

ITER

**Une collaboration scientifique sans équivalent dans l'histoire
pour démontrer la faisabilité de l'énergie de fusion**



Robert ARNOUX - Communication, ITER Organization

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 désormais le principal vecteur de développement des sociétés humaines.

Peu d'options...

Fossiles: épuisement inéluctable à une échéance plus ou moins proche; d'ici là, développer la capture et le recyclage/stockage du CO₂.

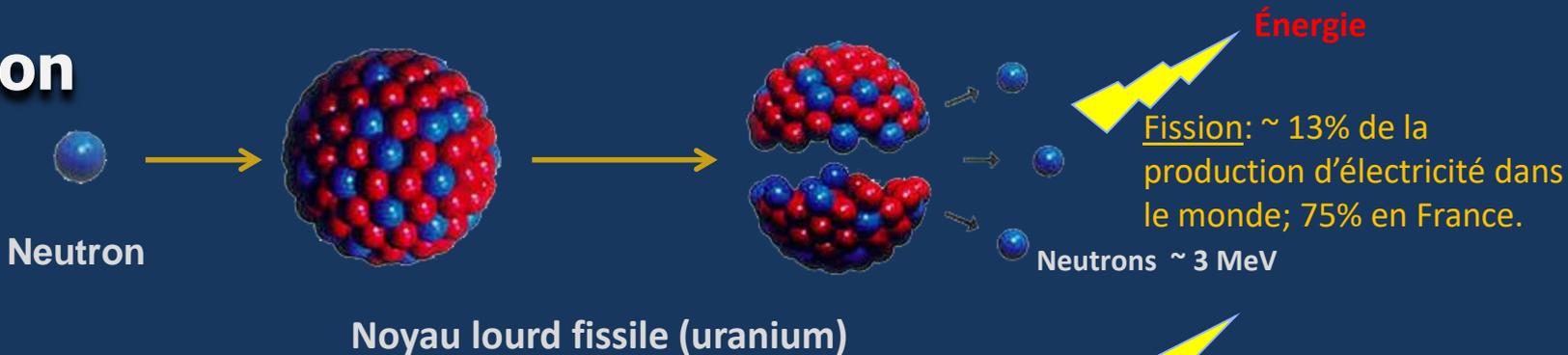
Renouvelables: développer leur usage et rechercher des ruptures technologiques dans la production et le stockage

Fission nucléaire: enjeux de sûreté et contraintes de la gestion des déchets à vie longue

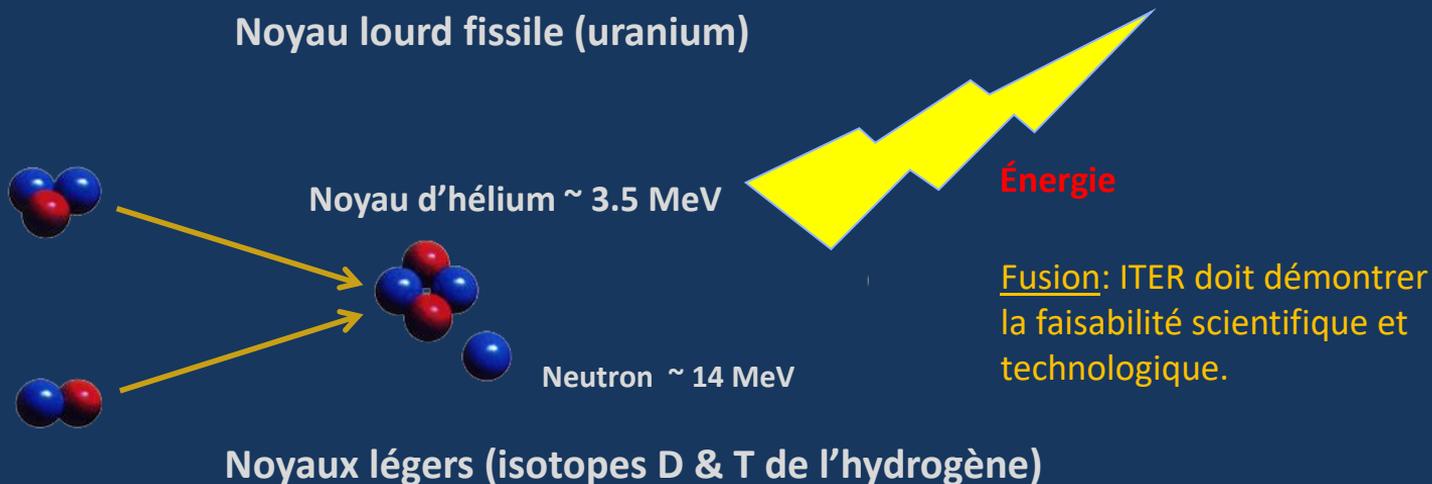
Fusion: doit apporter la démonstration de sa faisabilité scientifique et technique

Le nucléaire: séparer... ou réunir?

Fission



Fusion



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.
- 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 magnétique

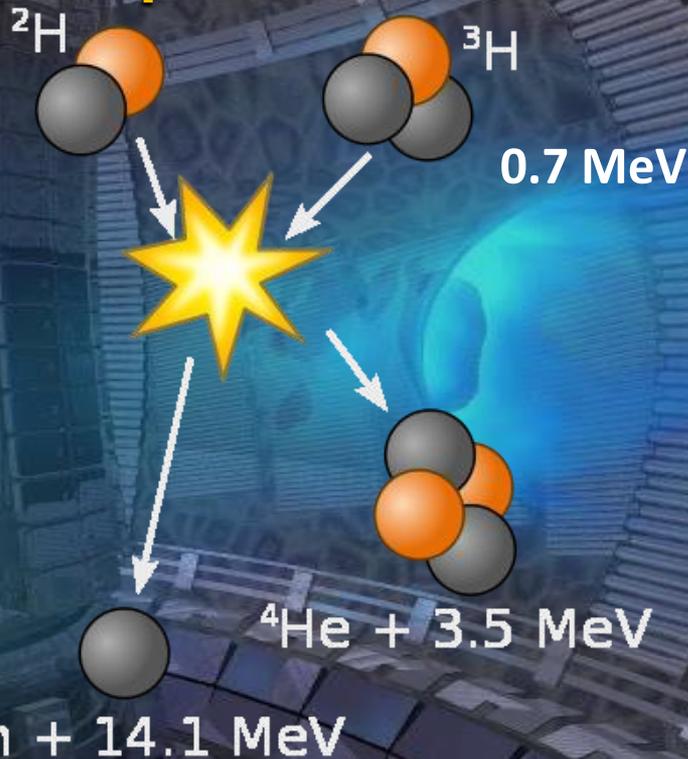
1 gramme de DT = 8 tonnes de pétrole

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.

Dans la chambre à vide d'un tokamak un plasma très peu dense, confiné par d'intenses champs magnétiques, est porté à très haute température (150 millions de °C).



* *Acronyme russe: Chambre toroïdale, bobines magnétiques*

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 kilowattheures d'électricité.

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

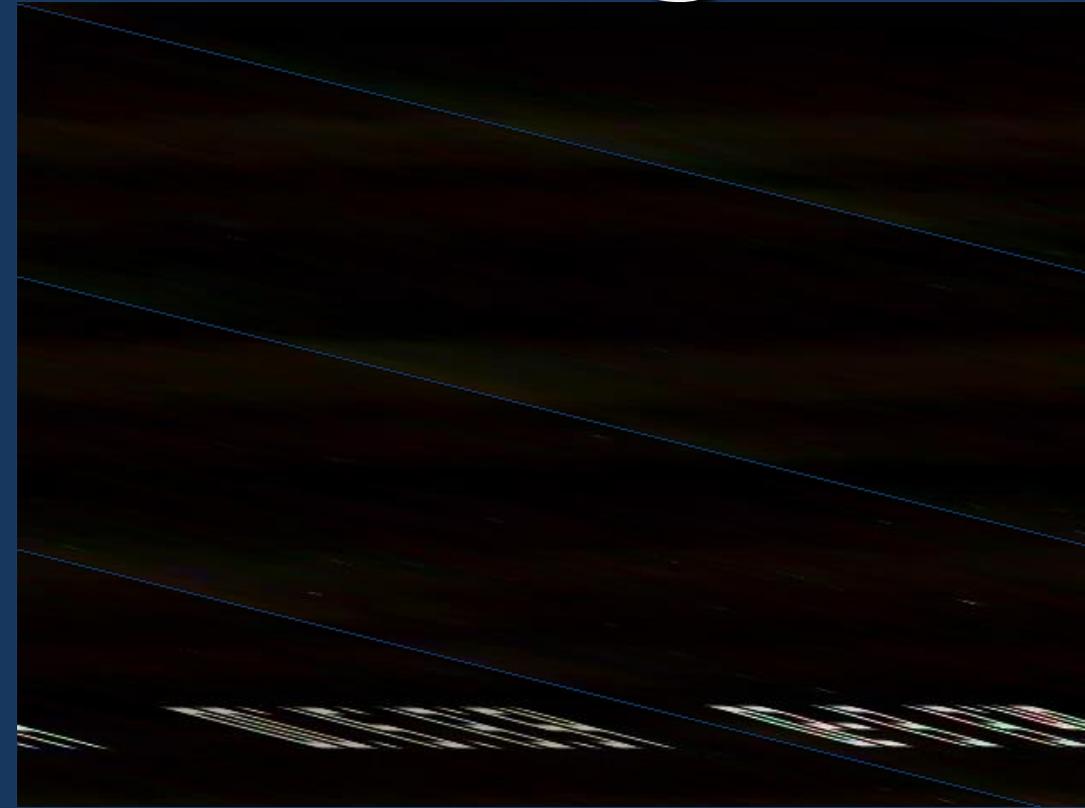
- Deutérium: 33 mg/m³ – techniques d'extraction industrielle maîtrisées;
- Tritium: ITER expérimentera la production de tritium dans l'enceinte même de la machine par interaction neutron-lithium (modules tritigènes).

Avantages de la fusion

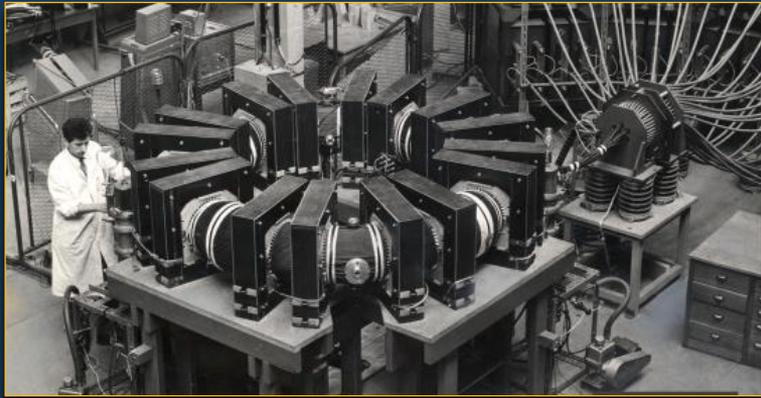
- Une source d'énergie massive, potentiellement continue, programmable dans le temps, pratiquement inépuisable et universellement répartie.
- Un combustible virtuellement inépuisable
- Une technologie intrinsèquement sûre.
- Un impact très limité sur l'environnement, sans production de gaz à effet de serre.
- Pas de risque de prolifération.
- Pas de déchets de haute activité à vie longue.



Un plasma dans le tokamak WEST (CEA-Cadarache)

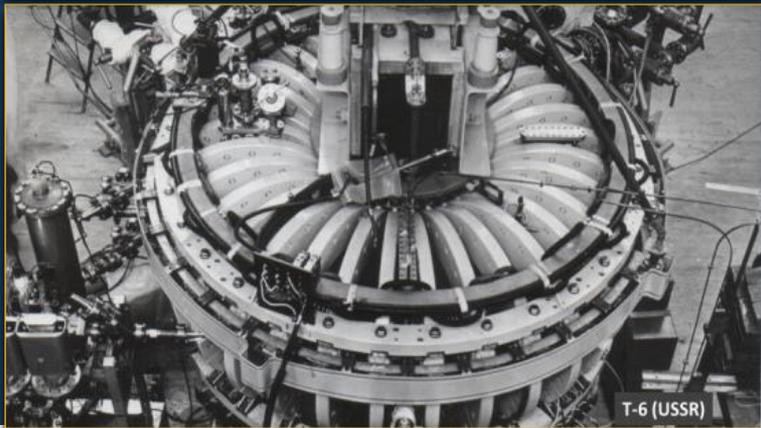
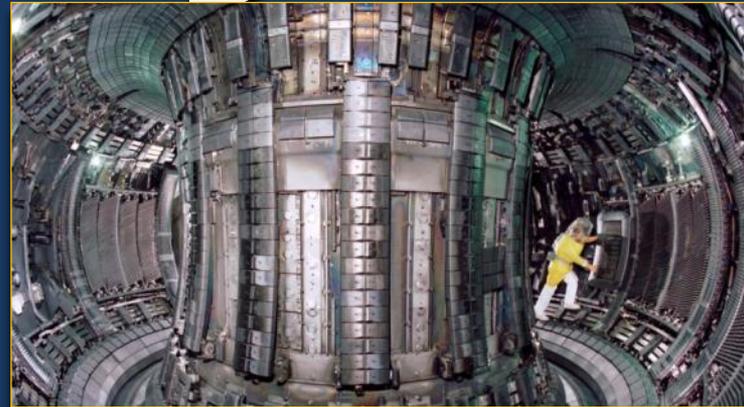


60 ans de progrès



TA-2000,
France,
1957

JET, Euratom,
1983-présent
(Opérations DT)



T-6, URSS,
1965

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



La fusion démontrée

JET JOINT EUROPEAN TOKAMAK

PRESS RELEASE

JET ACHIEVES FUSION POWER

At 7.44 pm today, Saturday 9th November 1991, between 1,500,000 and 2,000,000 watts of power from nuclear fusion reactions were generated at the JET (Joint European Torus) collaborative European Community project based at Abingdon, Oxfordshire, UK.

The Director of JET, Dr Paul-Henri Rebut, announcing the successful experiment said "this is the first time that a significant amount of power has been obtained from controlled nuclear fusion reactions. It is clearly a major step towards the development of fusion as a new source of energy".

Today's experiment was the first occasion in which the correct fusion fuels, deuterium and tritium, have been used in any magnetic confinement fusion experiment. Previously the experimental performance had been such as to justify only the use of deuterium fuel in which the fusion reaction rate is much slower. Since the start of operation in 1983 JET's performance has progressively approached reactor conditions. The planned operation with the correct mix of the reactor fuels - a 50/50 mixture of deuterium and tritium - is being approached in a stepwise manner, with the first step being the present experiment at low tritium concentrations and concluding in 1996 at full power operation with 50% tritium.

In today's experiment the deuterium and tritium gas was heated to temperatures of around 200 million degrees Celsius - nearly more than 10 times hotter than the temperature in the centre of the sun. The peak fusion power generated reached almost 2,000,000 watts in a pulse lasting for two seconds and giving a total energy release equivalent to a megawatt for two seconds. At lower power in deuterium JET has already maintained stable conditions in the apparatus for periods up to 1 minute.

JET is a collaborative venture involving all countries of the European Community, together with Switzerland and Sweden. As the world's largest fusion device, JET has achieved separately all individual parameters required in a reactor. The data obtained from JET has laid a firm foundation for the proposed experimental reactor ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), which is planned to be carried out as a world-wide collaboration involving the United States, Japan, Soviet Union and the European Community.

"The hard work and dedication of all the JET staff over many years, together with the support of all the European Nations who are members of the Joint Undertaking have today achieved a significant milestone for the world of fusion research. These experiments are a significant contribution towards the design of the experimental fusion reactor ITER."

Dr. Rebut continues that with the additional information from the planned JET experiments it will be able to design the experimental fusion reactor ITER at 500 megawatts of thermal power.



Parmi les grands tokamaks construits dans les années 1980, deux étaient conçus pour les opérations deutérium + tritium: le JET européen et le TFTR américain. Tous deux ont produit une puissance de fusion significative: : JET en 1991 (2 MW) et 1997 (16 MW); TFTR en 1993 (6.2 MW) et 1994 (10 MW). Mais dans les deux cas, on avait injecté plus d'énergie pour « allumer le feu » que le feu n'en a restitué (ratio de ~ 0.65). ITER vise un ratio de 10, soit 50 MW de chauffage ► 500 MW de puissance produite.

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* »

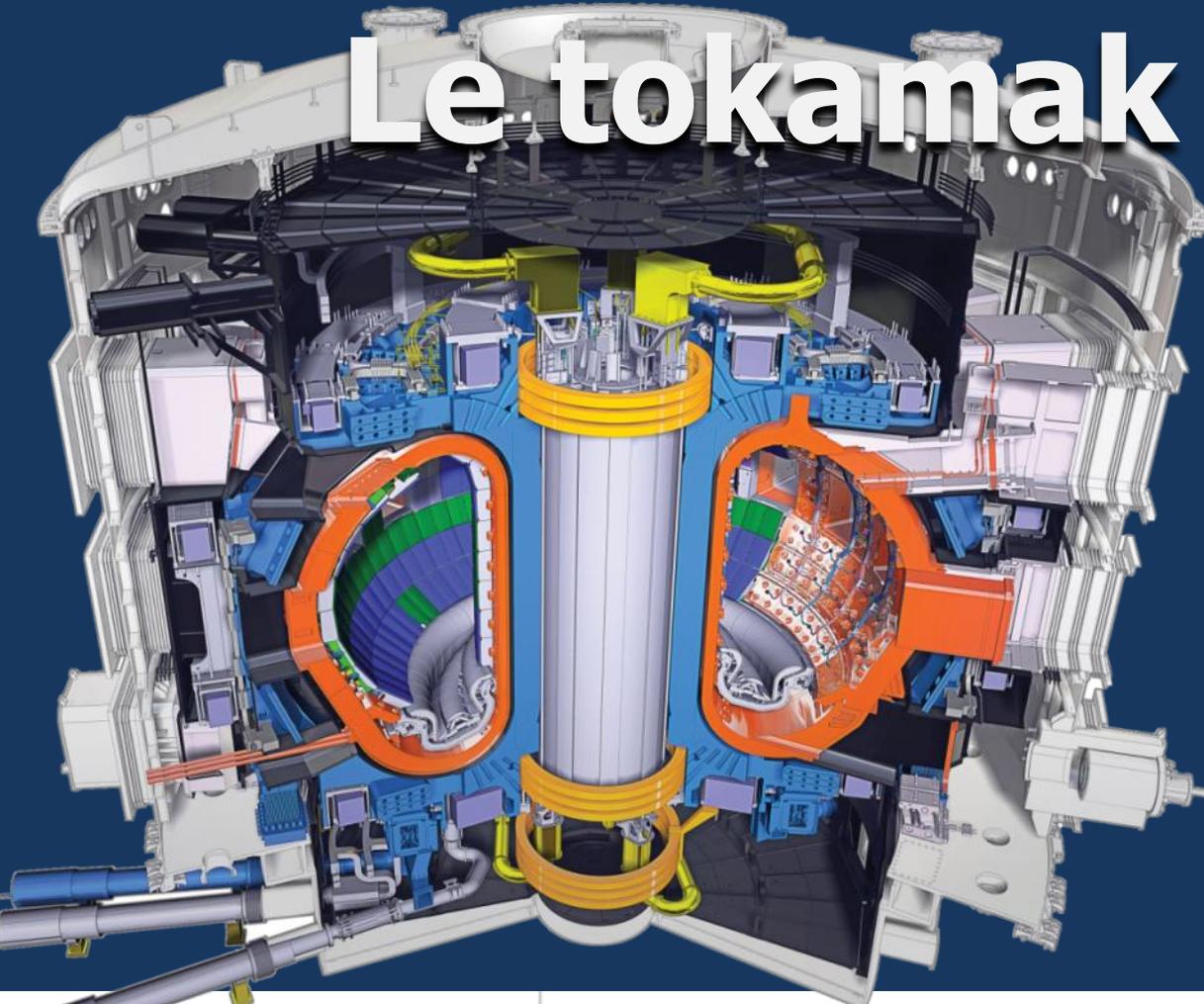
Le 28 juin 2005, les Membres d'ITER choisissent unanimement le site de Cadarache, proposé par l'Europe

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



Chine UE Inde Japon Corée Russie USA

Le tokamak ITER



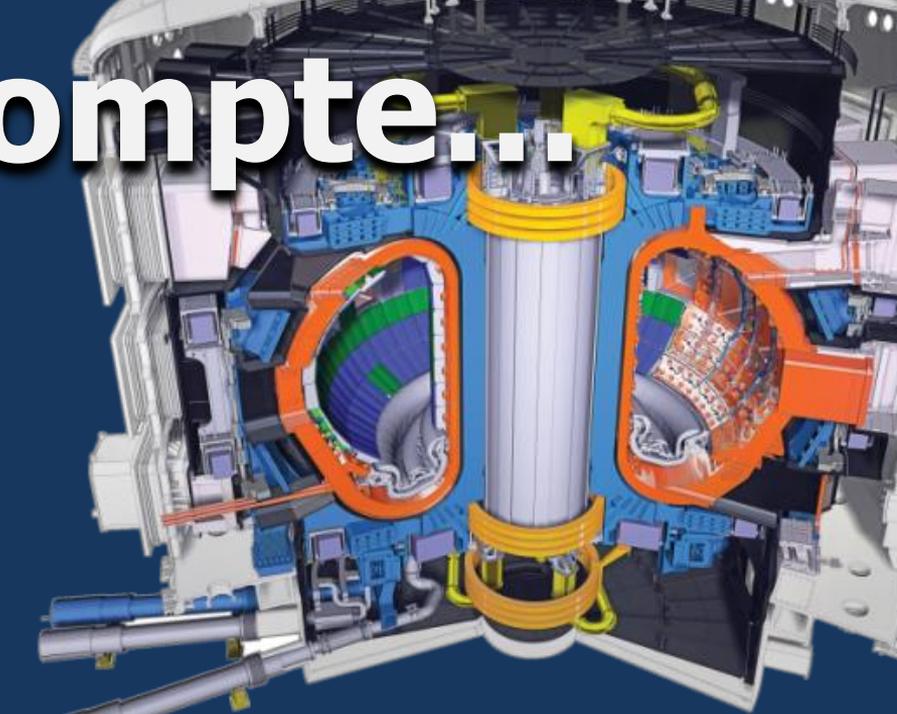
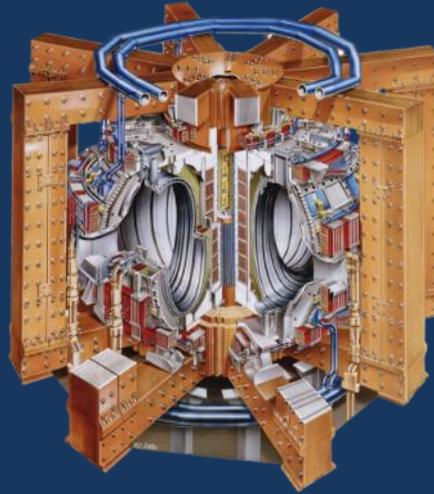
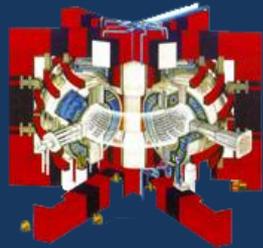
Chambre à vide: ~ 8 000 t.
Bobines TF: 18 x 360 t.
Bobines PF: 6 de ~ 200 à ~400 t.
Solénoïde central: ~ 1 000 t.
Etc.

Total ~ 23 000 t.



3,5 fois la masse de la Tour Eiffel!

La taille compte...



Tore Supra-WEST (France-CEA)

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

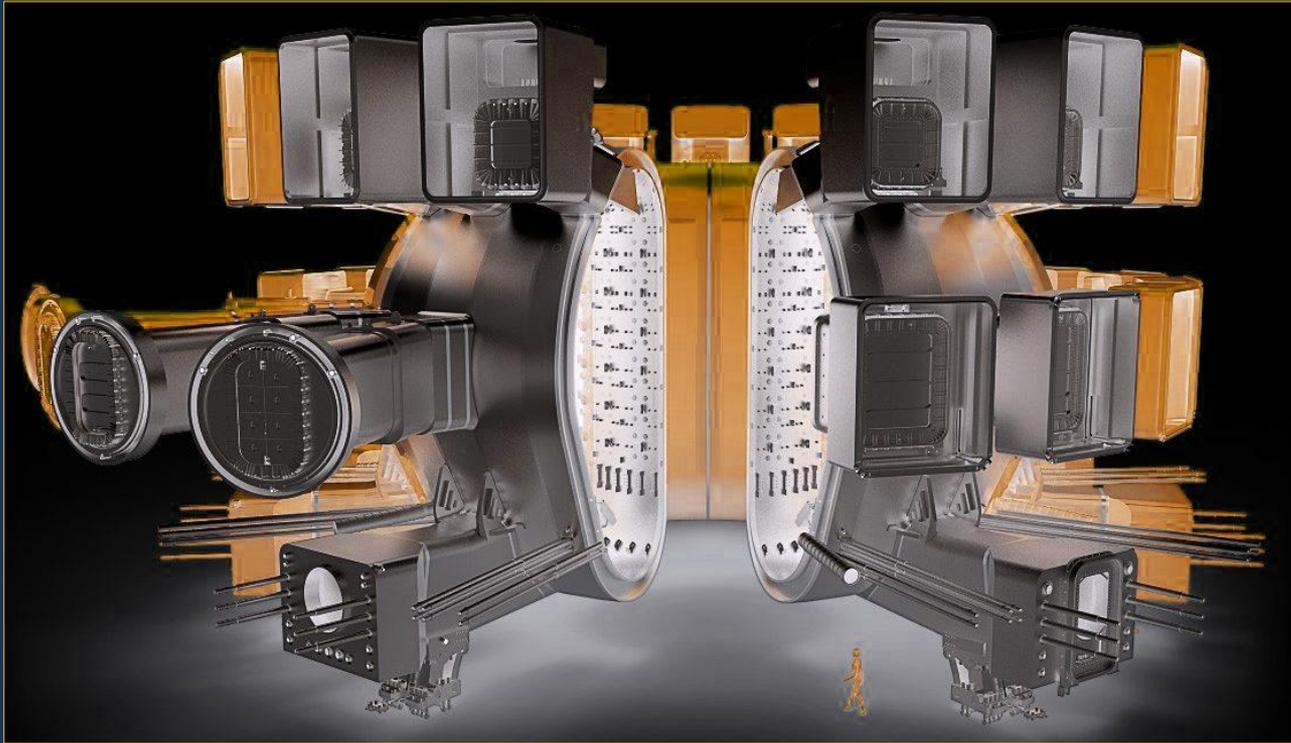
JET (Europe)

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

ITER (35 pays)

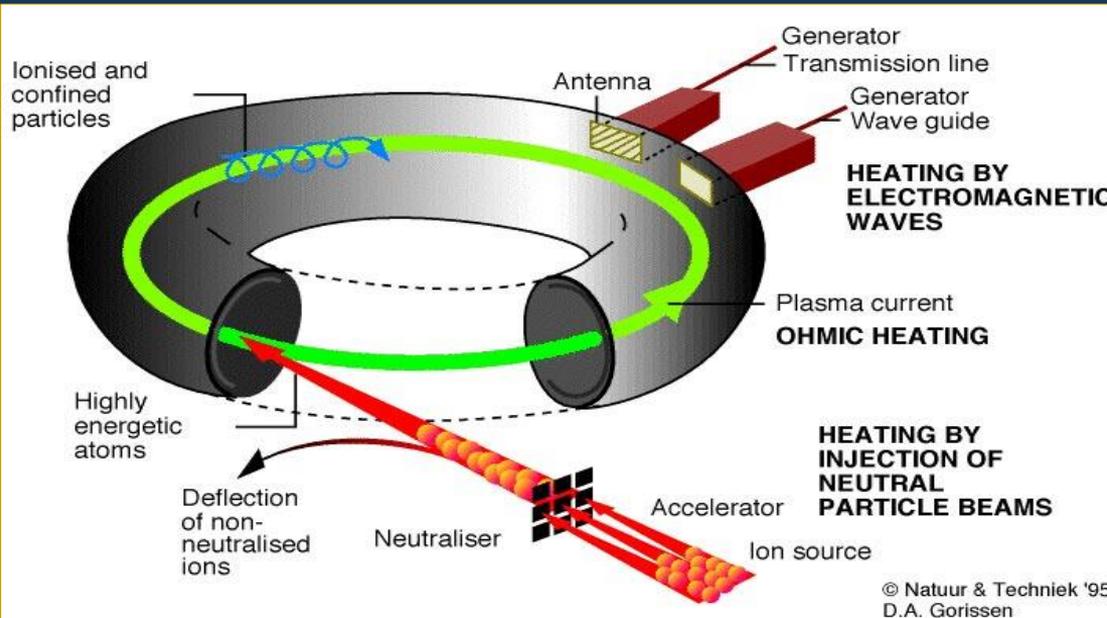
V_{plasma} 840 m³
 P_{fusion} ~500 MW
 $P_{\text{chauffage}}$ ~ 50 MW
 T_{plasma} > 400 s

Une chambre à vide de 5 200 m³



- Les réactions de fusion se produisent dans cette enceinte sous ultra-vide.
- Un circuit d'eau pressurisée dans la double paroi évacue la chaleur générée par l'impact des neutrons.

Comment porter le plasma à la température requise?



Chauffage ohmique porte le plasma à $\sim 20\text{-}30\text{ M}^\circ$

Besoin de chauffage externe 50 MW

- Radiofréquence (ECH & ICRH)
- Injection de particules de haute énergie

Mais dans quoi confiner un milieu à $150\,000\,000^\circ$, dix fois plus chaud que le cœur du Soleil?

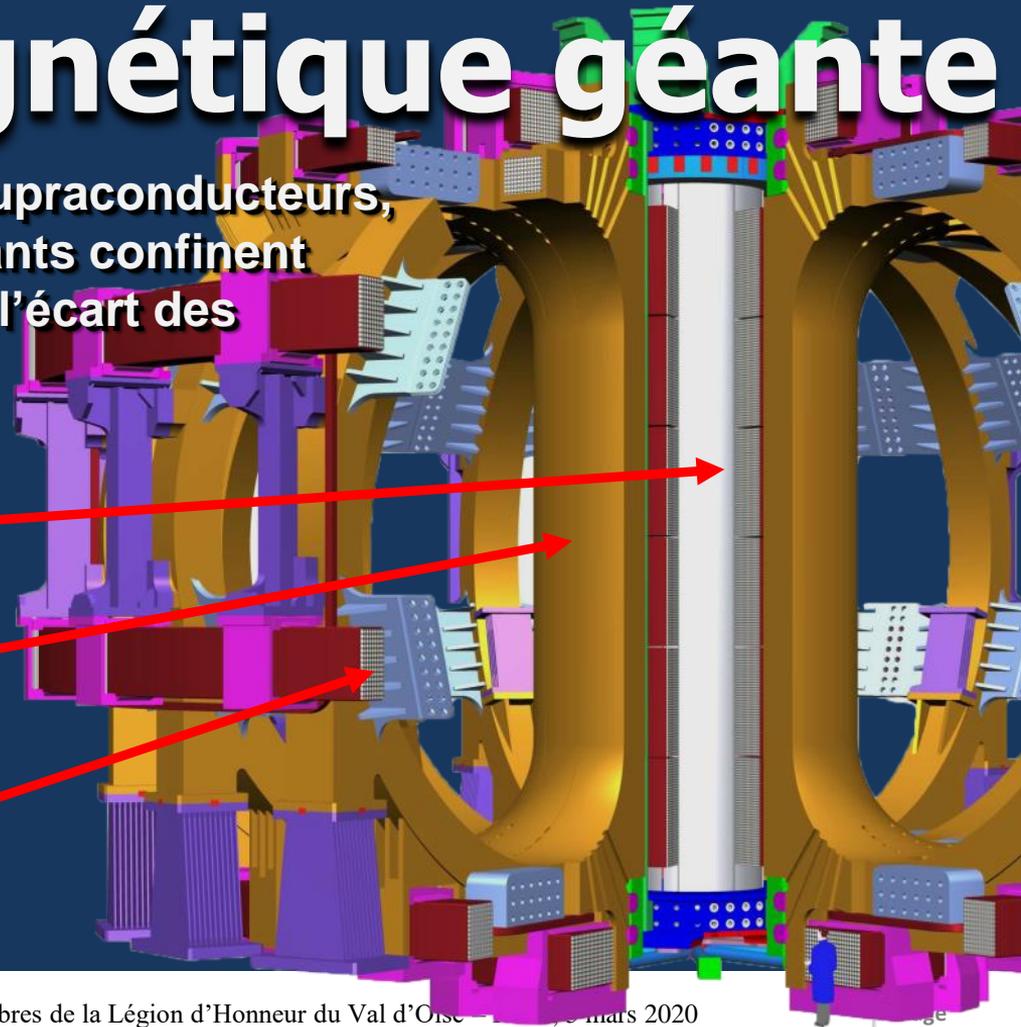
Une cage magnétique géante

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

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



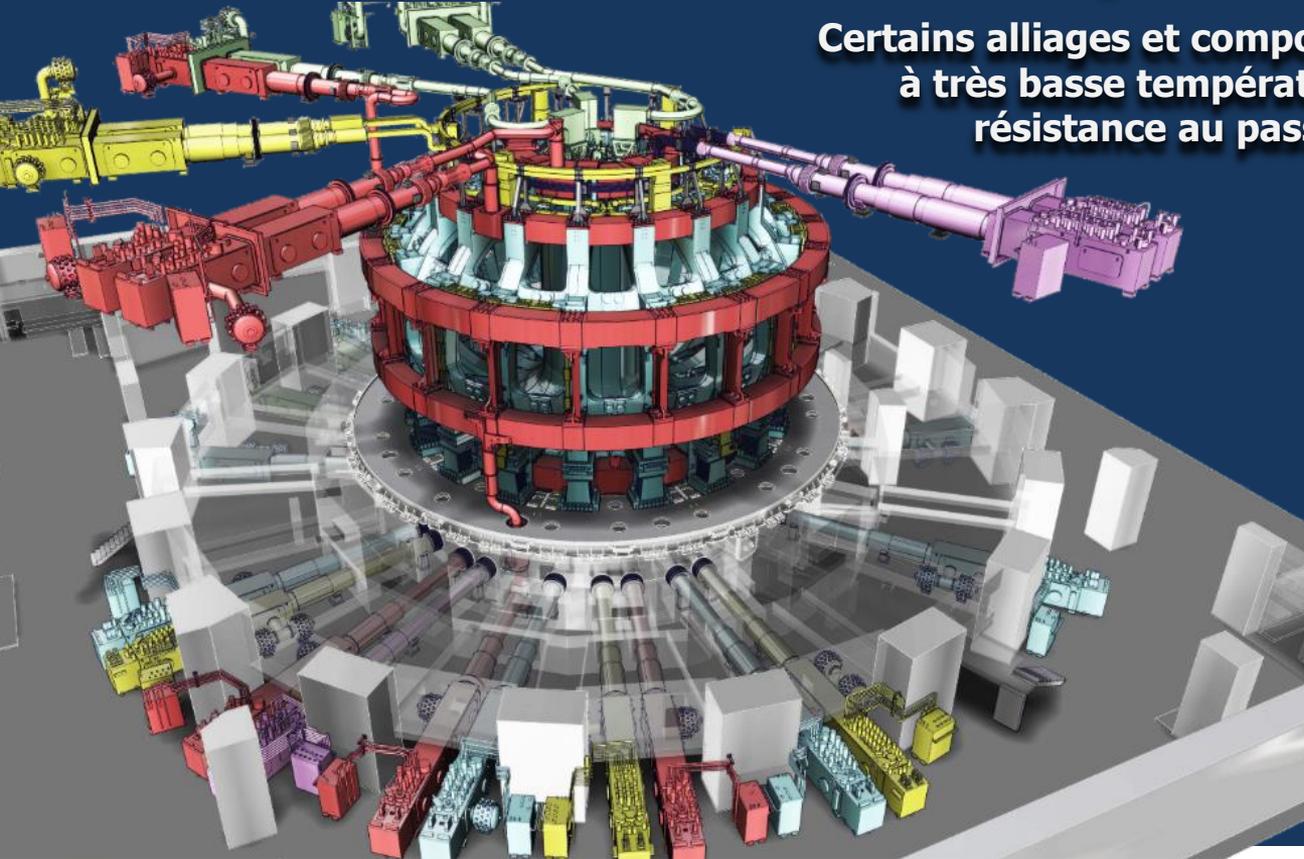
Le "miracle" de la supraconductivité

Certains alliages et composés, lorsqu'ils sont refroidis à très basse température, n'opposent plus de résistance au passage de l'électricité.

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

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

L'unité cryogénique d'ITER sera la plus puissante jamais construite



Les dimensions de la construction navale... ... la précision de l'horlogerie



Fournis par la Corée, ces portiques géants sont conçus pour préassembler secteurs de chambre à vide, bobines verticales (TF) et section d'écran thermique. Ils peuvent manipuler des charges de l'ordre de ~ 1 500 tonnes.



Dans les ateliers de Mitsubishi Heavy Industry, au Japon, insertion verticale du bobinage d'un aimant de champ toroïdal (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

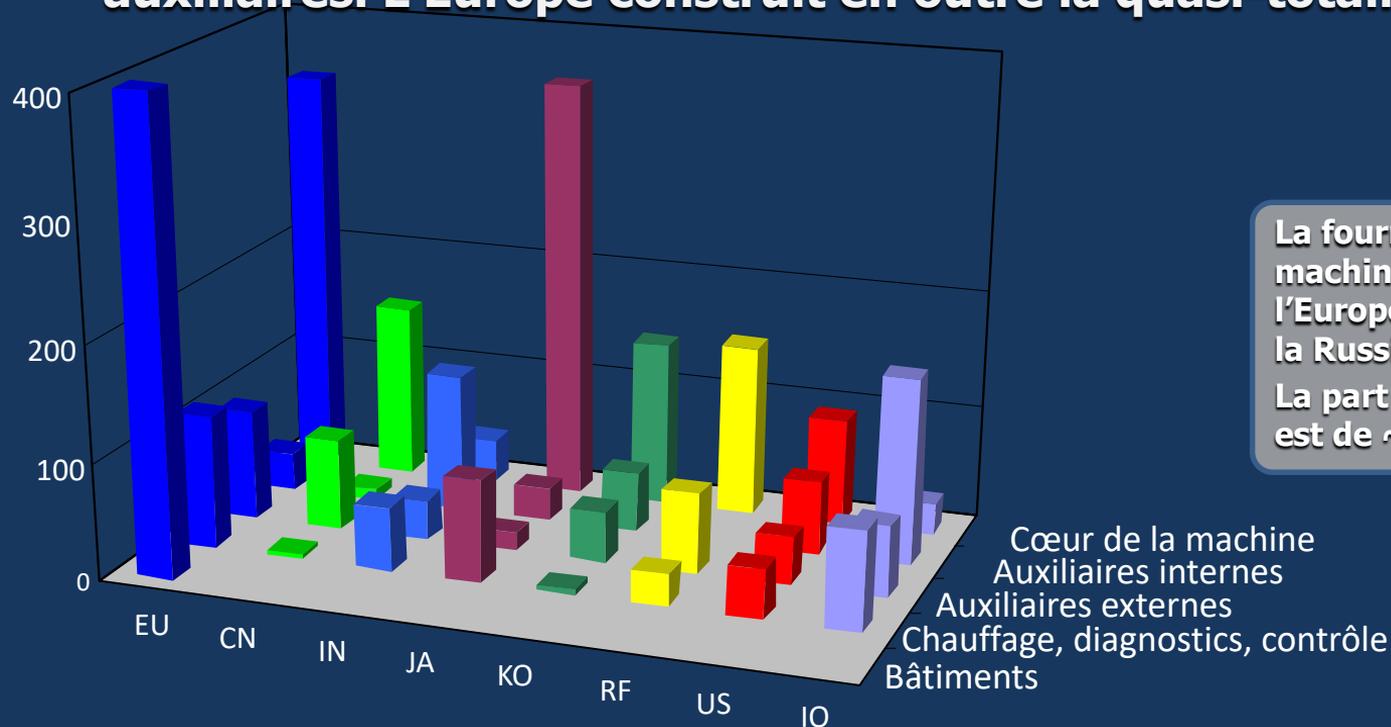
ITER Organization-Équipe centrale et 7 Agences domestiques

- Les 7 membres d'ITER contribuent financièrement (~10%) et en nature (~90%) au programme ITER. A 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%.

Cœur de la machine

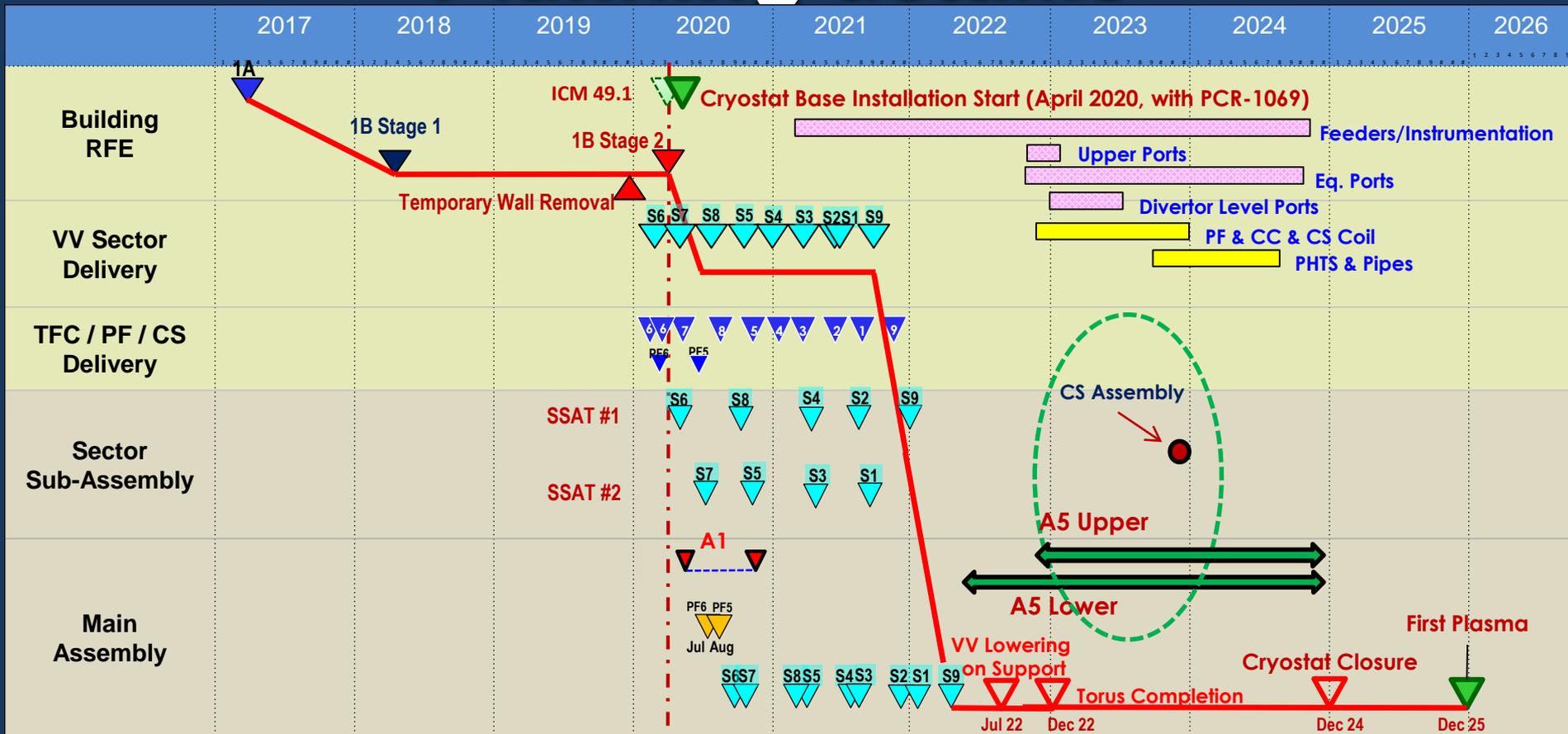
Auxiliaires internes

Auxiliaires externes

Chauffage, diagnostics, contrôle

Bâtiments

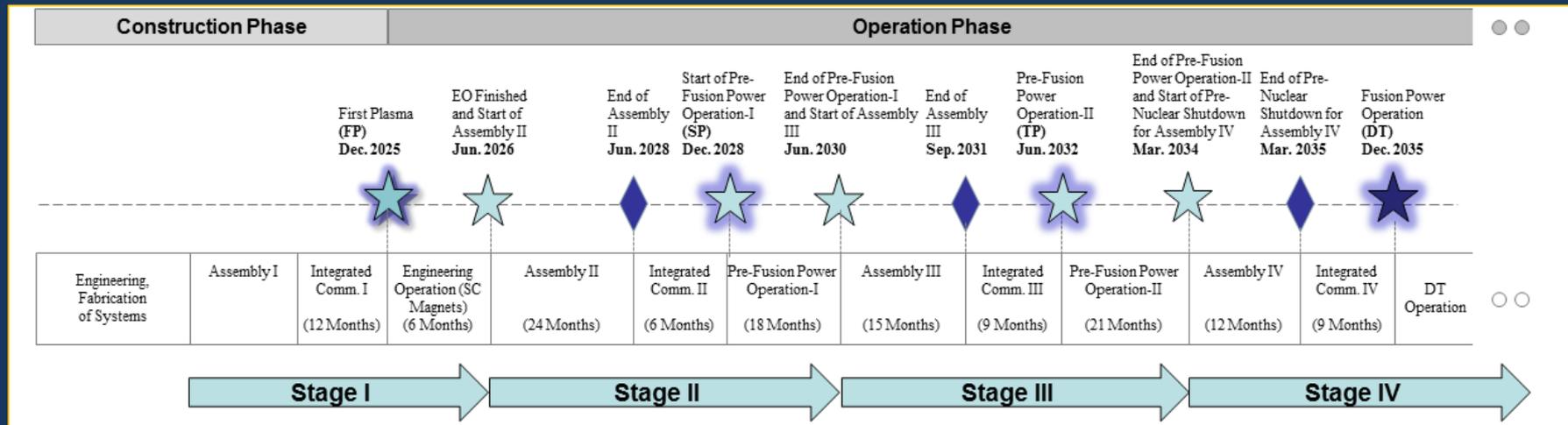
Planning détaillé



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 » : > 67% des tâches réalisées

”L’ensemble des tâches indispensables à la production du Premier Plasma” est réalisé à plus de 67%. Le taux de progression mensuel est de l’ordre de 0,7 %.

Six ans de progrès

Avril 2014 – Mars 2020



Les travaux de génie civil, réalisés par l'Europe, sont finalisés à hauteur de ~ 75%.

Où en est le chantier?

Hall d'Assemblage

Atelier du Cryostat

Usine de bobinage

Assemblage de la machine

Substation électrique 100 kV

Système de refroidissement

Unité cryogénique

Conversion électrique

Hall de levage

Complexe Tokamak

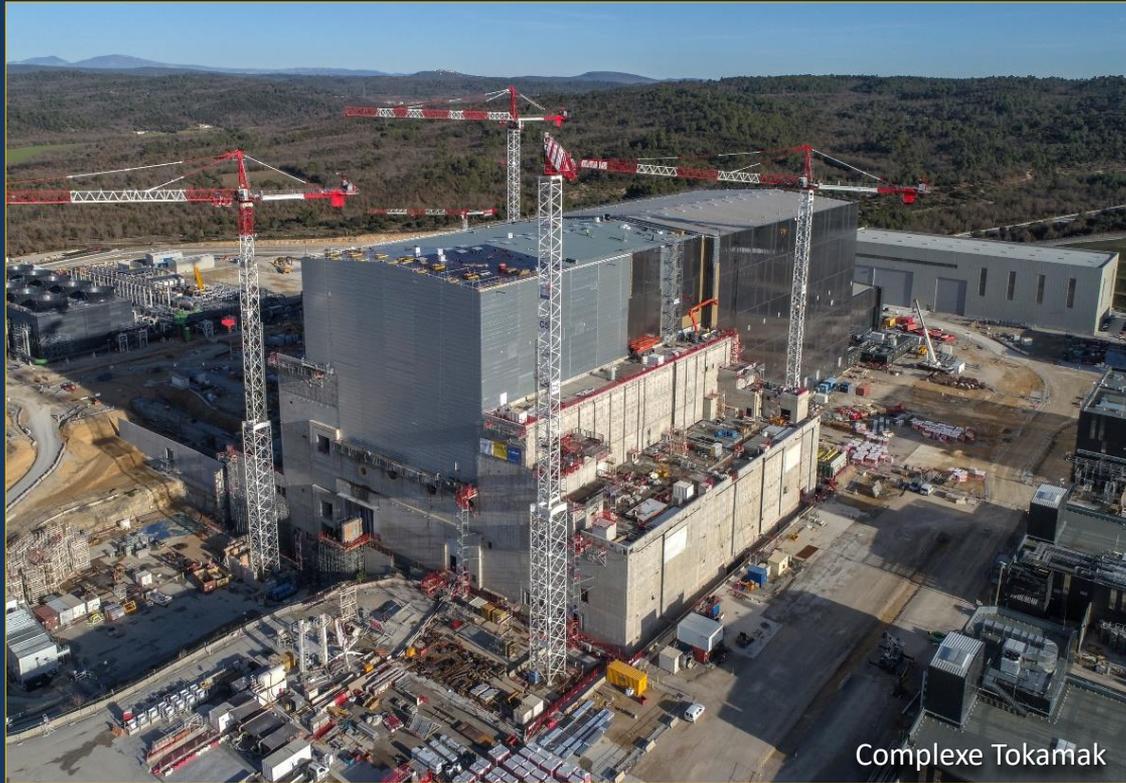
Zone entreprises

Siège ITER Org.

28 février 2020

Bâtiments et fabrications sur site

Mars 2020



Complexe Tokamak



Fosse d'assemblage



Hall d'assemblage

Bâtiments et fabrications sur site



Évacuation de la chaleur



Usine cryogénique

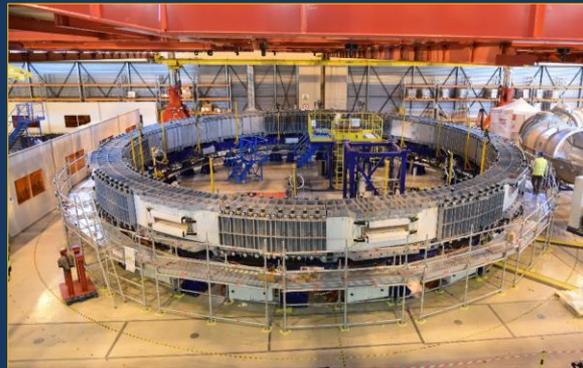


Mars 2020

Alimentation électrique



Atelier du Cryostat



Fabrication des bobines annulaires (PF)



Conversion électrique

2020-2021, années décisives

Livraisons

- première bobine annulaire (Europe-Chine)
- premier secteur de chambre à vide (Corée)
- premiers éléments de l'écran thermique (Corée)
- première bobine de champ toroïdal (Japon)
- premier module du solénoïde central (USA)
- Etc.

Construction finalisées (Europe)

- bâtiment de conversion électrique
- fosse centrale du bât. Tokamak prête pour activités d'assemblage
- bâtiment d'assemblage terminé
- réception du bâtiment compresseur de l'usine cryogénique
- prolongement des rails du double pont roulant (du bâtiment d'assemblage au hall de levage)
- Etc.

La 1^{ère} bobine TF prend la mer

Fabriquée au Japon par Mitsubishi Heavy Industries, elle sera livrée sur site au mois d'avril



Le Japon fournit 9 (dont une rechange) des 18 bobines de champ toroïdal de la machine. Fabriquée à l'usine Mitsubishi Heavy Industries de Futami, la première d'entre elles s'apprête à prendre la mer pour être livrée sur le site d'ITER.

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



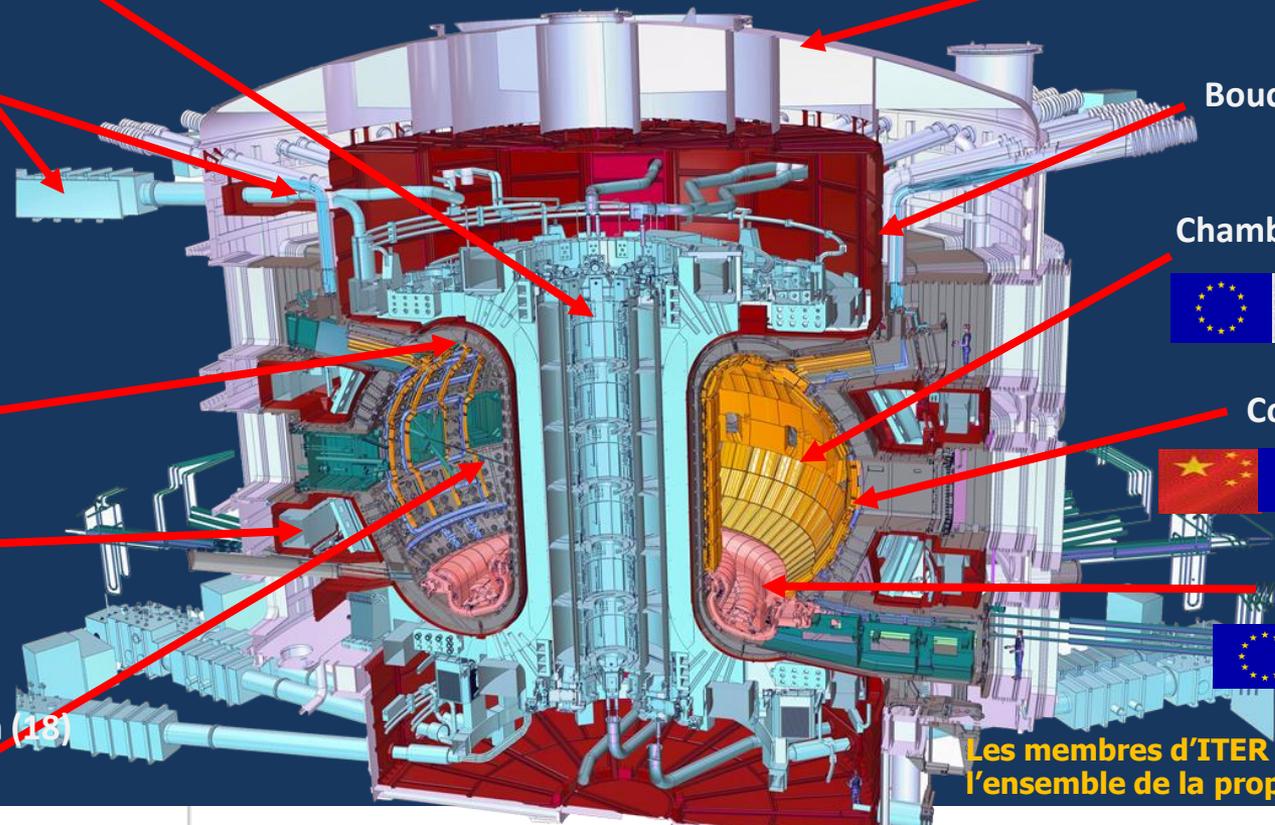
Couverture



Divertor



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



Fabrications en cours



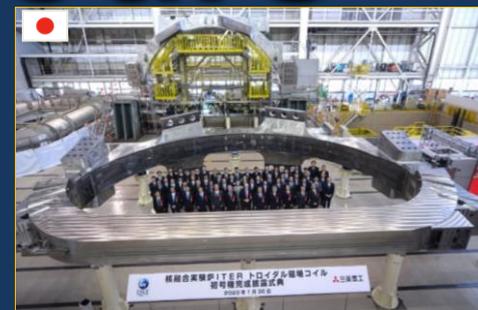
L'Europe fournit 10 bobines TF (sur 19).
La première est finalisée en Italie.
Livraison mai 2020.



Bobine PF n°6 finalisée
(sous contrat européen).
Livraison août 2020.



Fin de fabrication pour les
segments du "couvre" du
cryostat. Livraison juillet 2020.



Le Japon fournit 9 bobines TF (dont une
rechange).
Livraison avril 2020.



Le premier des 4 secteurs de chambre à
vide attribués à la Corée (sur un total
de 9) sera livré au mois de mai 2020.



La fabrication de la bobine
poloïdale n°1 touche à sa fin.
Livraison début 2021.



Les six modules du solénoïde central (plus une rechange) abordent
les dernières étapes de la fabrication en Californie.
Livraison octobre 2020.

Les livraisons se succèdent...

33 convois “hautement exceptionnels” à ce jour.

~ 20 prévus en 2020 pour 46 éléments. ~ 200 d’ici 2025 - ~ 20 après 2025



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.

... par l'itinéraire ITER



L'itinéraire ITER — 104 km entre Berre et le site d'ITER — a été aménagé par la France (État et CG 13).

Prêt pour l'assemblage



Deux consortiums internationaux ont été retenus pour réaliser l'assemblage de la machine: CNPE, regroupement de grandes entreprises chinoises, avec participation de Framatome, et DYNAMIC SNC qui associe l'Italien Ansaldo Nucleare, les Français ENDEL-ENGIE et ORTEC et d'autres entreprises européennes. La phase d'assemblage commence au printemps 2020.

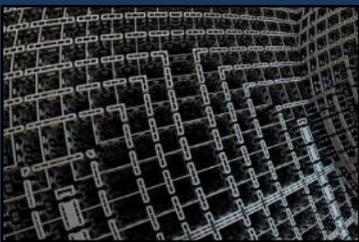
Innovation



▶ Robotique en Environnement extrême



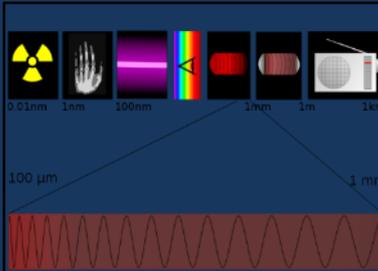
▶ Supraconducteurs



▶ Filtres de haute-technologie



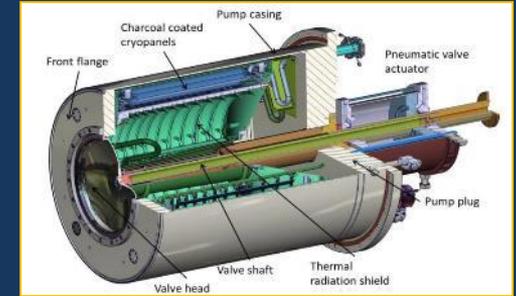
▶ Electronique de puissance



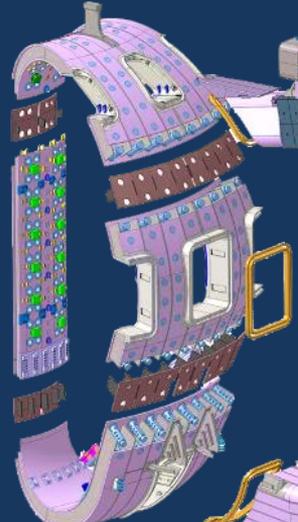
▶ Transmission de signal ultra-haut débit (TeraHertz)



▶ Emboutissage par explosion



▶ Cryopompes et systèmes sous vide



Etc.

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€

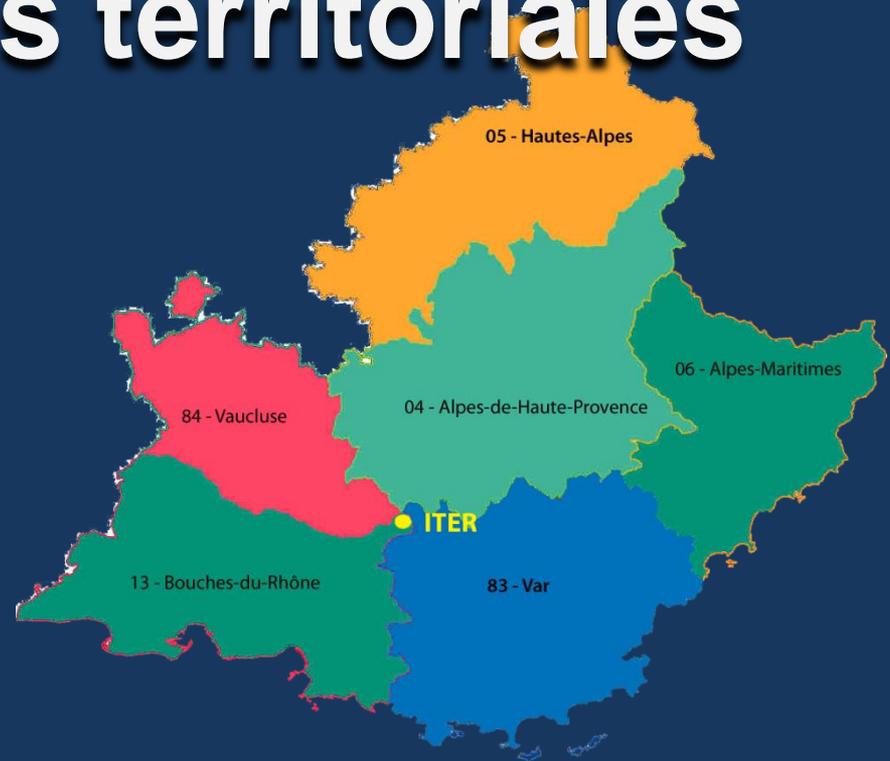
Var: 30 M€

Vaucluse: 28 M€

Alpes-Maritimes: 15 M€

Alpes-de-Haute-Provence: 10 M€

Hautes-Alpes: 5 M€



Retombées économiques

Plus de 9,5 milliards d'euros de contrats (construction et fabrication)



Retombées économiques

Construction



Total des contrats passés depuis 2007

6,5 milliards d'euros (dont génie civil)

Part des entreprises françaises

~ 3,7 milliards d'euros

La sûreté d'ITER

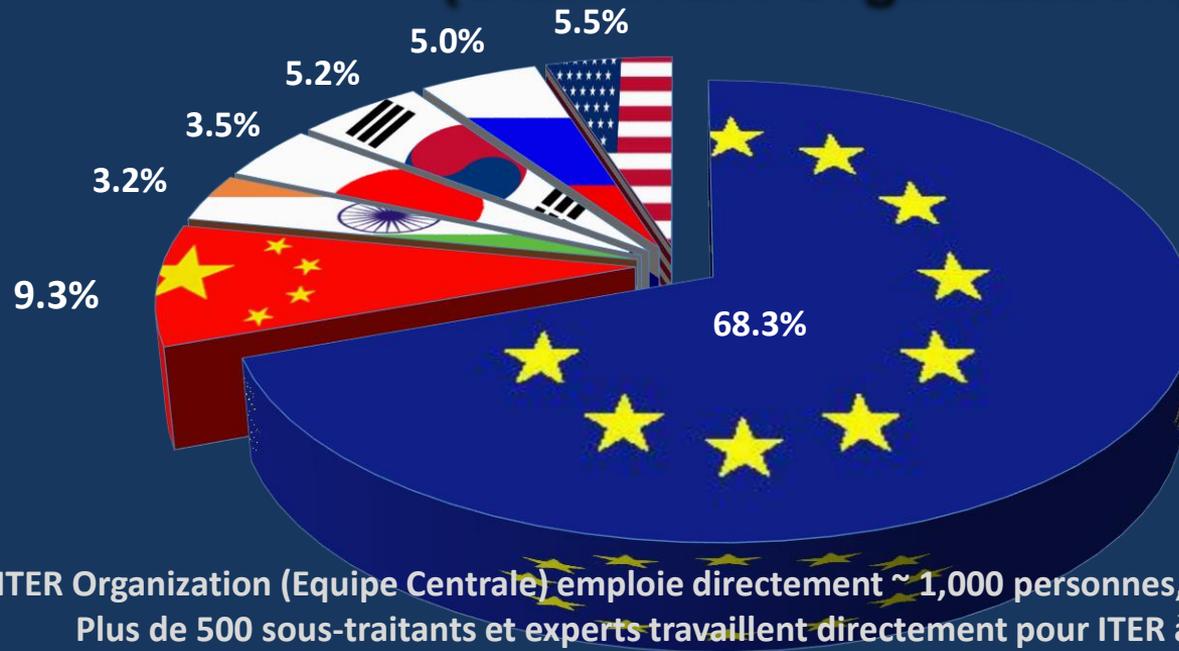


- La réaction de fusion est intrinsèquement sûre.
- Il n'y a jamais plus d'un gramme de combustible en réaction dans la chambre à vide.
- La moindre perturbation met fin au plasma.
- L'emballement de la réaction et la fonte du coeur sont physiquement impossibles.
- En cas de perte d'alimentation électrique,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

Qui travaille pour ITER?

(Staff ITER Organization)



Novembre 2019

ITER Organization (Equipe Centrale) emploie directement ~ 1,000 personnes, représentant 35 nationalités.
Plus de 500 sous-traitants et experts travaillent directement pour ITER à Saint-Paul-lez-Durance.
Dans le monde entier, le programme ITER mobilise plus de 2 000 scientifiques, ingénieurs, techniciens, etc.

Quel coût?

Europe : ~45% - Chine, Inde, Japon, Corée, Russie, USA : ~9%

Phase de construction: Organisation ITER

Fournitures en nature par les Membres

Phase d'exploitation

Phase de mise à l'arrêt

Phase de démantèlement

8,2 milliards € (valeur 2018)

12,5 milliards € (estimation)

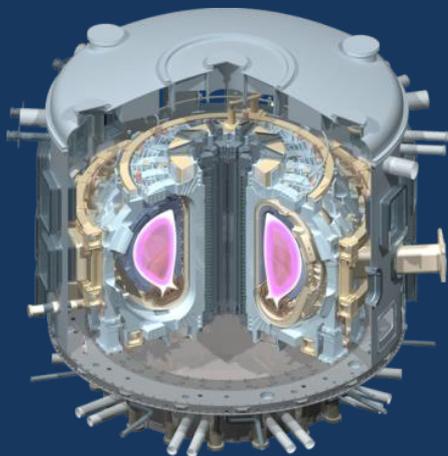
300 millions €/an

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

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.

Former les générations futures



Cérémonie de remise des diplômes (Master et doctorat).

- Un réseau européen préparant aux métiers de la fusion a été mis en place.
- <http://www.fusenet.eu/>
- En France:
 - Aix-Marseille Université; Université de Lorraine; l'Université de Bordeaux ; Université Pierre et Marie Curie; Université Paris-Sud; Ecole Polytechnique; Ecole Centrale Marseille; l'Ecole Arts et Métiers; Ecole Centrale-Supelec; Institut d'Optique Graduate School; Ecole Normale Supérieure de Cachan; Institut National des Sciences etc.
- <http://www.master-plasmas-fusion.fr/>

Des défis nombreux

- Renforcement de la culture de projet « **One-ITER Team** »
- Strict respect, par les fournisseurs, des exigences de **qualité et de sûreté**
- Strict respect, par l'ensemble des parties prenantes, des **exigences de calendrier**, particulièrement pour ce qui concerne les **dates de livraison** des matériels et des équipements
- Fiabilisation des **séquences d'assemblage/construction** sur site
- Mise en place d'une organisation adaptée pour préparer la **mise en service** (*commissioning*)
- **Respect des engagements, notamment financiers, souscrits par les sept Membres du programme et mise à disposition des ressources en temps voulu.**

Objectif 2025



<https://www.iter.org/fr/accueil>