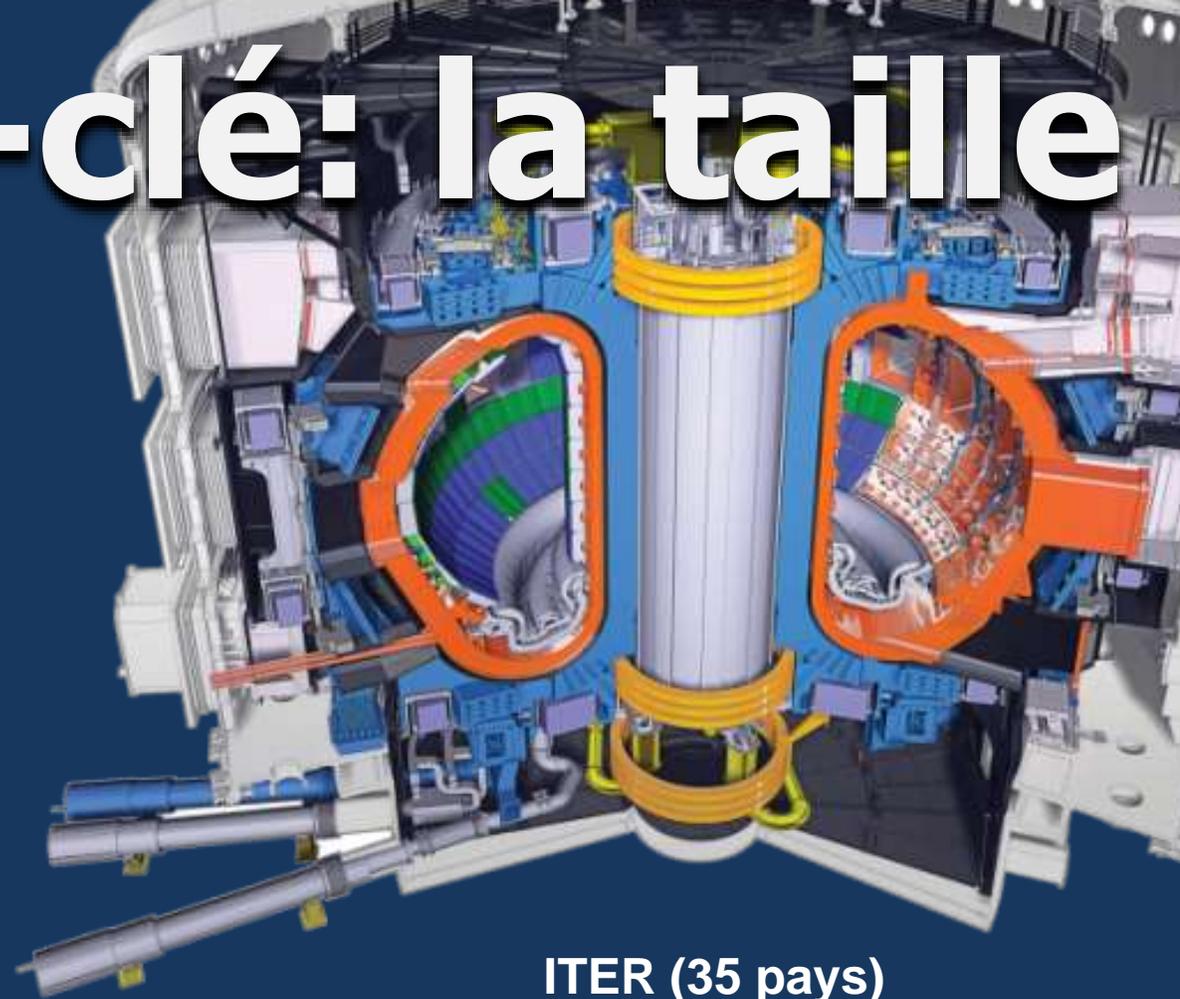
Tore Supra-WEST (France-CEA)

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

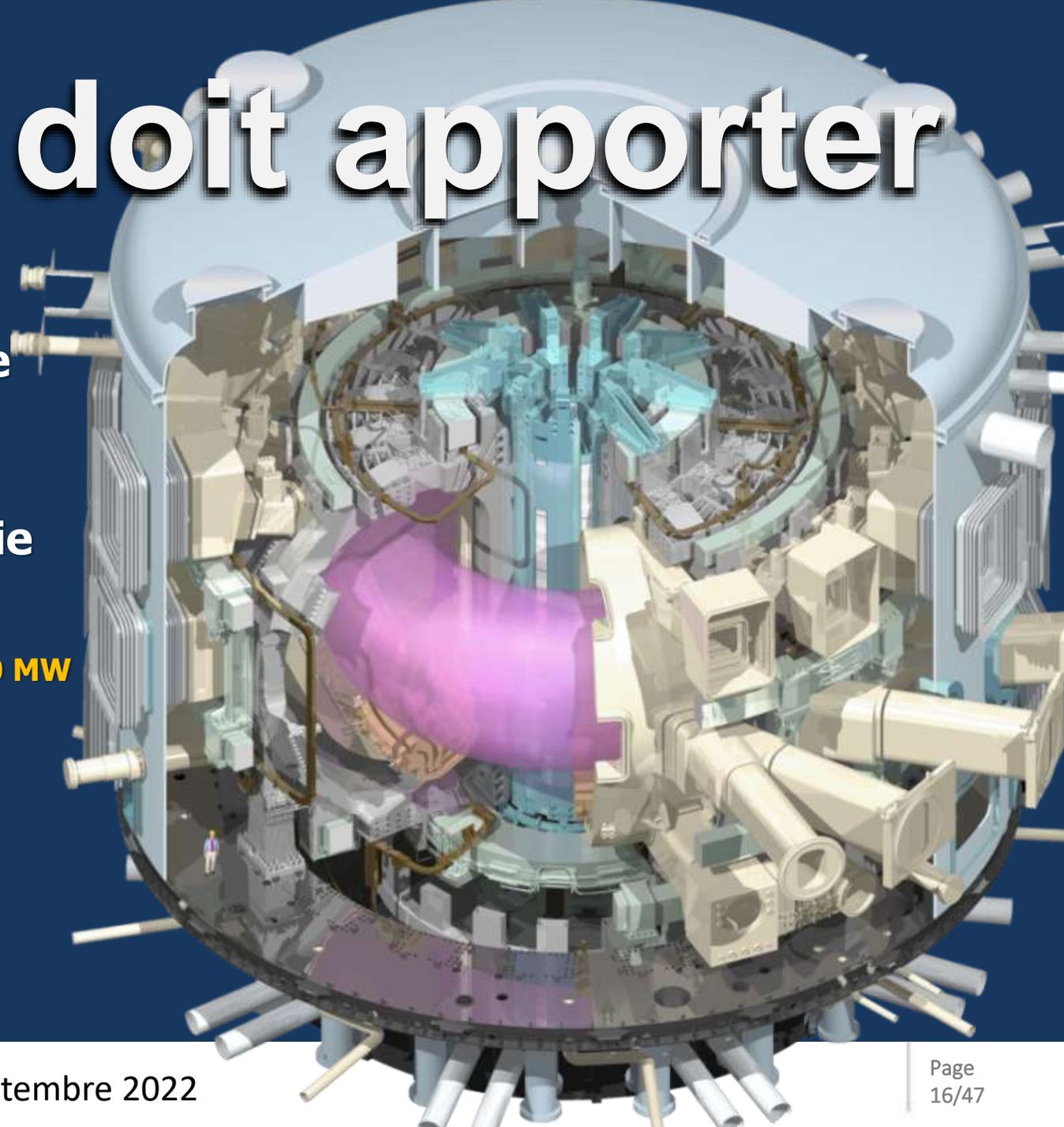
Ce qu'ITER doit apporter

ITER doit démontrer la maîtrise des technologies requises par un réacteur de 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.



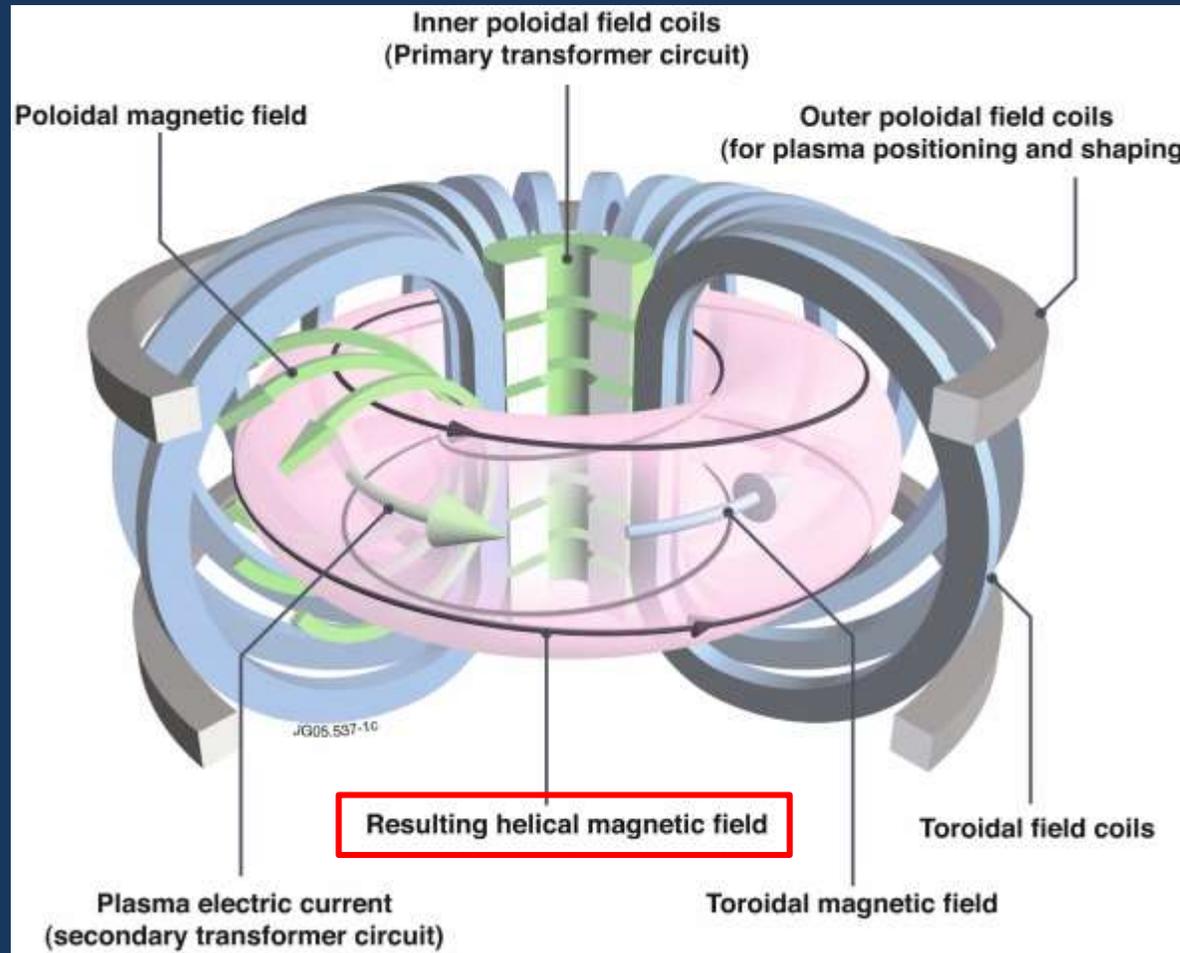
Comment ça marche?

- 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?

Tokamak: Une chambre à vide entourée de puissants aimants

- Le plasma est confiné par un champ magnétique hélicoidal
- Chauffé par des ondes radios et un injecteur de neutres



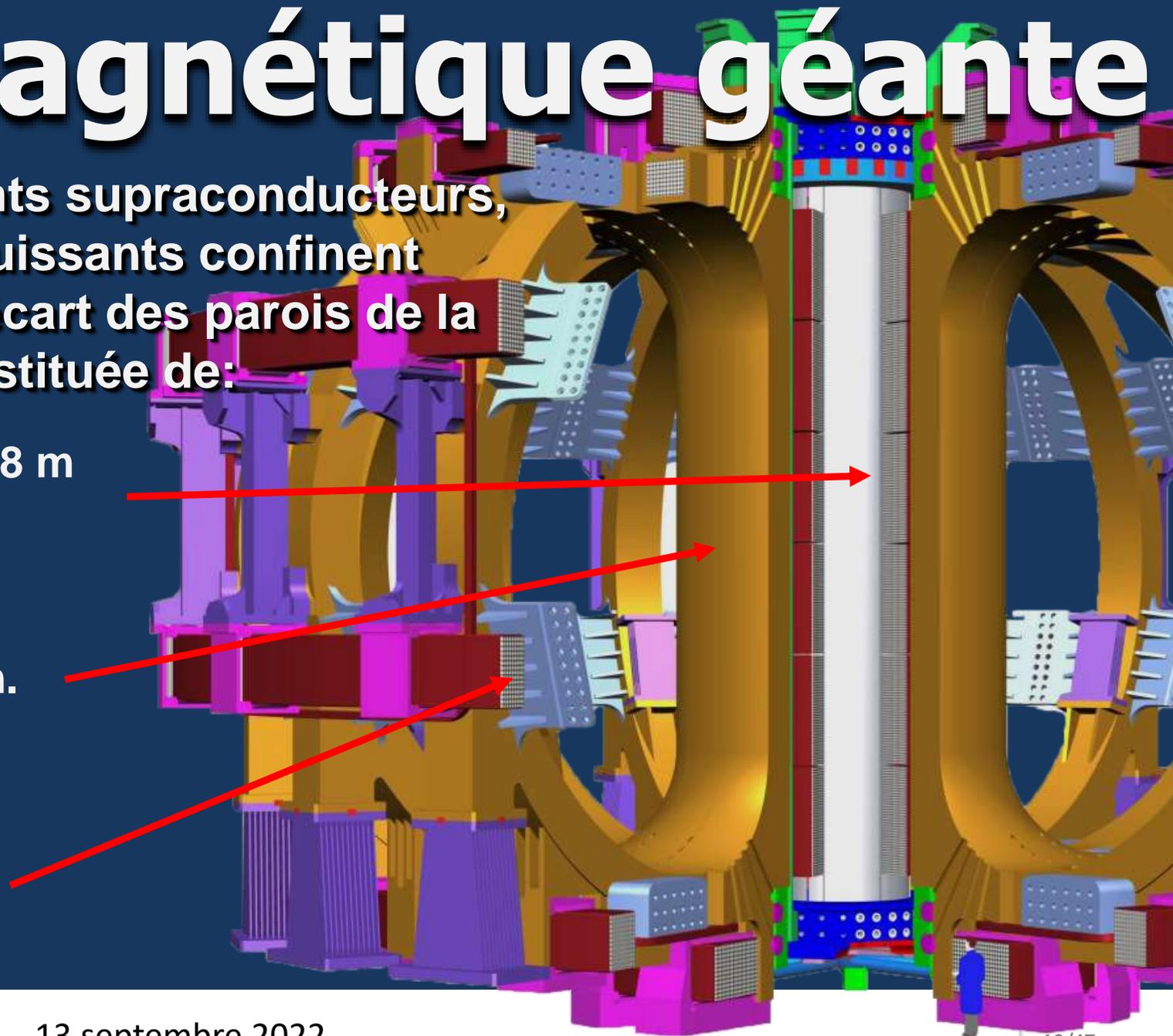
Une cage magnétique géante

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;

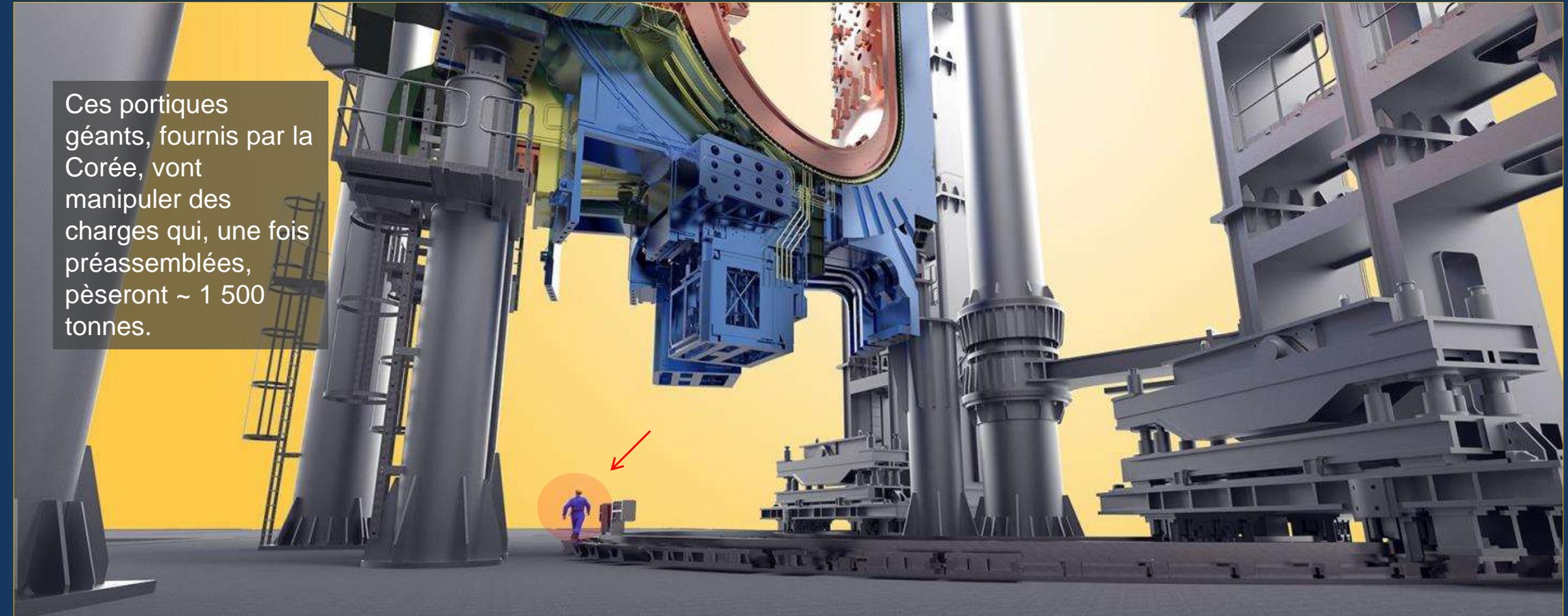
18 bobines de champ toroïdal, 17 m. de haut, 360 tonnes chacune;

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



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



Les 11 et 12 mai 2022, le premier « module » de la chambre à vide (18 mètres de haut, 1 350 tonnes) a été positionné dans le puits d'assemblage avec une précision sub-millimétrique.

Huit ans de progrès

2014 – 2022



Les travaux de génie civil, réalisés par l'Europe, sont finalisés à hauteur de 85%.

Où en est le chantier?



Cylindre supérieur du Cryostat
(stockage de l'hélium)

Atelier du Cryostat

Unité de bobinage

Bât. Préparation
assemblage

Poste électrique 400 kV

Hall d'Assemblage

Évacuation de la chaleur

Unité cryogénique

Conversion électrique

Bâtiment Radiofréquence

Complexe Tokamak

Future salle de contrôle

Zone entreprises

Bâtiment Tokamak

Siège ITER Organization

Future alimentation
Injection de neutres

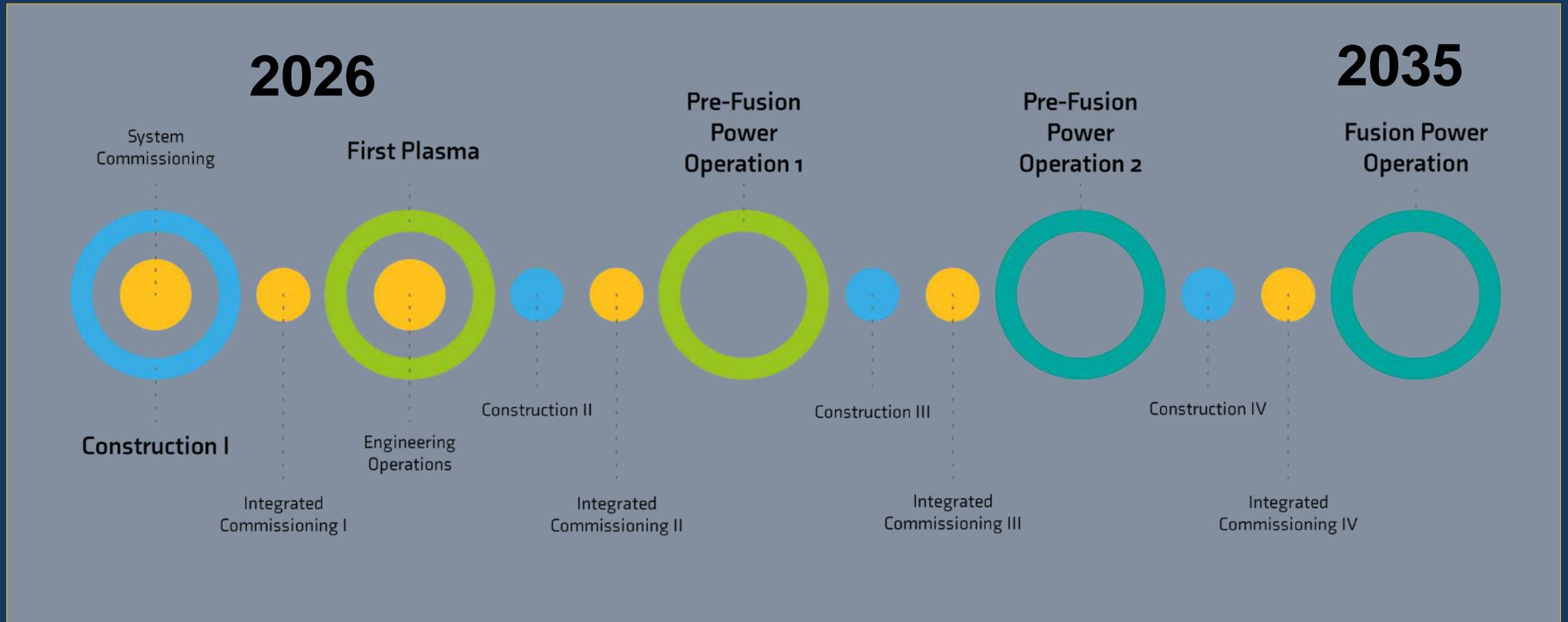
Systèmes électriques

Vers le « Premier plasma » : ~ 77% des tâches réalisées



”L’ensemble des tâches indispensables à la production du Premier Plasma” d’ici 5 ans est réalisé à ~ 77%. Depuis 2016, sauf en 2020-21 (Covid), le taux de progression mensuel moyen est de l’ordre de 0,7 %. Le retard imputable à la pandémie ne devrait pas affecter l’objectif de fonctionnement à pleine puissance à l’horizon 2035.

Une approche par étapes



Dans l'attente d'une évaluation précise des retards liés à la pandémie de Covid-19

Qui fournit quoi?

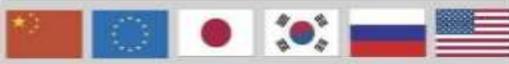
SOLÉNOÏDE CENTRAL



CRYOSTAT



BOBINES DE CHAMP TOROÏDAL (18)



ÉCRAN THERMIQUE



BOBINES DE CHAMP POLOÏDAL (6)



CHAMBRE À VIDE



SYSTÈMES DE CHAUFFAGE (3)



MODULES DE COUVERTURE



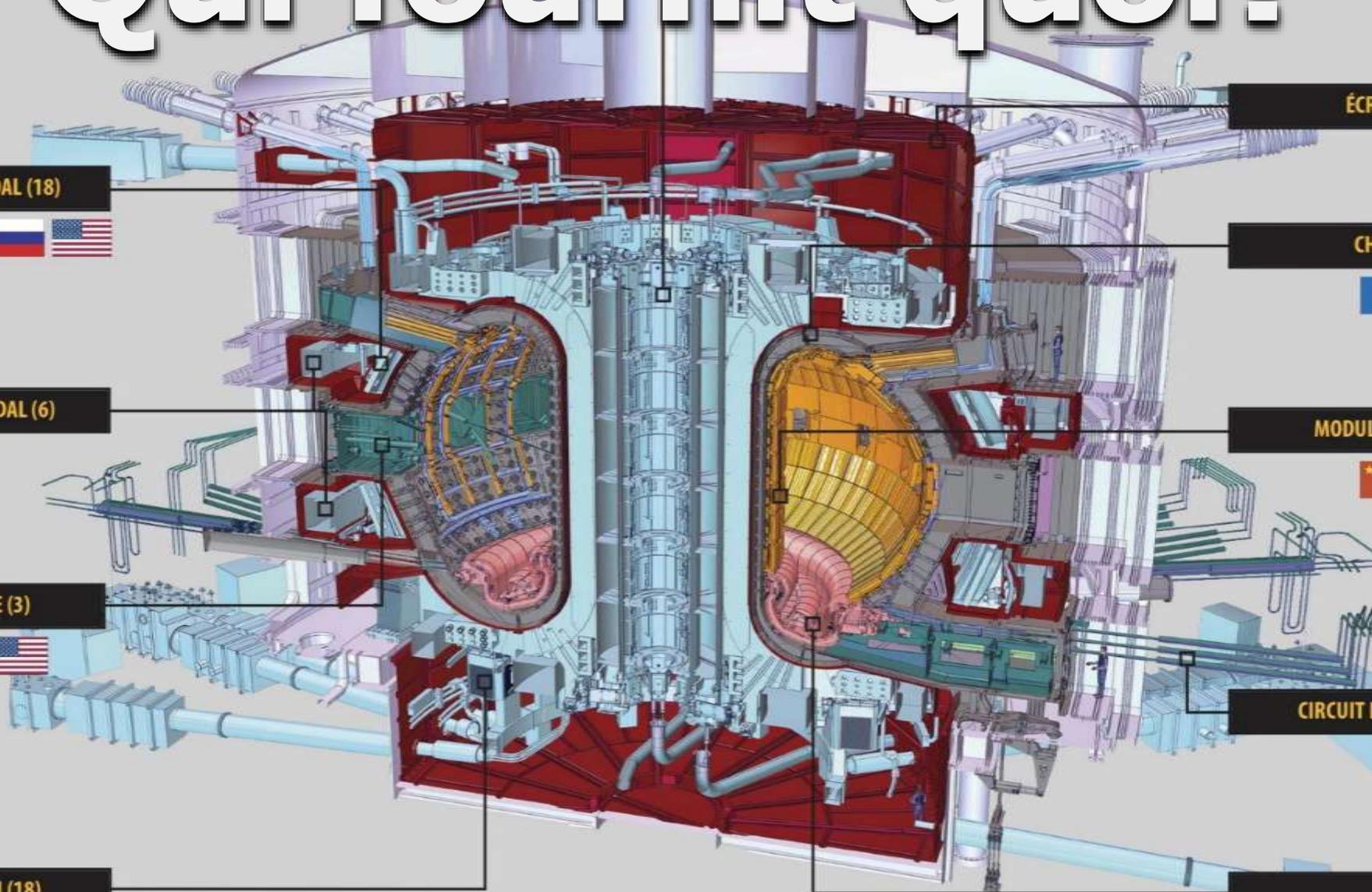
BOBINES DE CORRECTION (18)



CIRCUIT DE REFROIDISSEMENT



DIVERTOR



Fabrications finalisées à 85%



Cinq secteurs de chambre à vide sont en cours de fabrication en Italie. Taux de finalisation de 81% to 99%



L'Europe fournit 10 bobines de champ toroïdal (verticales) sur 19. Huit ont été livrées.



Le 17 décembre 2021, PF2 a été placée en stockage temporaire dans l'attente de son installation. Le retour d'expérience de PF5 a permis de réduire de 12 mois le temps de fabrication.



L'Europe fournit 5 bobines de champ poloïdal (annulaires) sur 6. Quatre d'entre elles (17 et 24 m. de diamètre) sont fabriquées sur site. PF5 mise en place, PF2 terminée, PF3 en cours, PF4 en voie de finalisation.

Fabrications finalisées à 85%



6 bobines livrées



La bobine PF1 est en cours de finalisation



Les 4 sections du cryostat sont finalisées (ici, le "couvercle"). Deux sont en place.



Trois VVS livrés. Un 4^e attendu en novembre 2022



Deux modules du solénoïde central livrés. Les 5 autres sont en fin de fabrication



Livraison en cours de 1 600 tonnes d'équipement destiné à l'alimentation des aimants.

Les livraisons s'accélèrent

Principaux composants livrés en 2020-2021:

- 14 bobines TF (sur 18 + 1)
- 3 bobines PF (sur 6)
- 3 secteurs de chambre à vide (sur 9)
- 2 modules du solénoïde central (sur 6 + 1)



... par l'itinéraire ITER



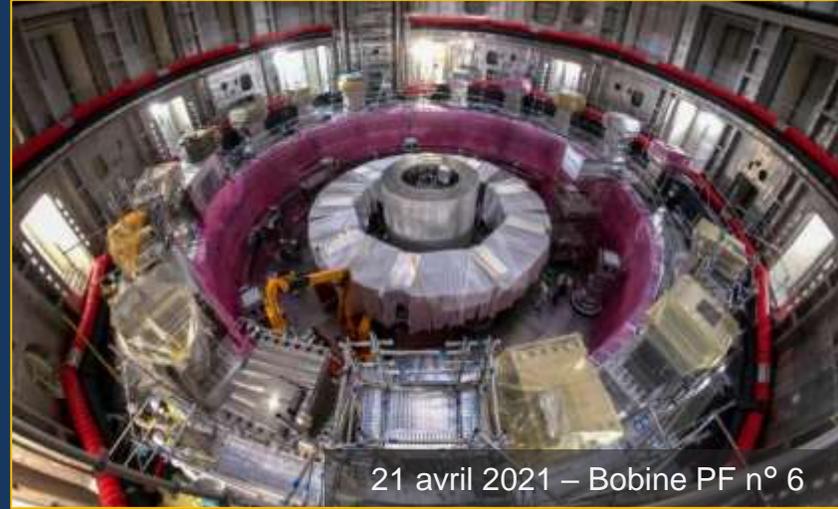
Déchargés au port de Fos-sur-Mer, les composants traversent l'Étang de Berre sur une barge spéciale et empruntent "l'itinéraire ITER", long de 104 km. Le trajet jusqu'au site d'ITER dure de trois à quatre nuits. L'itinéraire ITER a été aménagé par la France (État et CD 13). 110 M€ de travaux réalisés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

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...

L'assemblage progresse



Premier "module" en place



Un « module », ou sous-assemblage, est constitué d'un secteur de chambre à vide de 40° (VVS), deux bobines de champ toroïdal (TF) et une section de bouclier thermique (VVTs).

Poids total ~ 1 350 tonnes, l'équivalent de **quatre Boeing 747 à pleine charge**.

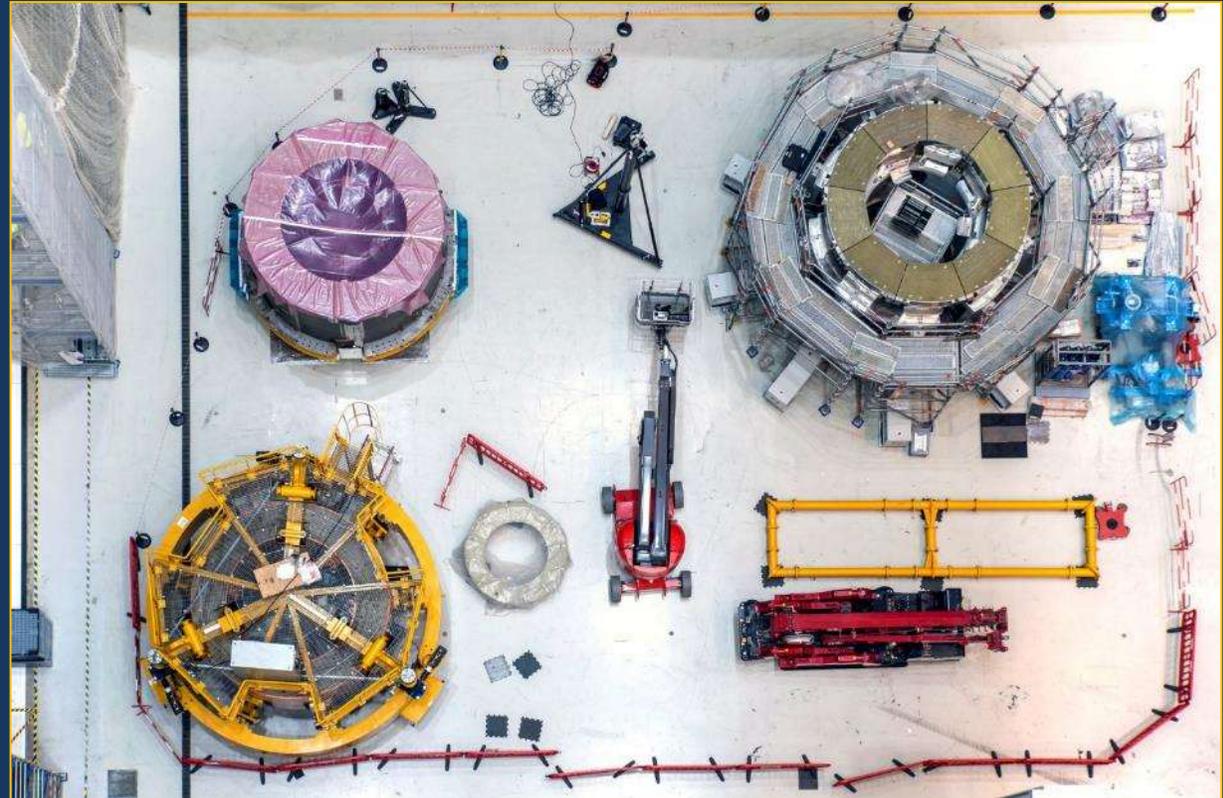
Le premier module a été positionné dans le puits d'assemblage les **11 et 12 mai 2022**.

Au total, 9 sous-assemblages doivent être réalisés pour refermer la chambre à vide sur elle-même.

Préparation pour l'assemblage du solénoïde central



10 février 2022 – Levage du 1^{er} module (CSM) du solénoïde central.



25 avril 2022 – Outil de levage, CSM (enveloppé de plastique rose) et plateforme d'assemblage.

Installation des systèmes



◀ 5,5 km de lignes cryogéniques



◀ Évacuation de la chaleur (1 200 MW)



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



Cryogénie: 5 000 t d'équipements

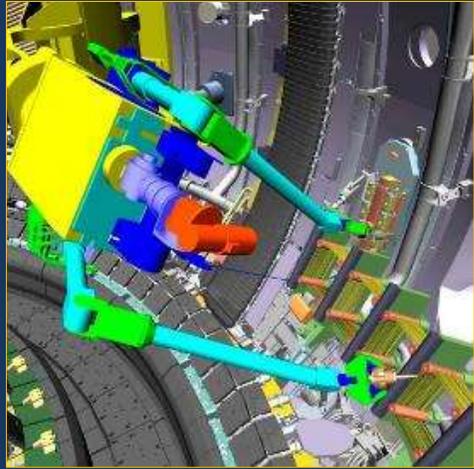


▲ 10 000 km de câbles électriques



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

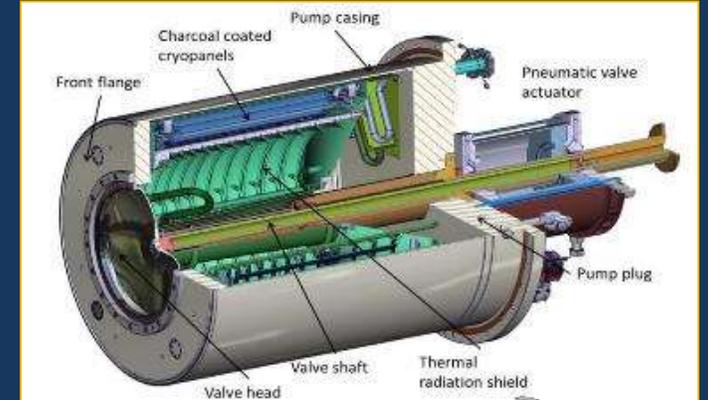
Innovation



Robotique en environnement extrême



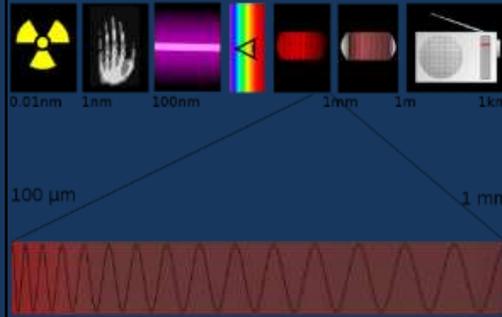
Électronique de puissance



Transmission de signal ultra-haut débit (TeraHertz)



Supraconducteurs



Cryopompes et systèmes sous vide



Filtres de haute-technologie



Emboutissage par explosion



Etc.

Le chantier ITER



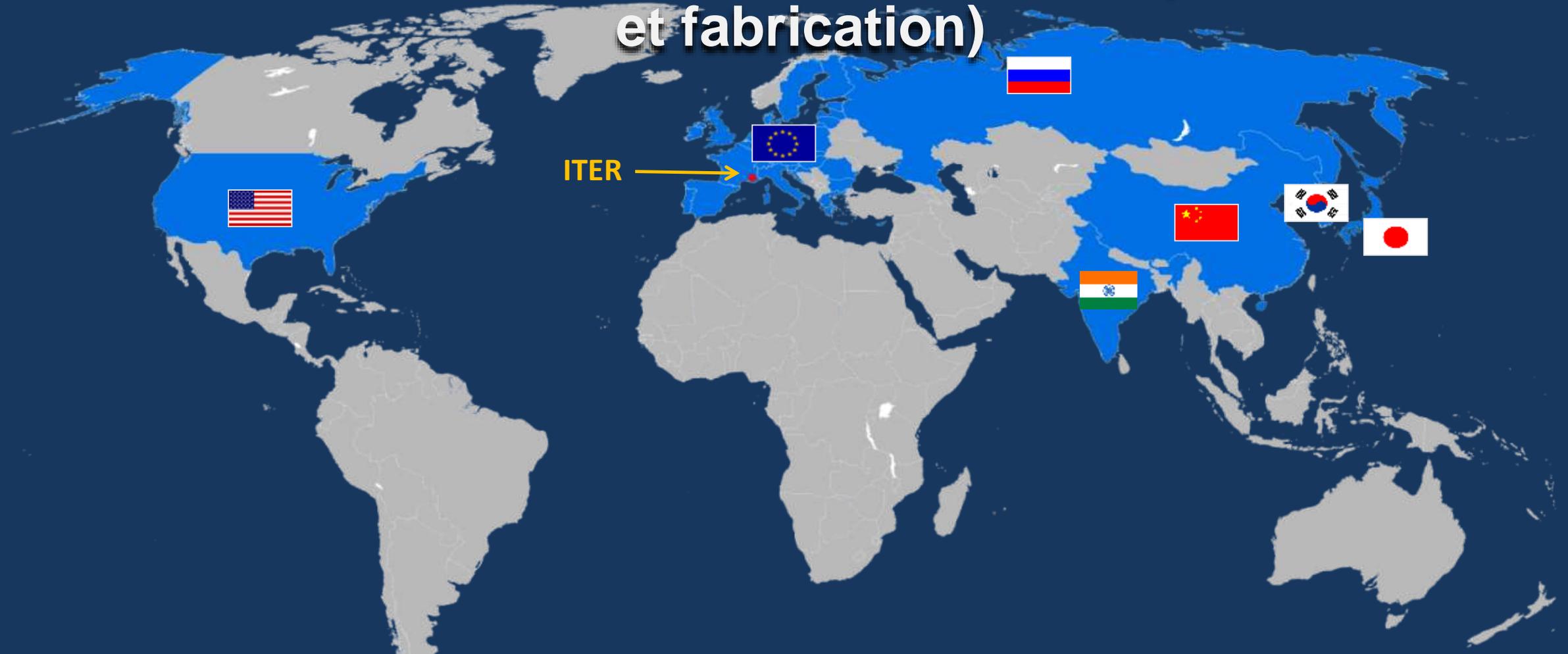
~ 2 500 personnes, jusqu'à 3 000 dans les mois qui viennent.

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

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

Retombées économiques

Plus de 15 milliards d'euros de contrats (construction et fabrication)



Retombées économiques

Construction

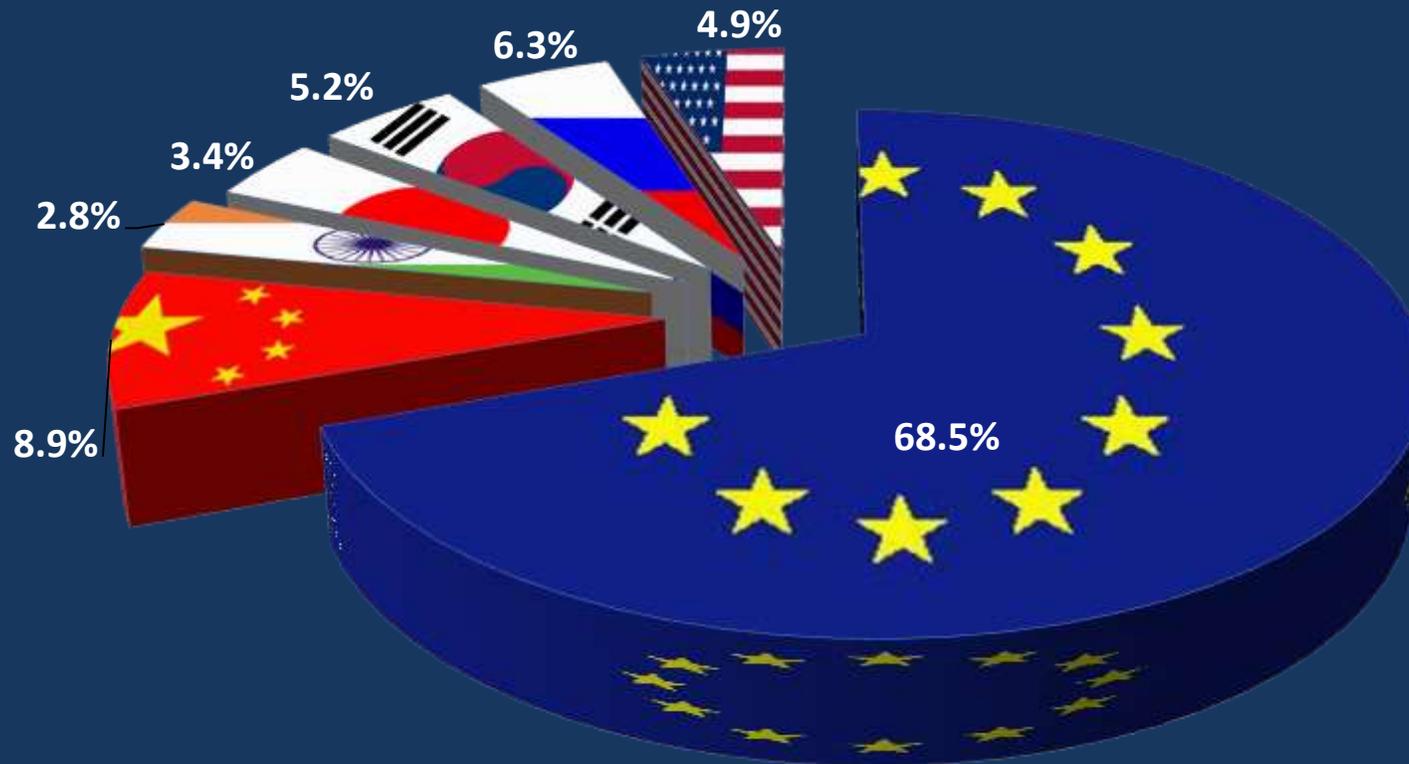


Total des contrats passés depuis 2007

8,3 milliards d'euros (dont génie civil)

Qui travaille pour ITER ?

Distribution par Membre



ITER Organization emploie directement ~ 1 150 personnes issues de 35 nationalités.

Dans le monde entier, le programme ITER mobilise plus de 3 000 scientifiques, ingénieurs, techniciens, etc.

Quel coût?

L'Europe importe ~ 58% de son énergie (charbon, pétrole, gaz) pour un total de 350 milliards € annuellement (dont ~ 110 milliards € de Russie).

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

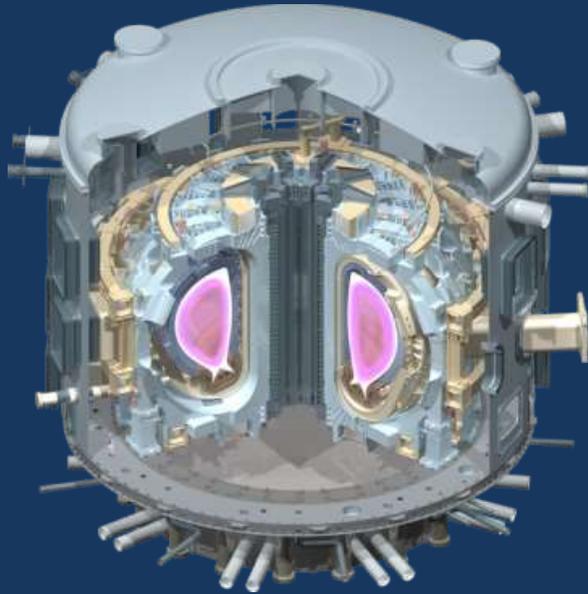
8,2 milliards € (valeur 2018)
12,5 milliards € (estimation)
300 millions €/an

Phase de mise à l'arrêt
Phase de démantèlement

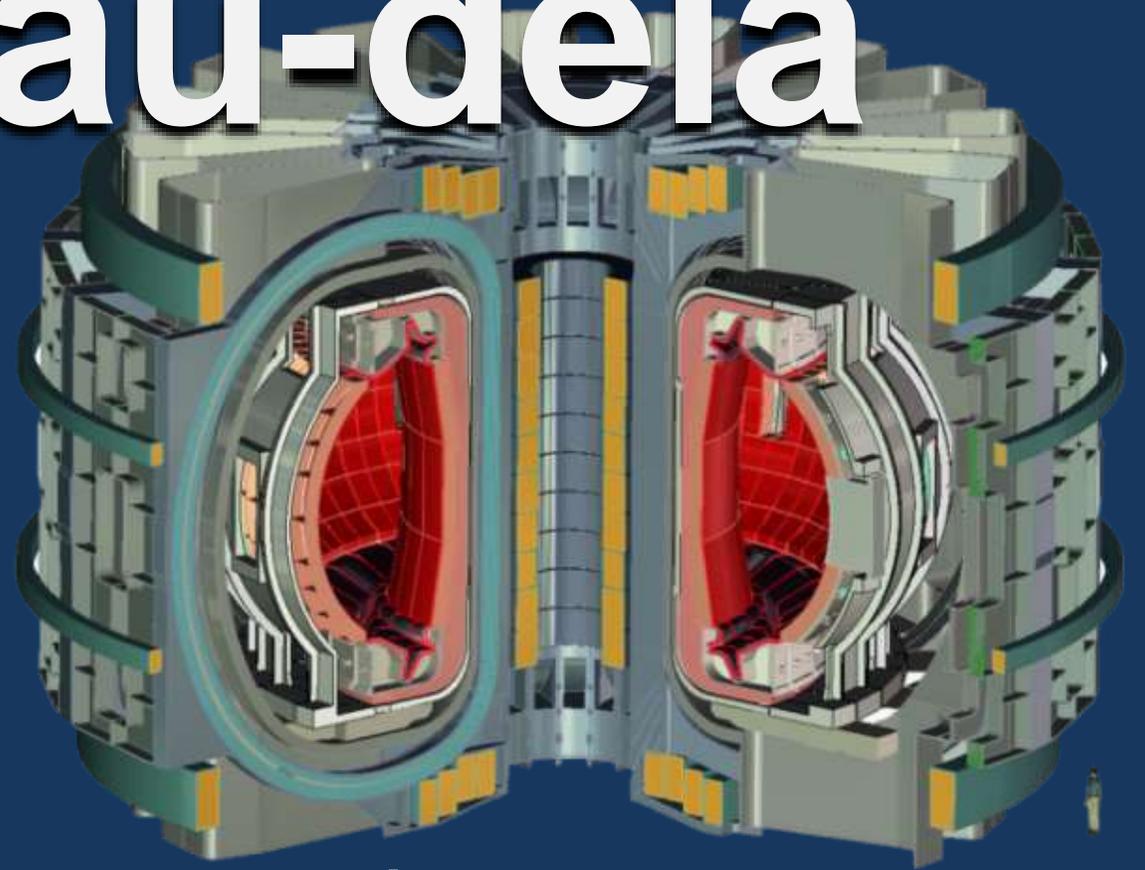
281 millions € (valeur 2001)
530 millions € (valeur 2001)

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

Les initiatives privées

Le développement récent d'initiatives privées, principalement dans le monde anglo-saxon et parfois associées au monde universitaire, renforce la crédibilité de l'énergie de fusion.

En explorant des voies souvent originales, certaines de ces *start-ups* contribuent à la connaissance fondamentale autant qu'au développement technologique.

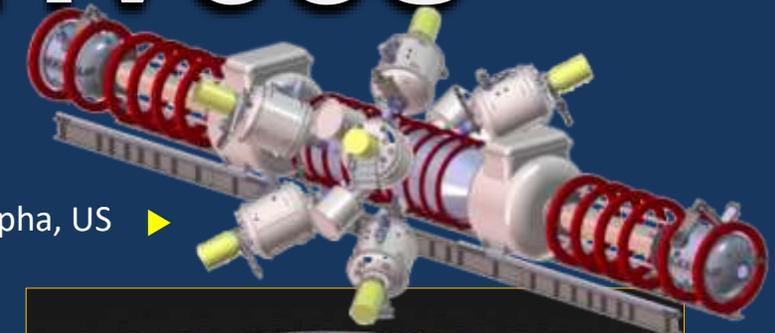
ITER et la communauté de fusion sont attentifs à ces développements qui ne peuvent que bénéficier au progrès de la connaissance.

Mais les lois de la physique s'imposent partout et à tous, et certains projets, certaines annonces, manquent de crédibilité.

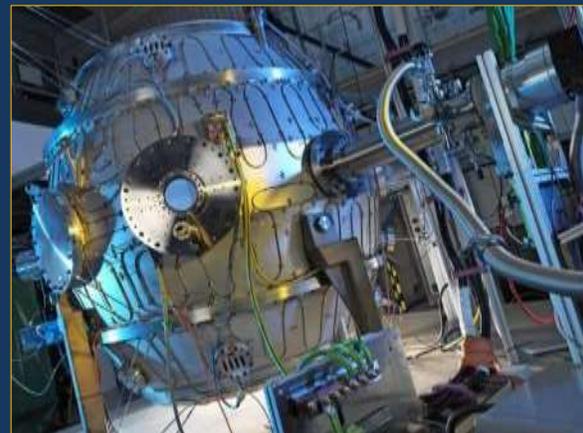


General Fusion, Canada

Commonwealth Technologies, US ▶



Tri Alpha, US ▶



TAE Technologies, US ▶

◀ Tokamak Energy, UK



Premier plasma d'ici \sim 5 ans Plaine puissance dix ans plus tard

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