Vers l'énergie du futur

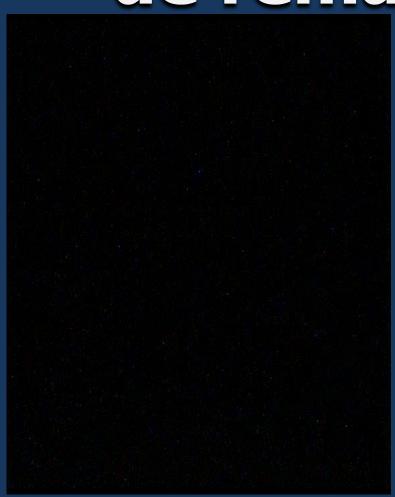


Une collaboration scientifique sans équivalent dans l'histoire

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

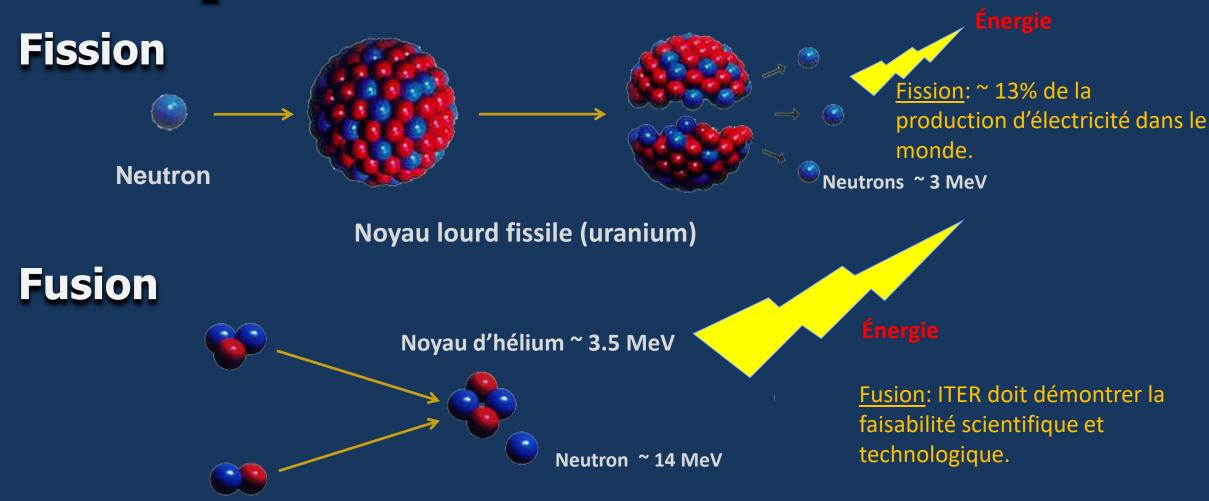


Fusion de l'hydrogène: de remarquables atouts



- Une source d'énergie massive, potentiellement 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 JET (Eurofusion UKAEA)

Séparer... ou réunir?



Noyaux légers (isotopes D & T de l'hydrogène)



La fusion dans l'Univers

- 1920-1930: Mise en évidence des réactions thermonuléaires 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.
- 1950: premiers travaux de recherche pour une utilisation pacifique des réactions thermonucléaires

$\Delta E = \Delta mc^2$

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, n + 14.1 MeV

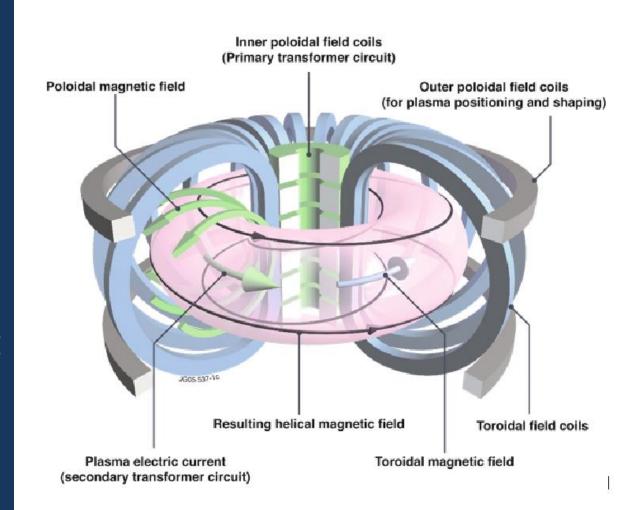


0.7 MeV

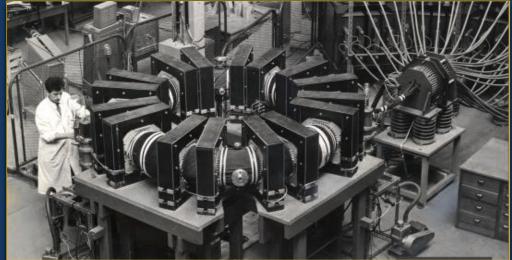
4He + 3.5 MeV

Le principe du tokamak

- Une bouteille magnétique pour contenir un plasma à 150 millions de °C.
- Des bobines pour créer un champ magnétique intense (5 T)
- Un fort courant (15 MA) circulant dans le plasma pour confiner les particules.



65 ans de progrès

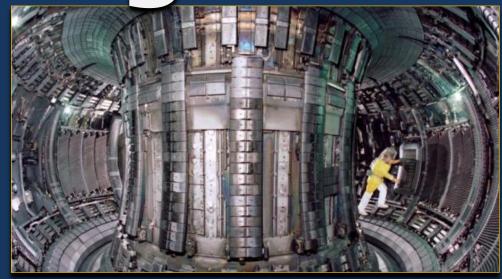


TA-2000, France, 1957

> JET, Euratom, 1983présent (Opérations DT)

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

> Tore Supra, CEA-Euratom 1988-présent (devient WEST, banc d'essai d'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). Début de la constrution août 2010.



Aujourd'hui

Le rythme de progression des travaux (construction et fabrications) est conforme à la "feuille de route" (baseline) définie en 2016. Génie civil finalise à près de 80%



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. Programme ITER





Letokamak 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.

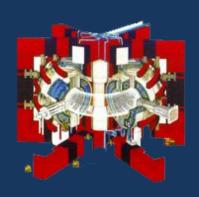
Etc.

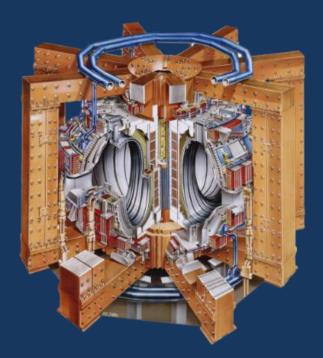
Total ~ 23 000 t.



3,5 fois la masse de la Tour Eiffel!

Un paramètre-clé: la tai







25 m³ **V**_{plasma}

~0 P_{fusion}

P_{chauffage} ~15 MW

~400 s T_{plasma}

JET (Europe)

80 m³ V_{plasma}

~16 MW P_{fusion}

P_{chauffage}~23 MW

T_{plasma} ~30 s

ITER (35 pays)

830 m³ V_{plasma}

~500 MW P_{fusion}

P_{chauffage} ~ 50 MW

 $T_{\text{plasma}} > 400 \text{ s}$



Ce qu'ITER doit apporter

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

Une fois "allumé", le plasma deutériumtritium 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 ca 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.

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



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

Les aimants de niobiumétain ou niobium-titane sont refroidis à 4,7K (- 269 °C) par un flux d'hélium supercritique.



Les dimensions de la construction navale...



... 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.



Sept ans de progrès

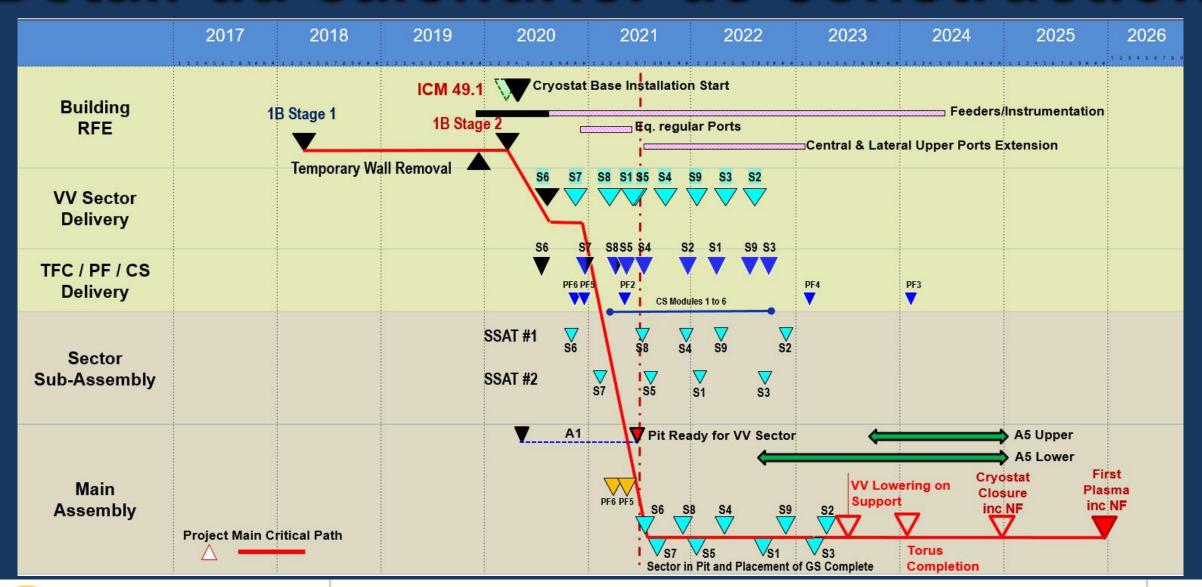
Avril 2014 - Mai 2021





Les travaux de génie civil, réalisés par l'Europe, sont finalisés à hauteur de 80%.

Détail du calendrier de construction





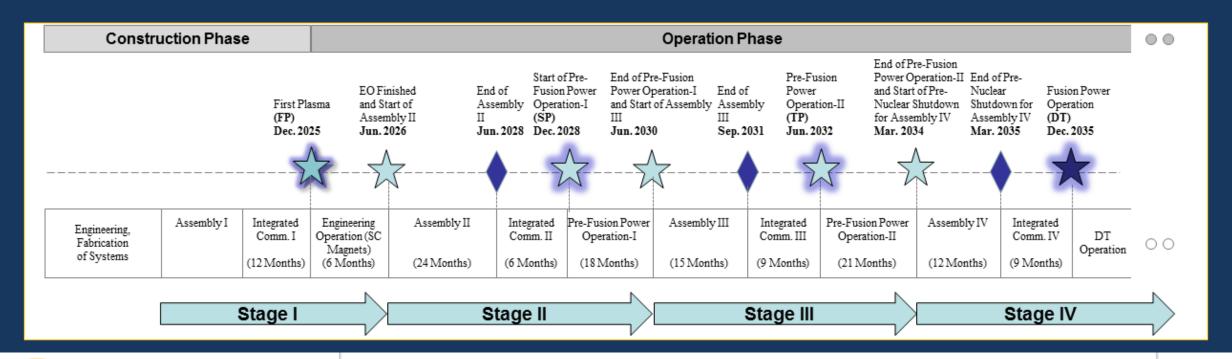


"L'ensemble des tâches indispensables à la production du Premier Plasma" d'ici 5 ans est réalisé à > 75%. Depuis 2016, sauf 2020, le taux de progression mensuel moyen est de l'ordre de 0,7 %.



Vers la pleine puissance

- ✓ Le calendrier et le budget prévisionnel d'ici au Premier Plasma prend en compte les contraintes budgétaires des Membres d'ITER;
- ✓ L'approche en quatre étapes vers les opérations à pleine puissance (2035) prend en compte les contraintes budgétaires et techniques des Membres d'ITER.

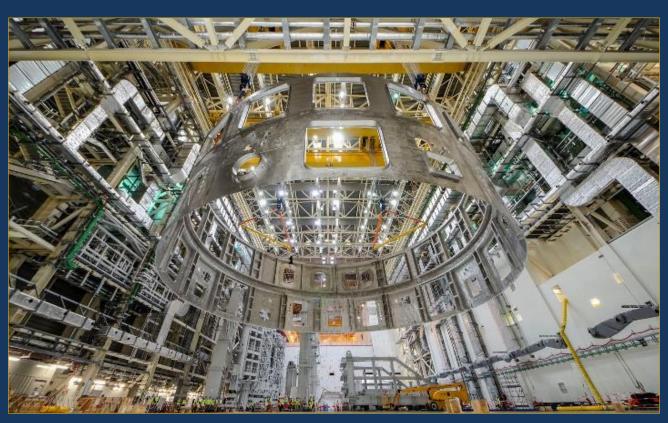


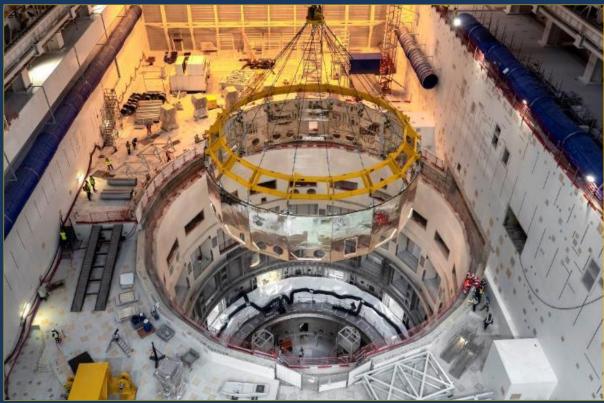


La phase d'assemblage est en cours Les 26 et 27 mai 2020, la base du Cryostat (1 250 t) a été insérée dans le puits d'assemblage du Tokamak...



Des opérations majeures





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

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



Des opérations majeures







...et deux semaines plus tard, la première des 6 bobines annulaires était positionnée dans la fosse d'assemblage.

Le 15 juin, la première bobine verticale (TF12) était positionnée dans le portique de pré-assemblage.



Vers le premier "pré-assemblage"



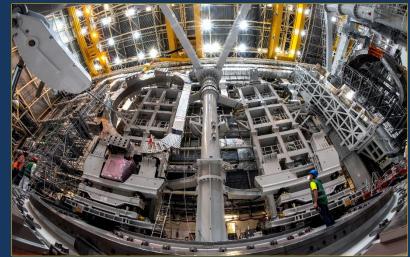
Un « pré-assemblage » est constitué d'un secteur de chambre à vide (VVS), deux bobines de champ toroïdal (TF) et une section de bouclier thermique (VVTS).



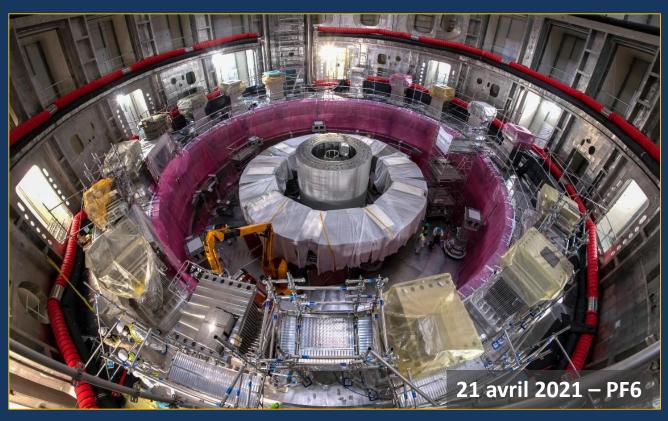
TF n°12 et n°13 (Japon) seront associées au secteur de chambre à vide n° 6. TF12 a été temporairement installée dans le portique n°1.

Segment d'écran thermique dans un portique de pré-assemblage (SSAT).

Avec l'installation du secteur de chambre à vide n° 6 dans le portique de pré-assemblage le 26 mars 2021, ITER va pouvoir procéder au premier des 9 « pré-assemblages » qui constituent le cœur du Tokamak.



Deux bobines PF (sur 6) en place





Le tokamak ITER prend forme, progressivement, dans le puits d'assemblage. Deux des six aimants annulaires (10 et 17 m de diamètre) sont en place, ainsi que les supports destinées aux 18 aimants verticaux. Installation des systèmes



5,5 km de lignes cryogéniques



électriques de toute nature



Évacuation de la chaleur (1 200 MW)

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

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







Les livraisons s'accélèrent

Principaux composants livrés en 2020-2021:

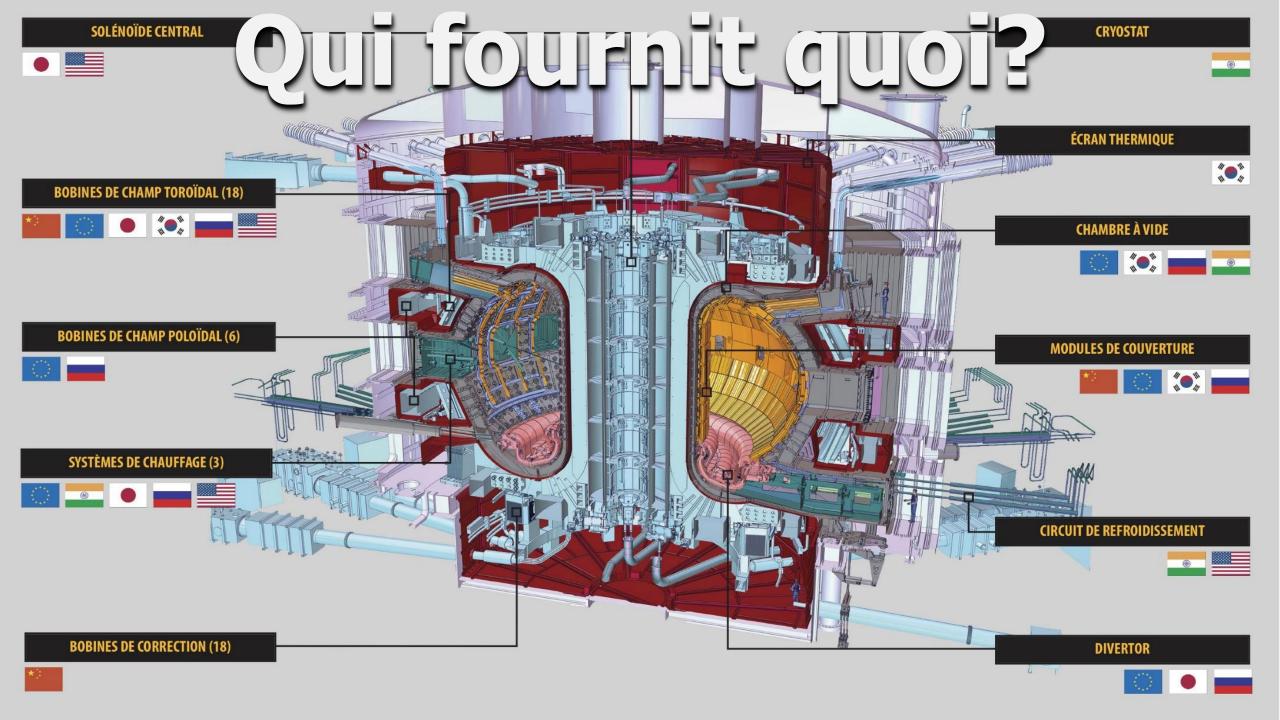
- 10 bobines TF (sur 18)
- 2 bobine PF (sur 6)
- 2 secteurs de chambre à vide (sur 9)
- 2 modules du solénoïde central (sur 7)





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.





Fabrications finalisées à 85%





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. Quatre d'entre elles ont été livrées sur site.



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 70 à 95%.

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. (Ici, PF5 est placée en stockage temporaire.)





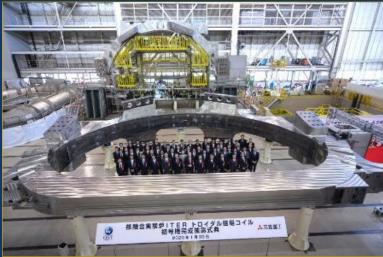


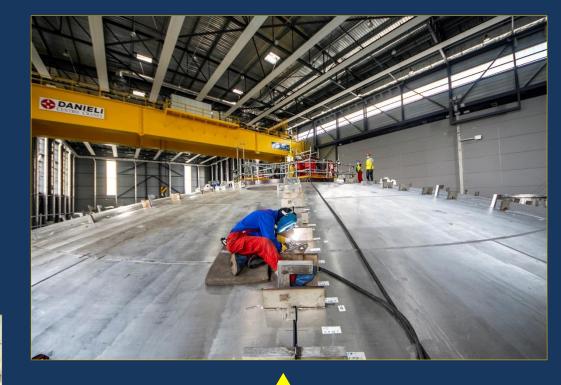
Fabrications finalisées à 85%



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 et la quatrième (TF8), le 12 mars 2021





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 en cours de soudage.

Fabrications finalisées à 85%







La Corée est responsable de la construction de 4 des

9 secteurs de la chambre à vide. Le premier a été livré et équipé, le second est attendu à ITER au mois d'août.
Les deux autres sont en cours de finalisation.





Le premier des six modules du solénoïde central (plus une rechange) a quitté l'usine et s'apprête à prendre la mer pour être livré à ITER dans les semaines qui viennent. Les six autres abordent les dernières étapes de la fabrication dans les ateliers de General Atomics près de San Diego en Californie.



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 mise en place peu avant la fermeture du cryostat.

La contribution de la France





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).



Une forte implication des collectivités territoriales

En 2002, les collectivités territoriales de la région PACA se sont engagées à soutenir financièrement le programme ITER. Au total, sur dix ans, elles apportent 467 millions d'euros au programme ITER:

Région Paca: 152 M€

Bouches-du-Rhône: 152 M€

Com. Pays d'Aix: 75 M€

Var: 30 M€

Vaucluse: 28 M€

Alpes-Maritimes: 15 M€

Alpes-de-Haute-Provence: 10 M€

Hautes-Alpes: 5 M€



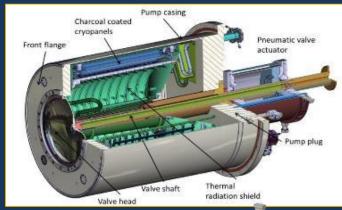
Innovation



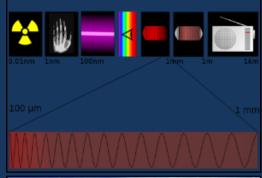
Robotique en environnement extrême



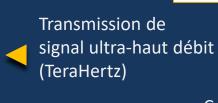
Électronique de puissance



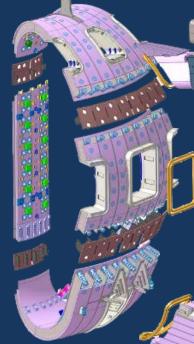
Supraconducteurs



Emboutissage par explosion







Filtres de haute-technologie



Etc.

Retombées économiques

Plus de 12 milliards d'euros de contrats (construction







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

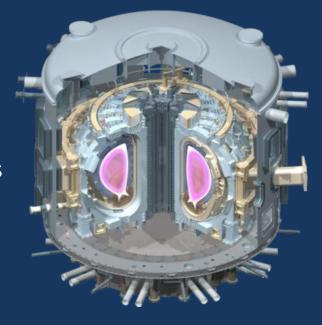


- La réaction de fusion est intrinsèquement sûre.
- Il n'y a jamais plus d'un gramme de combustible en réaction dans la chambre à vide.
- La moindre perturbation met fin au plasma.
- L'emballement de la réaction et la fonte du coeur sont physiquement impossibles.
- En cas de perte d'alimentation électrique, 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).

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

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: ~ 2055-2060: L'industrie pourrait envisager de Phase d'industrialisation lancer la construction des À partir de ~ 2060: premières centrales de fusion. Vers un mix énergétique 50-60% fusion/fission, 40-50% renouvelables



Page

44/49



