

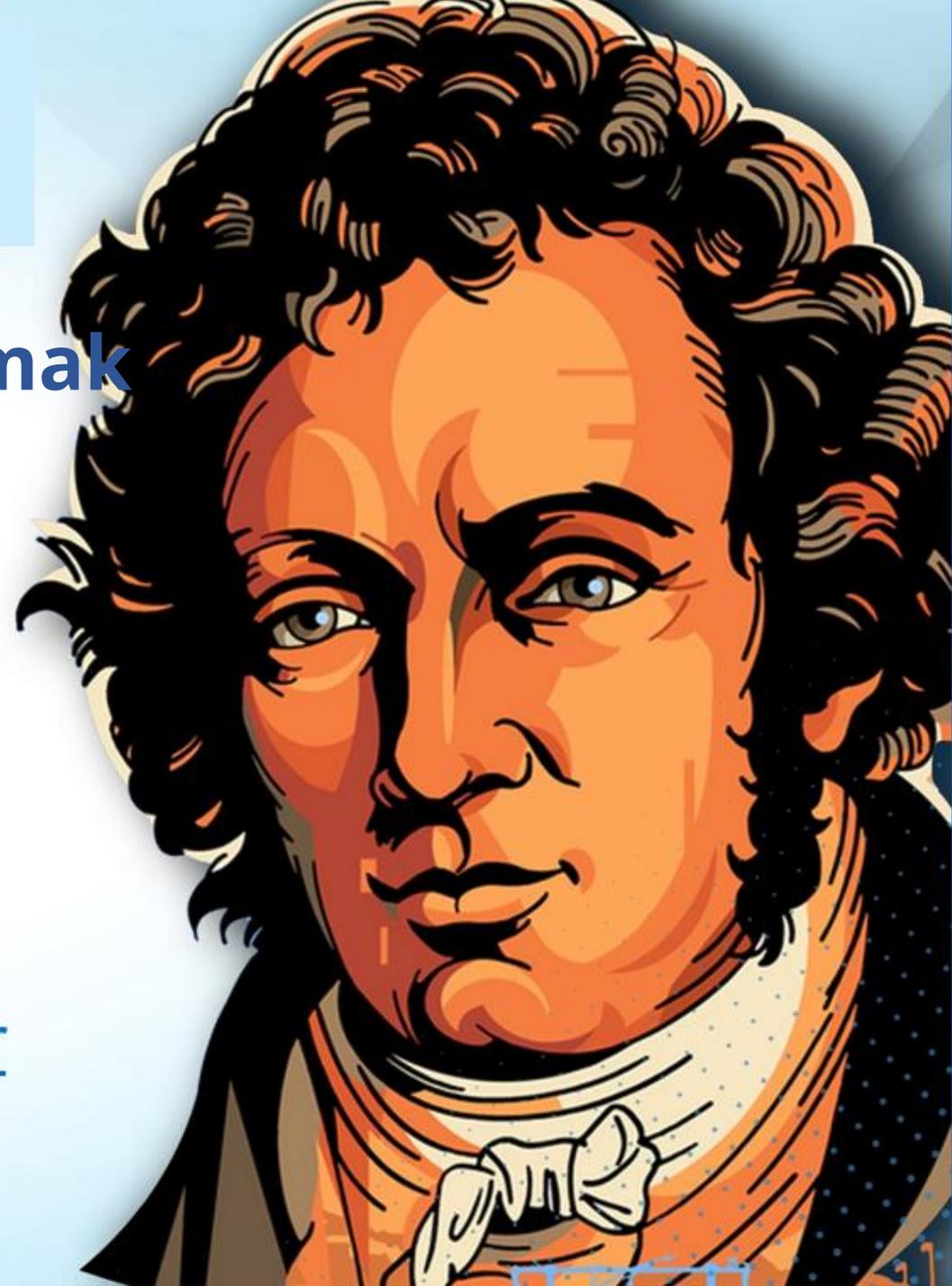
Journée Ampère 200 ans

Le 5 octobre 2022 à Lyon

Du bonhomme d'Ampère au Tokamak

L'électro-magnétisme au cœur de la fusion nucléaire

Alain BECOULET
ITER Organization



www.ampere200ans.fr

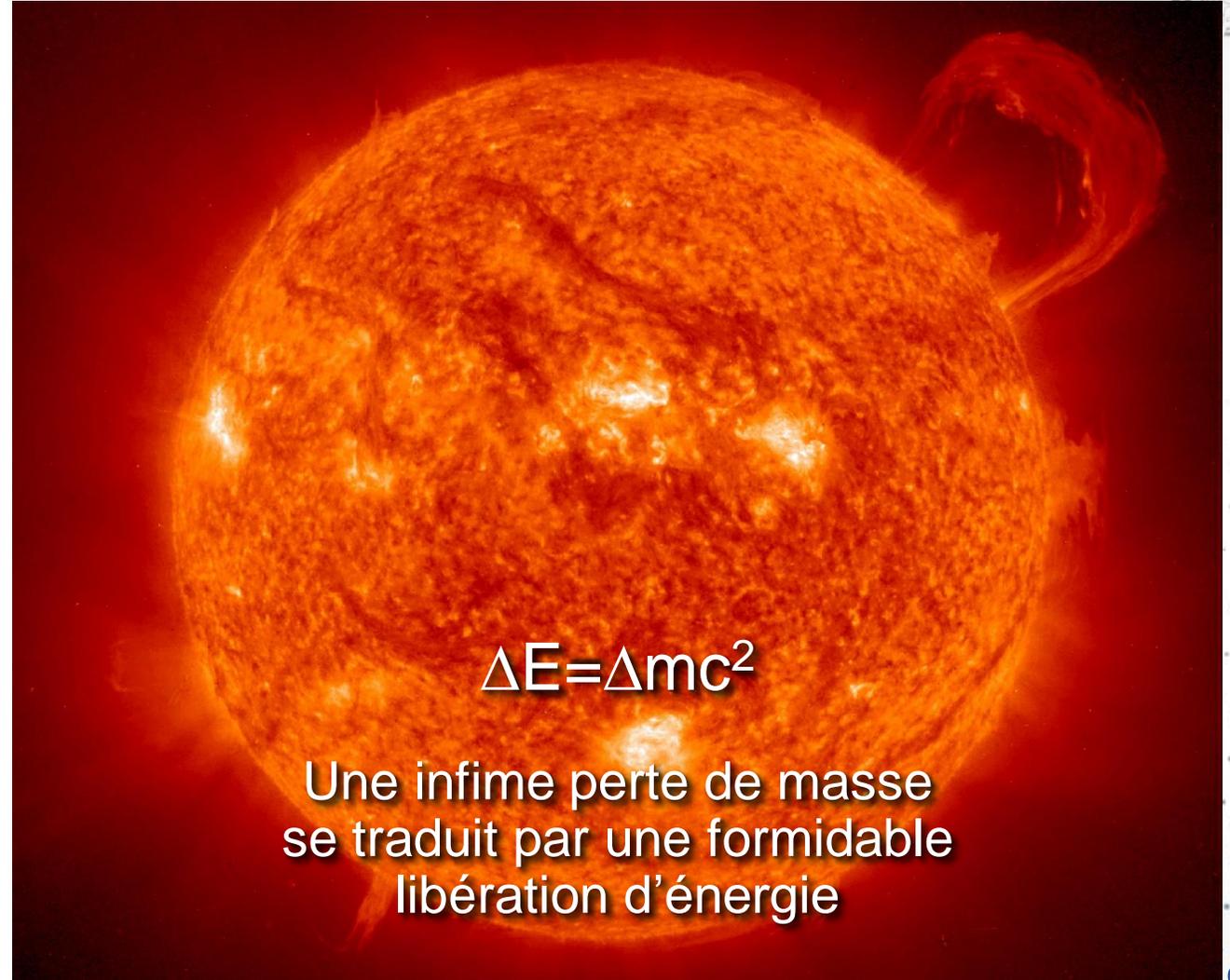




1920-1930: Mise en évidence des réactions de fusion de l'hydrogène à l'œuvre au cœur du Soleil et des étoiles (Perrin, Eddington, Bethe, Rutherford...)

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.



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

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



La fusion est obtenue à partir de différentes combinaisons de noyaux légers.

En l'état présent de la technologie, la réaction deutérium + tritium (les isotopes de l'hydrogène) est la plus accessible.

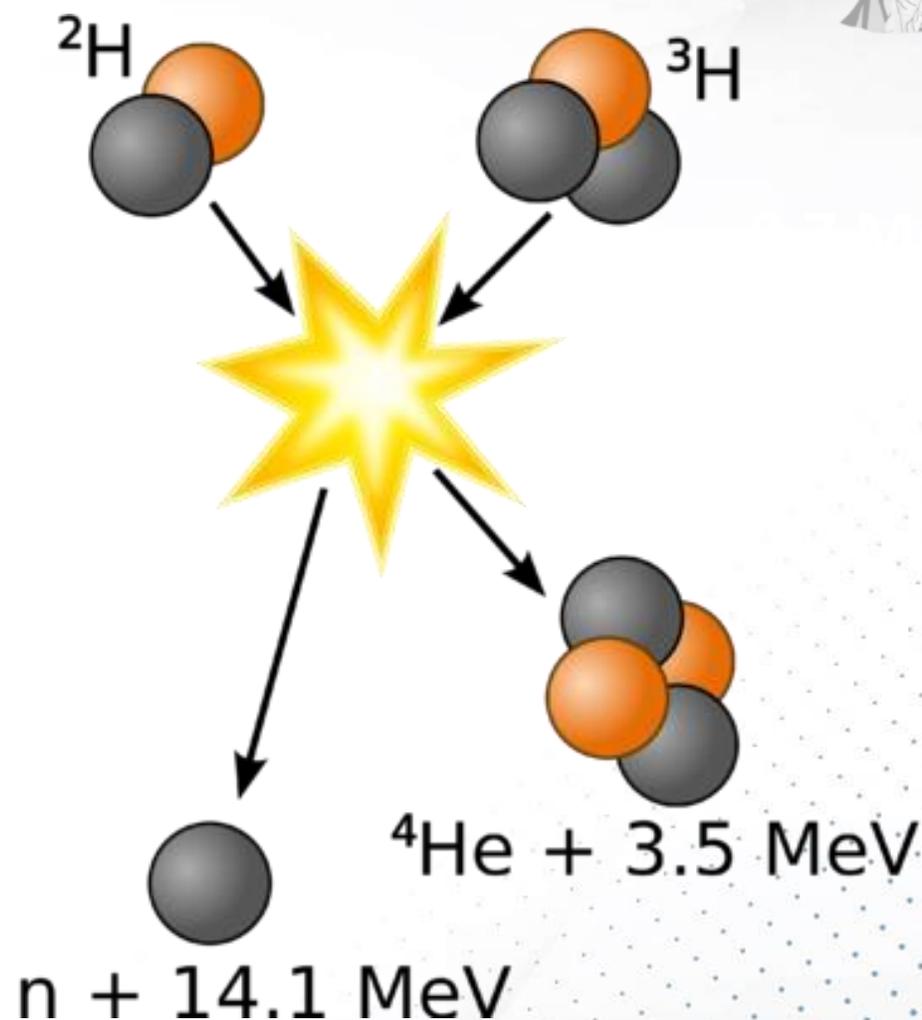
Deux « voies » sont possibles sur Terre:

- La voie « inertielle »

Le mélange D-T est comprimée par des faisceaux convergents (laser ou particules).

- La voie « magnétique »

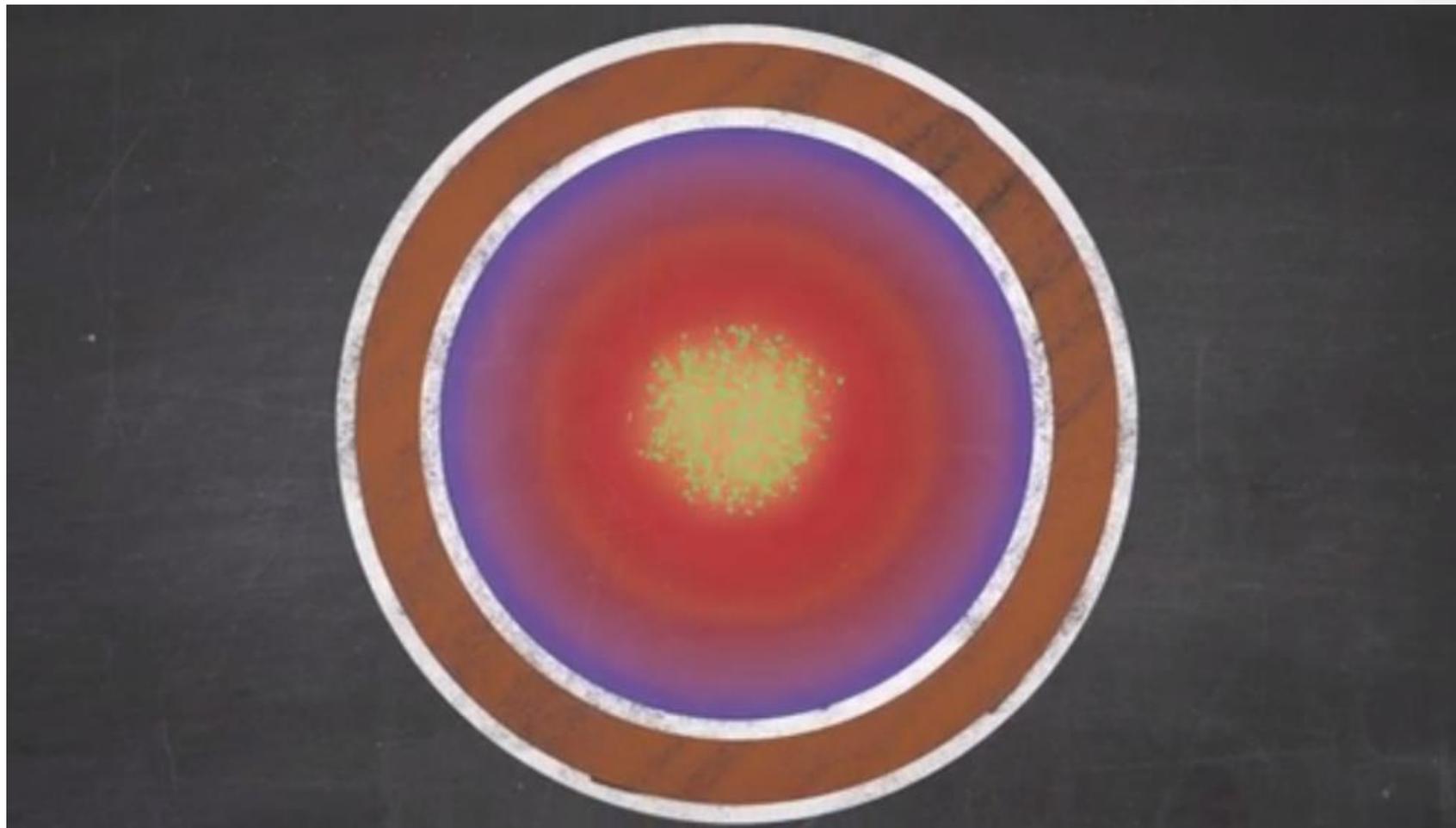
Le mélange D-T est confiné dans une bouteille magnétique puis chauffé à l'état de plasma au-delà de 100 millions de degrés.





Le confinement en fusion nucléaire

Pour que des réactions thermonucléaires puissent se produire dans un plasma, il faut contenir les atomes dans un volume limité, et les maintenir à une température d'environ 100 millions de degrés, en les empêchant de céder leur chaleur à une paroi matérielle



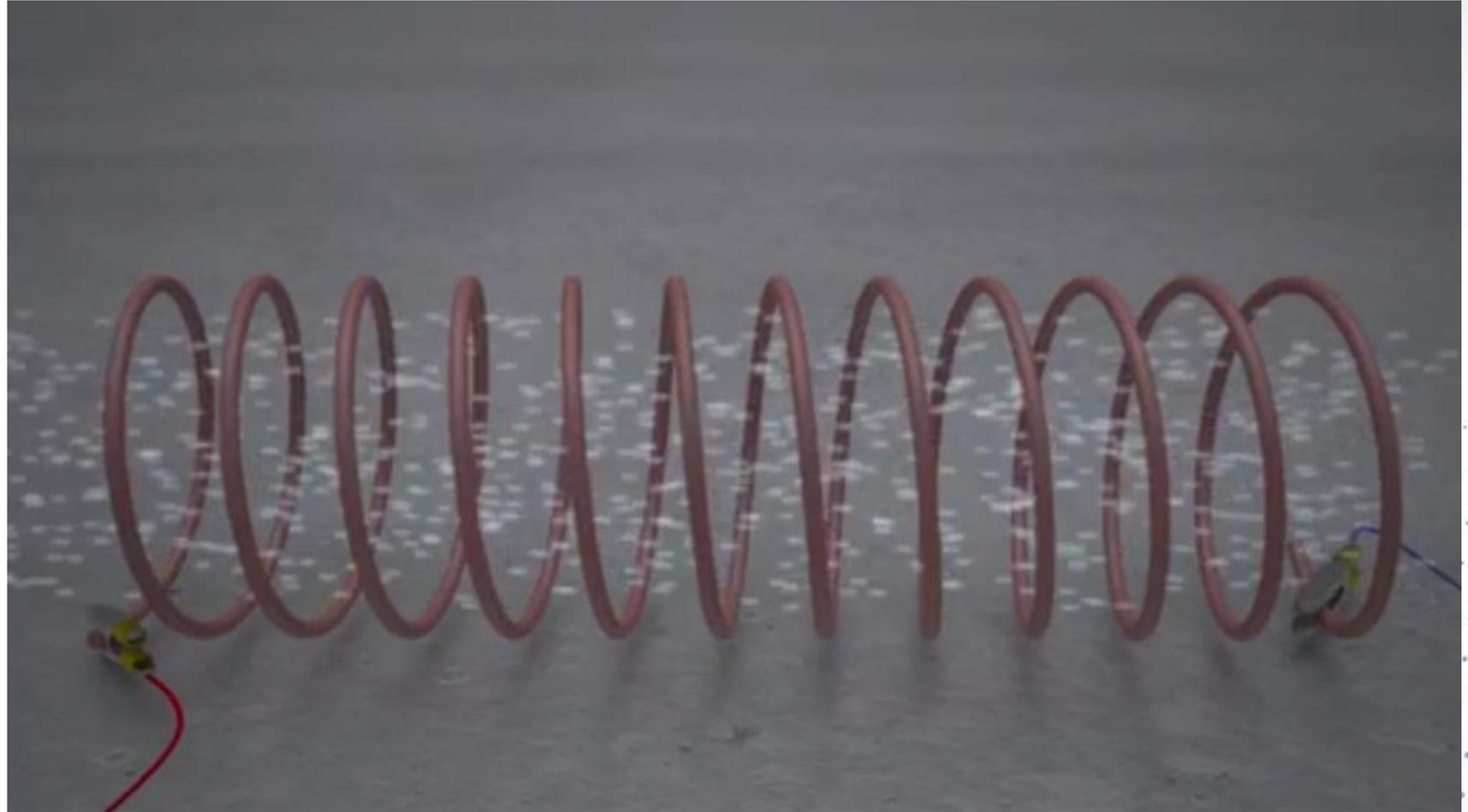
« L'électro-magnétisme au cœur de la fusion nucléaire » Alain BECOULET, ITER Organization



La boîte magnétique – 1/5

Les particules chargées du plasma (noyaux et électrons) sont sensibles au champ magnétique.

Si le plasma baigne dans un champ magnétique rectiligne, ses particules tourneront autour des lignes de champ, et ne pourront plus atteindre les parois.

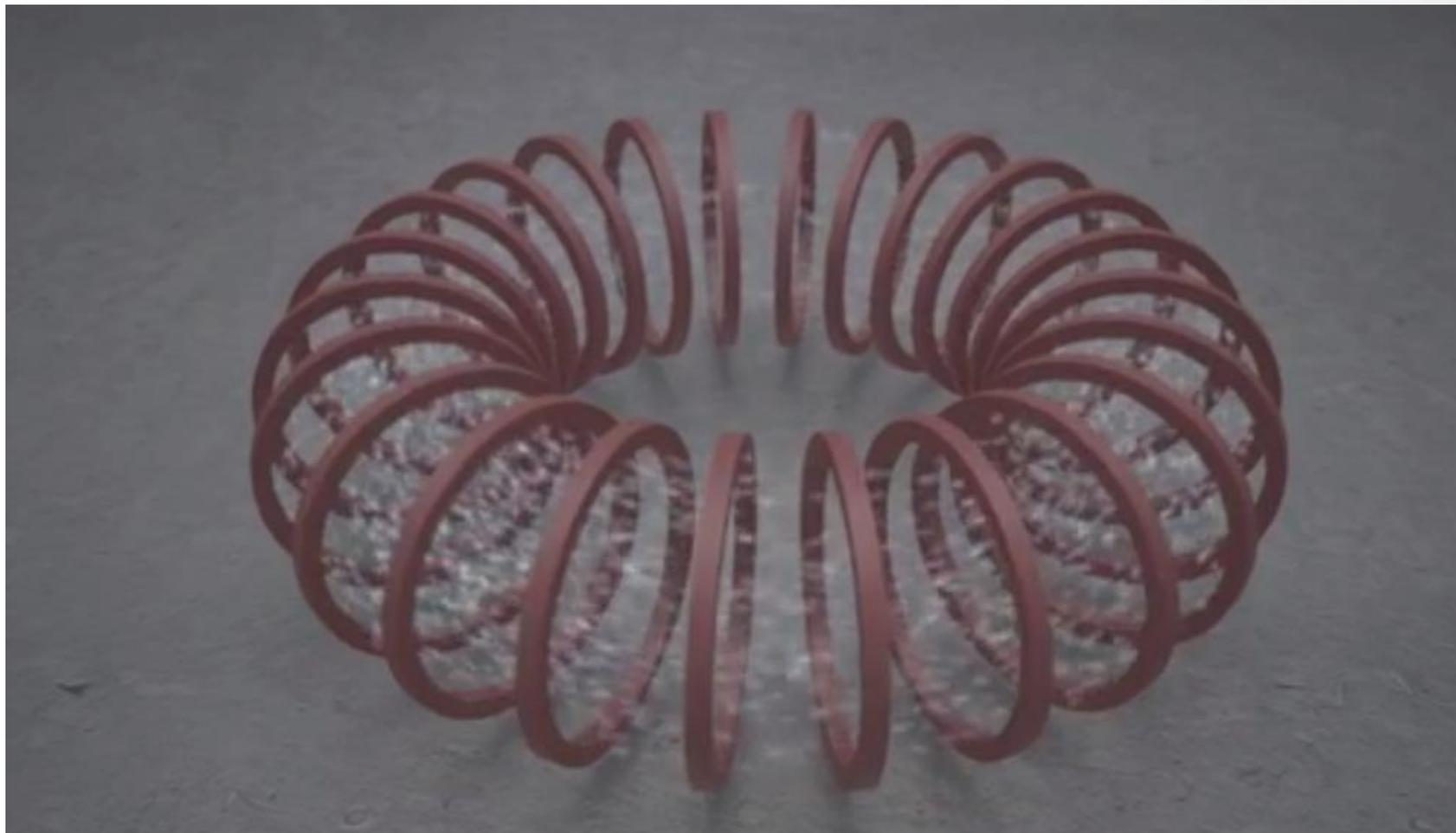


« L'électro-magnétisme au cœur de la fusion nucléaire » Alain BECOULET, ITER Organization



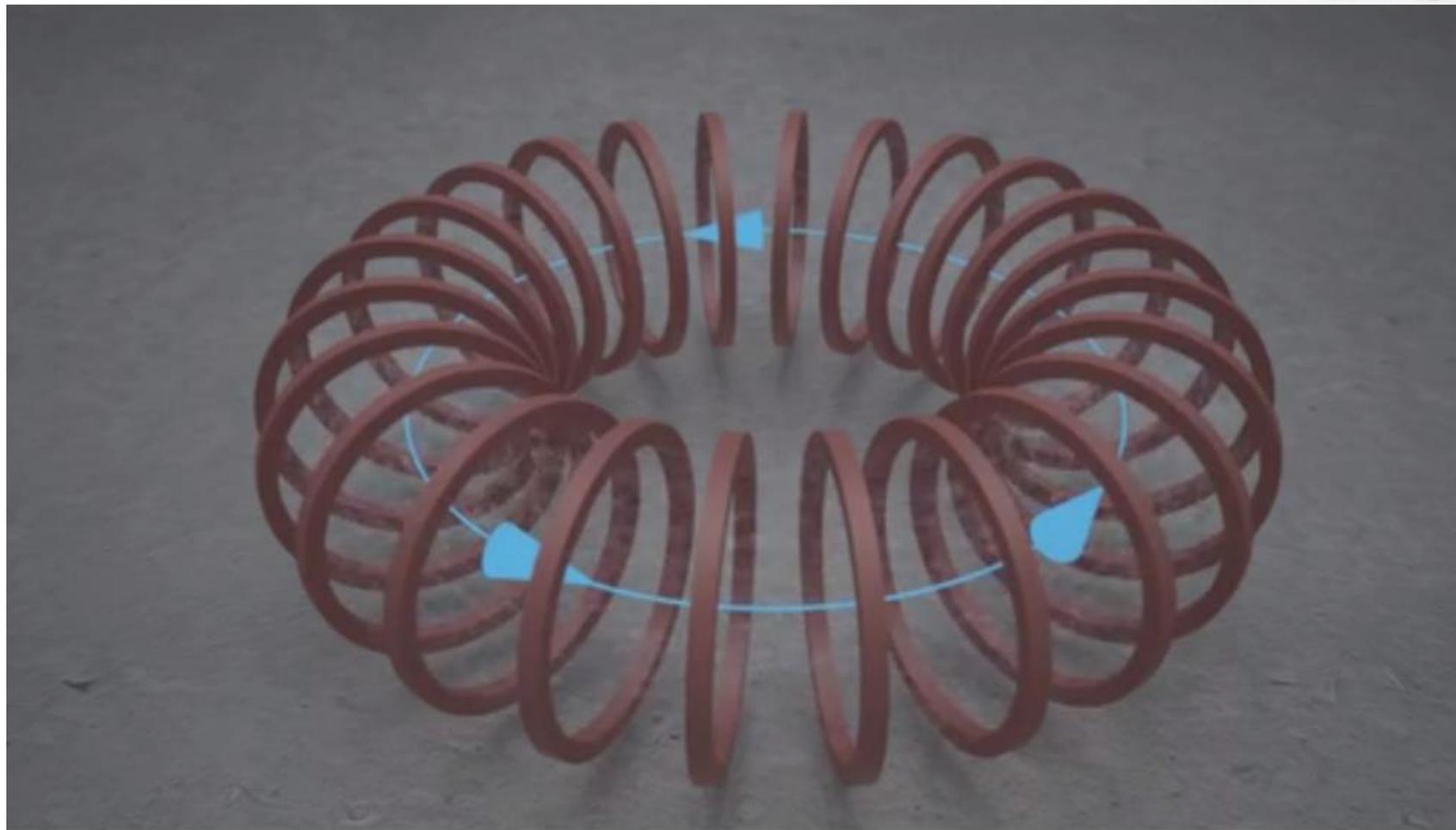
La boîte magnétique – 2/5

Afin d'éviter que le plasma s'échappe aux extrémités, on referme la boîte magnétique sur elle-même, pour former une cage torique. Le champ magnétique ainsi créé par une série d'aimants verticaux entourant le plasma est nommé champ magnétique toroïdal





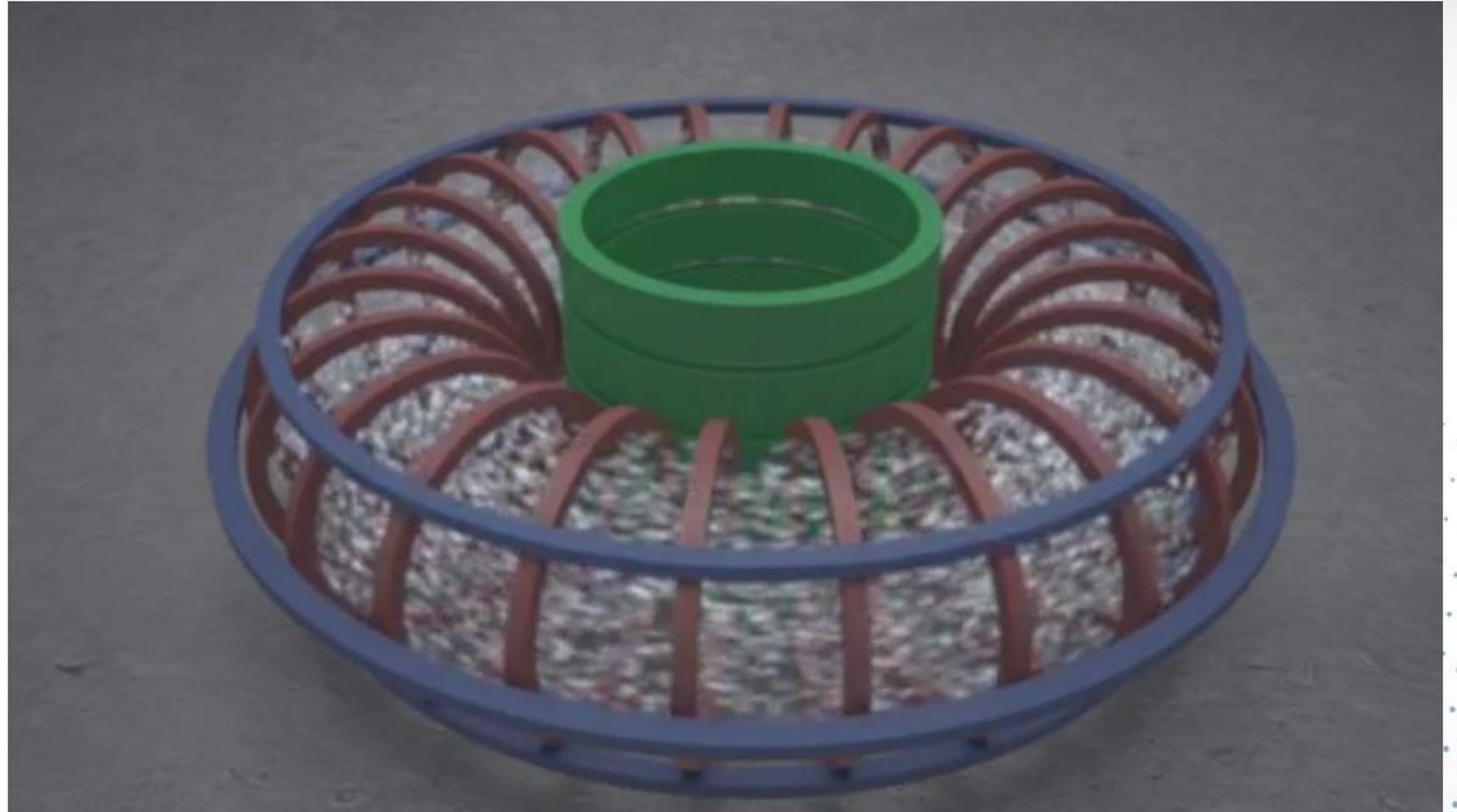
Un *courant électrique toroidal* intense parcourt ensuite le plasma, générant un *champ magnétique dit poloidal*, qui participe également au confinement



« L'électro-magnétisme au cœur de la fusion nucléaire » Alain BECOULET, ITER Organization



D'autres bobines sont ajoutées afin de démarrer le plasma et contrôler sa forme.

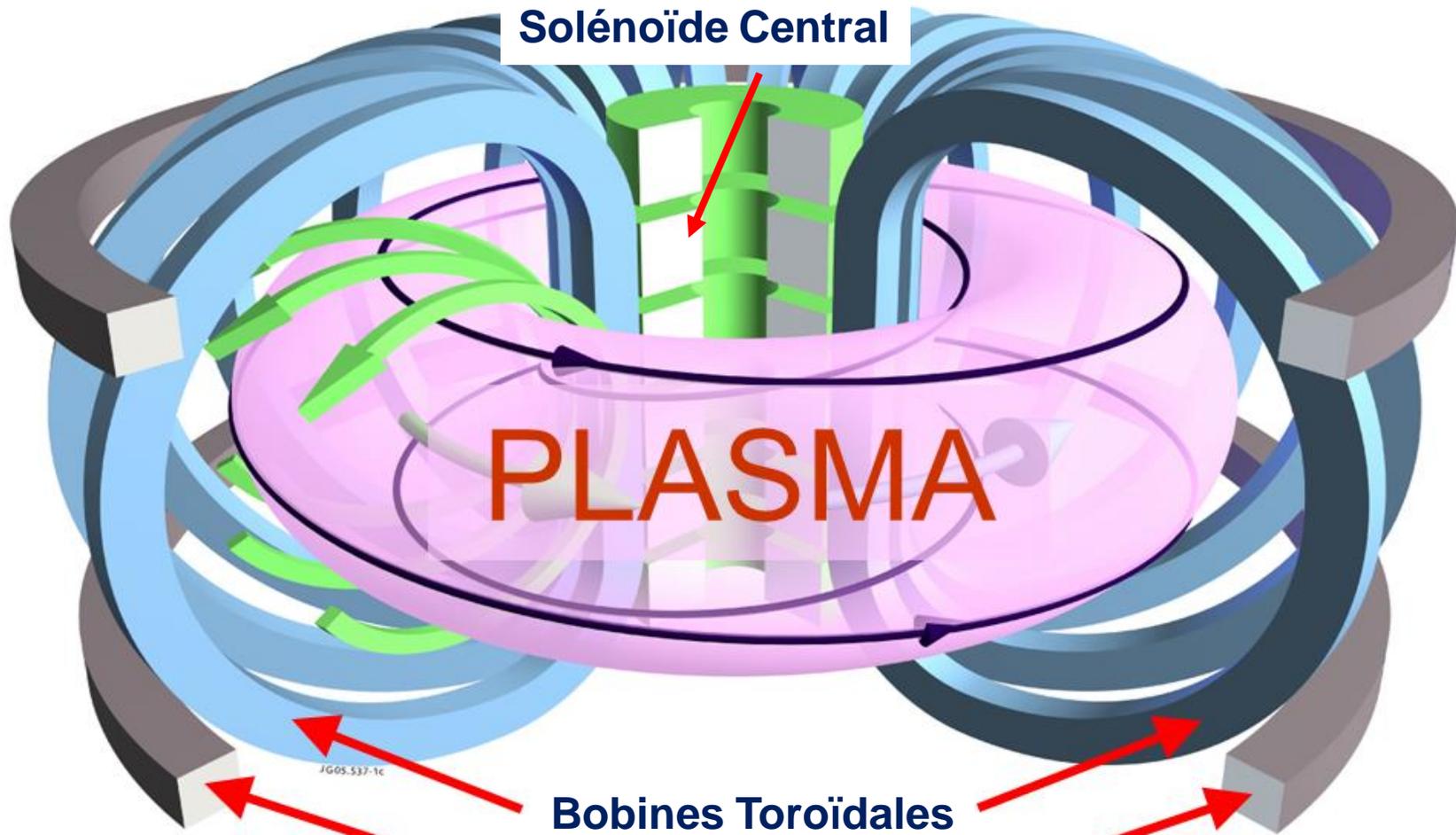




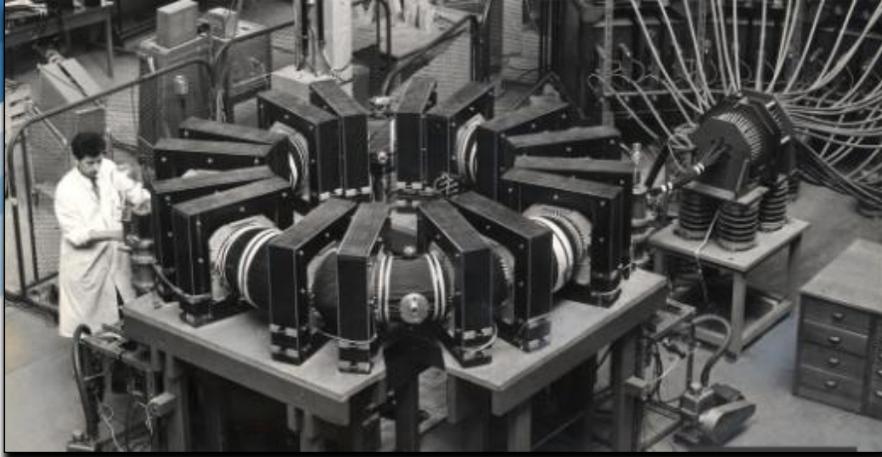
Le tokamak

Les lignes de champ résultant ont finalement une forme d'hélice

C'est la Configuration Tokamak:
(*Toroydal'naya Kamera i Magnitnaya Katushka*)

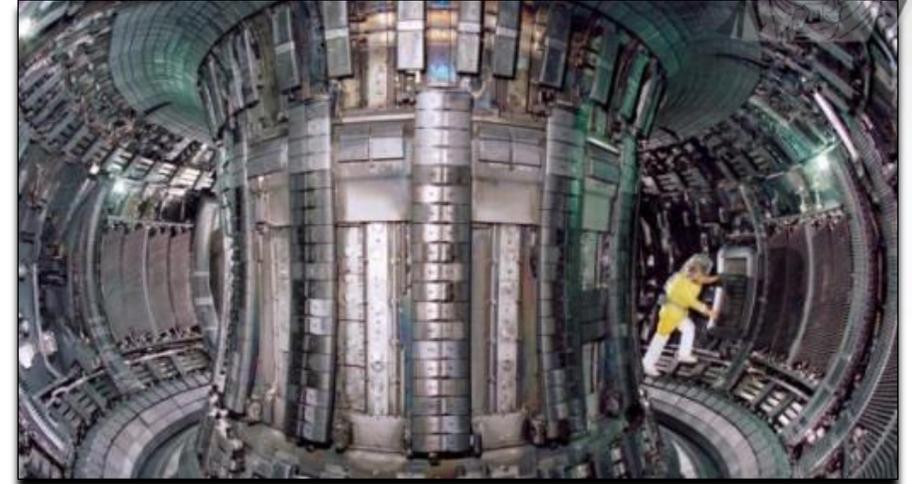


65 ans de progrès



◀ TA-2000, France, 1957

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

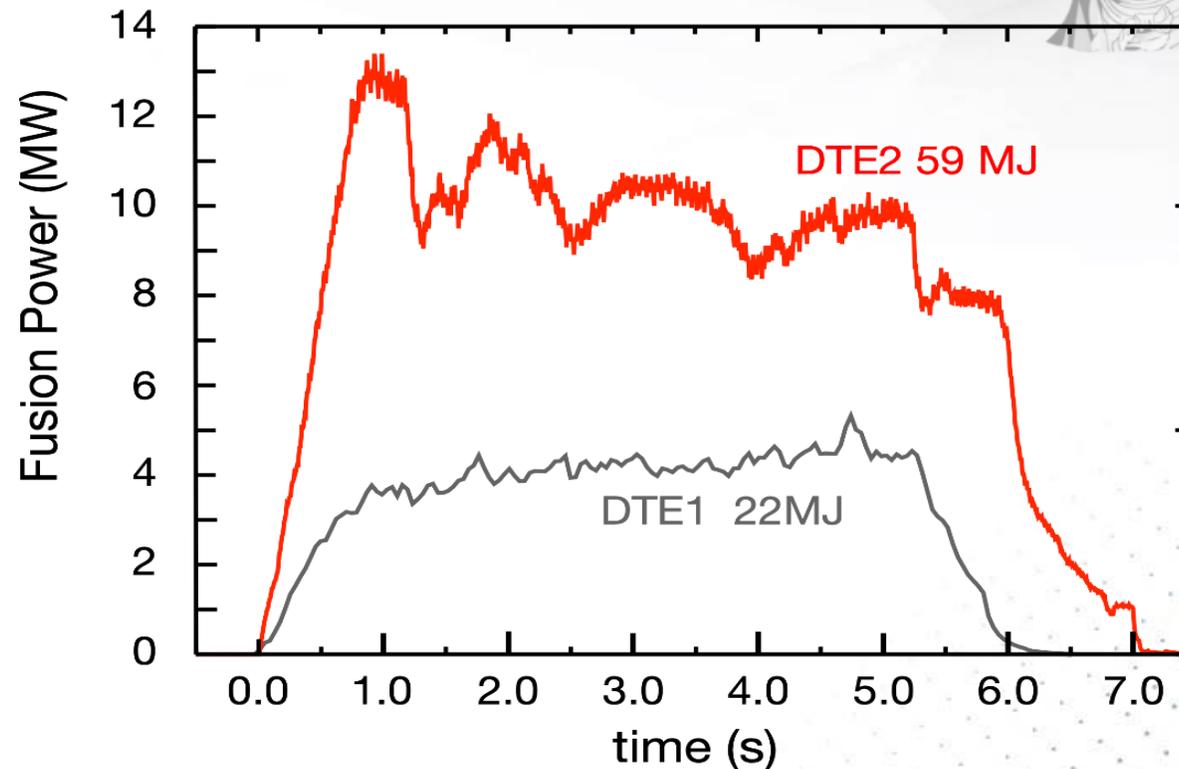
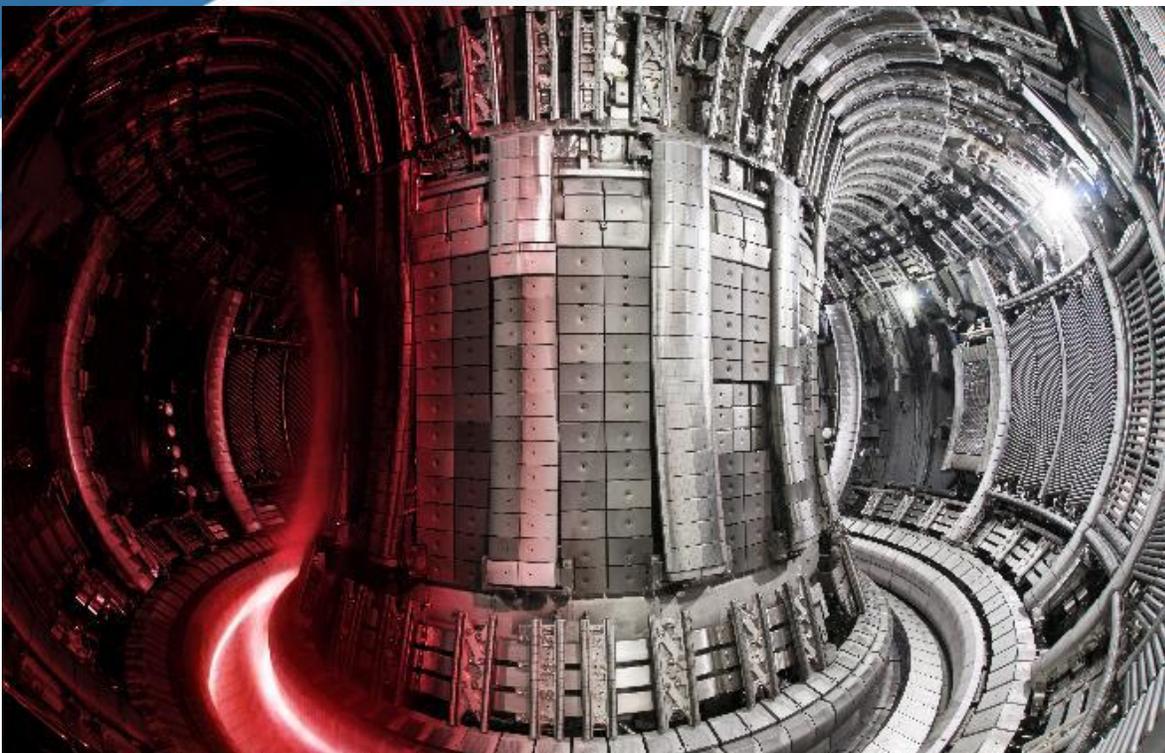


◀ JT-60SA, Japon-UE –
Mise en service en cours

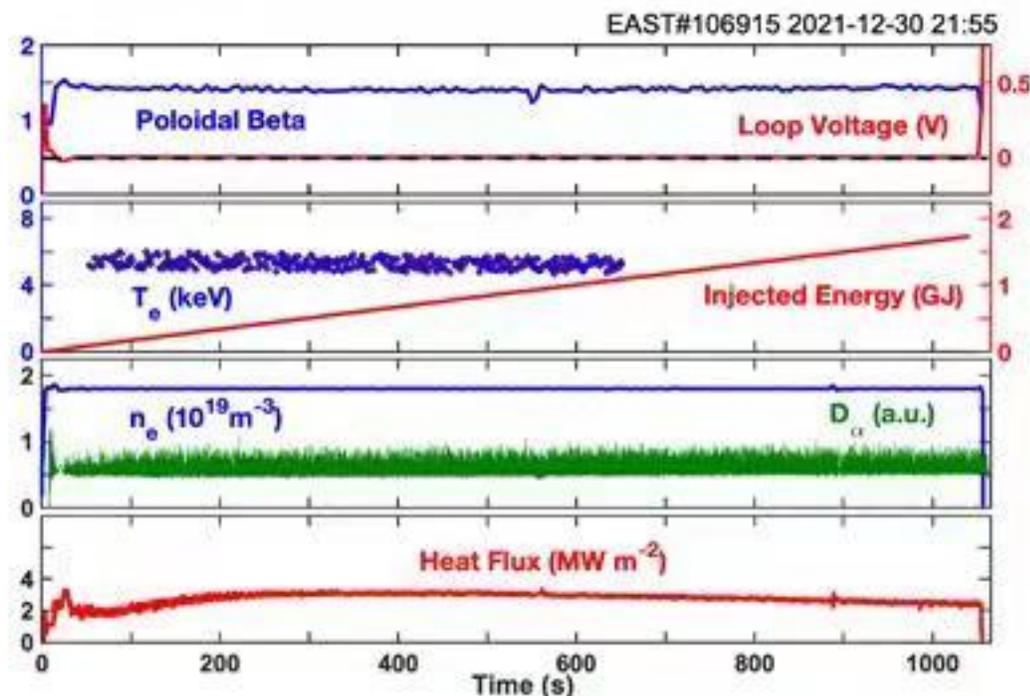
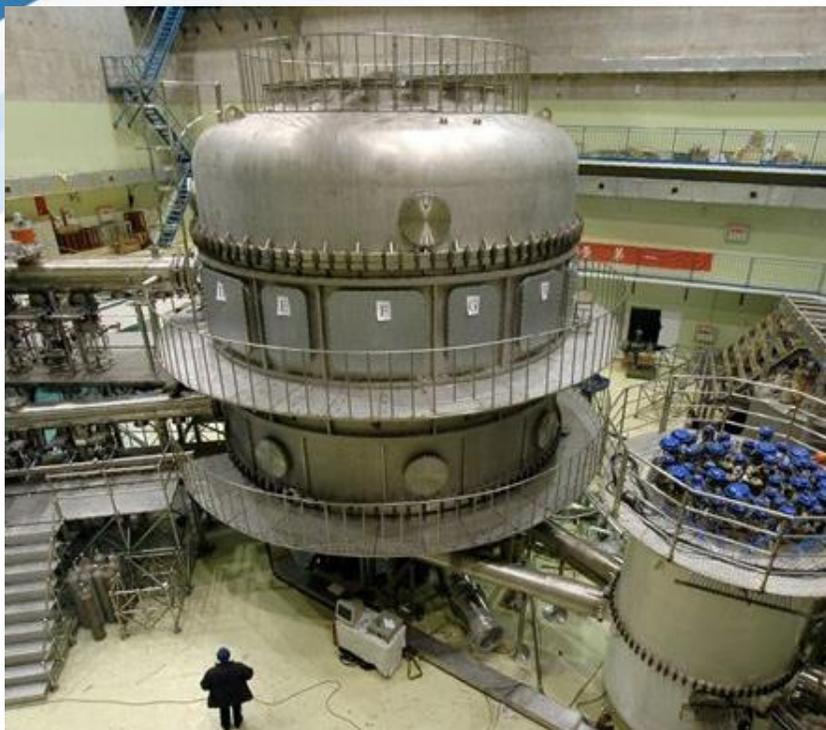
Tore Supra, CEA-Euratom
1988-présent
(devient WEST, banc d'essai
français d'ITER) ▶



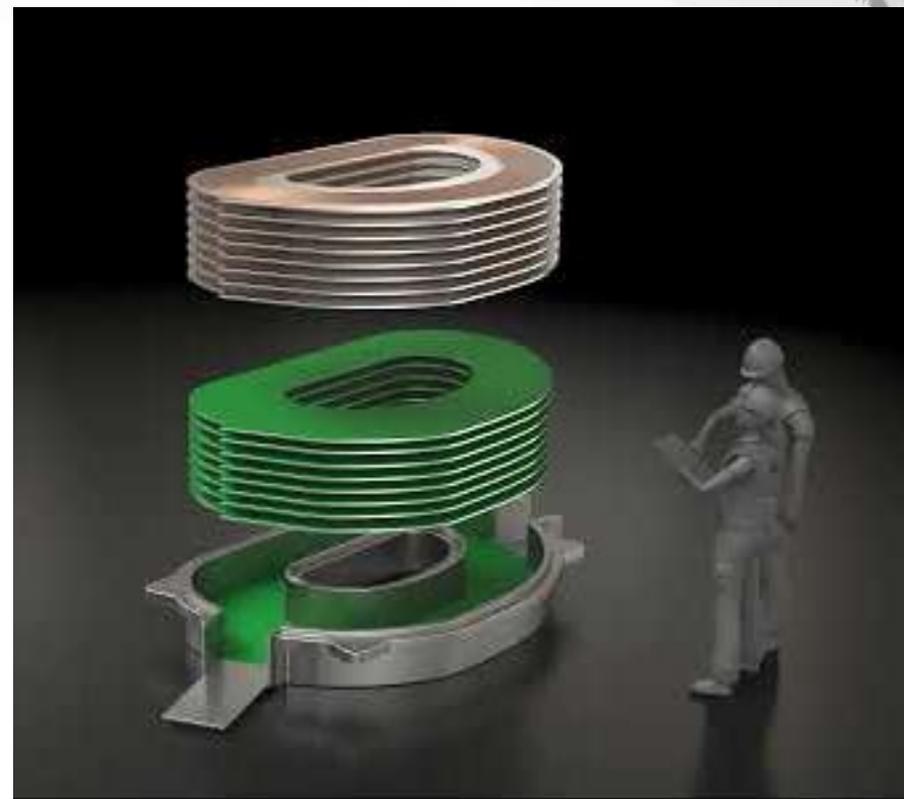
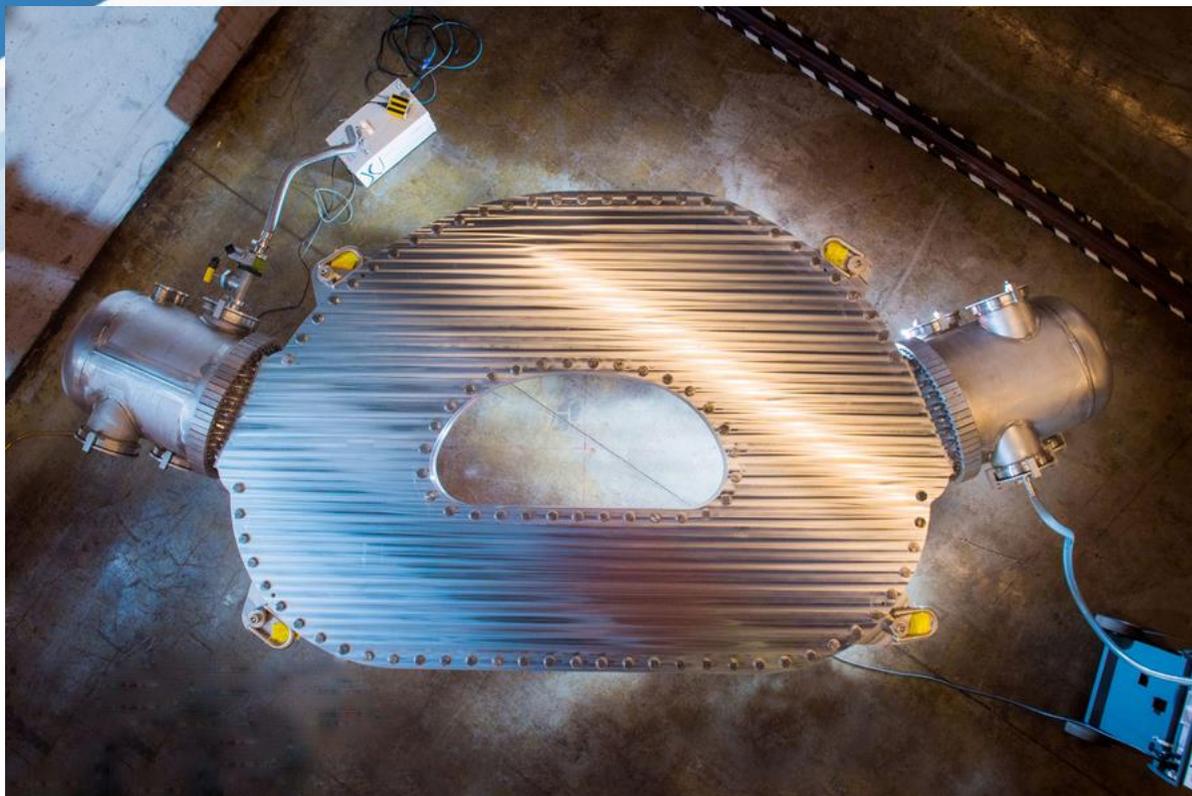
JET DEC. 2021: Nouveau record de 59 MJ de puissance



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 dernier, JET a établi un nouveau record à 59 MJ, confirmant les hypothèses et le futur fonctionnement d'ITER. La fusion, ça marche...



Jumelle de WEST (CEA, F), la machine chinoise EAST utilise les technologies du continu (aimants supraconducteurs, environnement tungstène, refroidissement complet, ...), utilisés par ITER. Au mois de décembre dernier, EAST a établi un nouveau record à 17 minutes (6 minutes sur WEST en 2003), confirmant les hypothèses et le futur fonctionnement d'ITER. La fusion, ça marche...



Le 5 septembre 2021, un aimant supraconducteur à haute température de gros calibre conçu et construit par le CFS et le MIT a atteint un champ de 20 tesla, ouvrant la voie à une réduction de taille des futurs réacteurs. La fusion, ça marche...

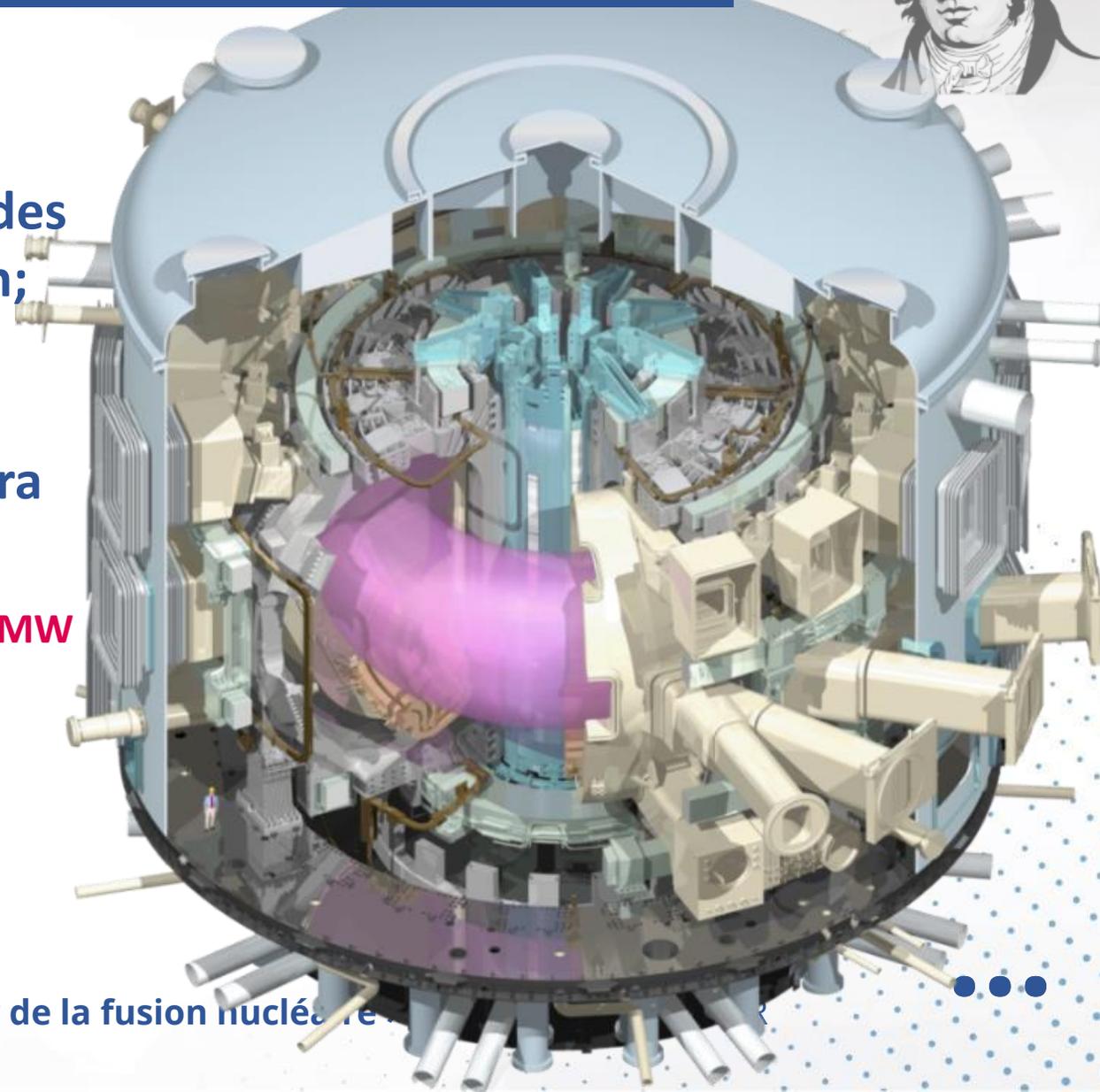


ITER doit démontrer la maîtrise de l'ensemble des technologies requises par un réacteur de fusion;

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

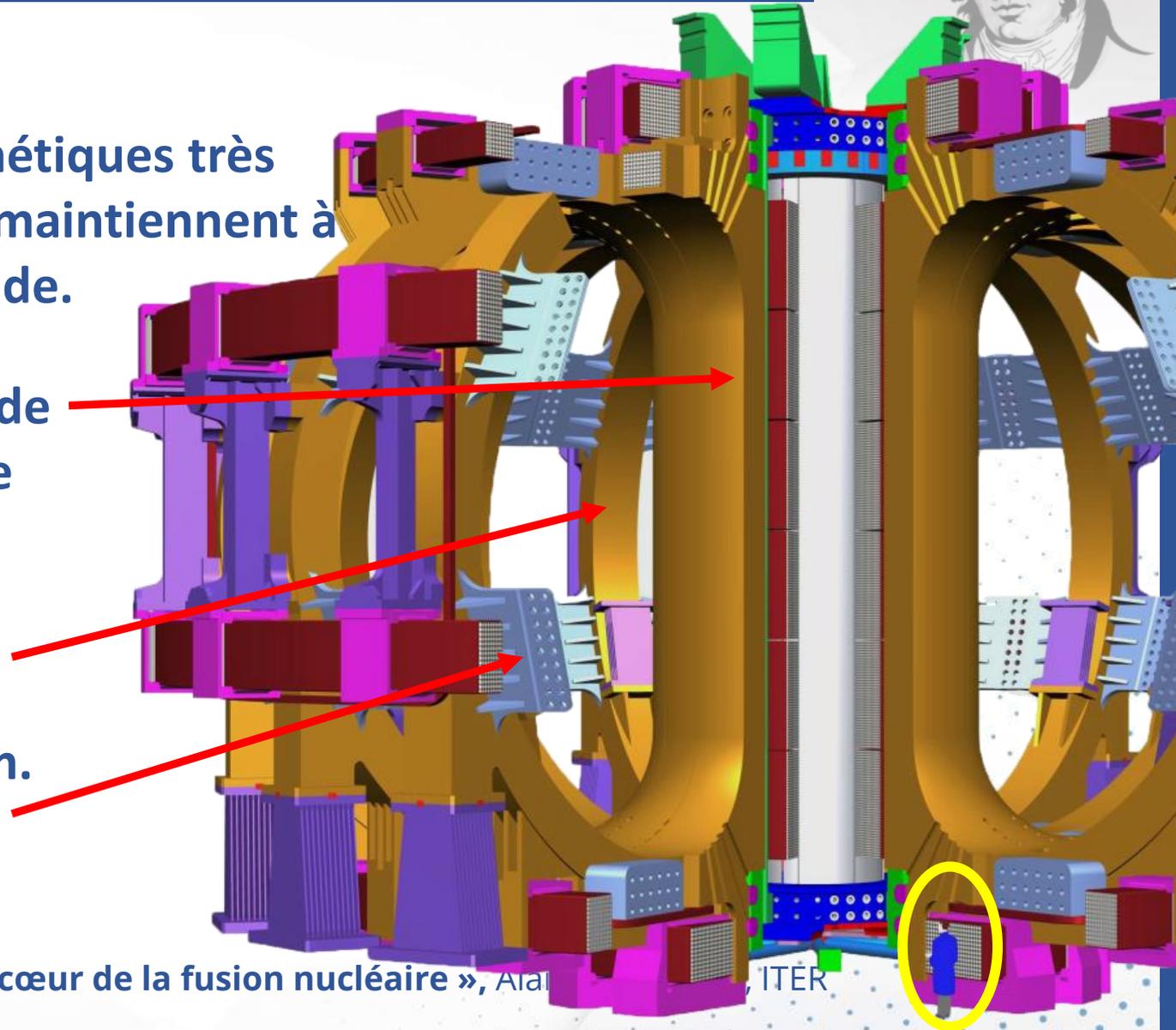
ITER est l'étape systémique indispensable pour ouvrir la voie aux réacteurs de fusion commerciaux.



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.

- 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 m. de diamètre.

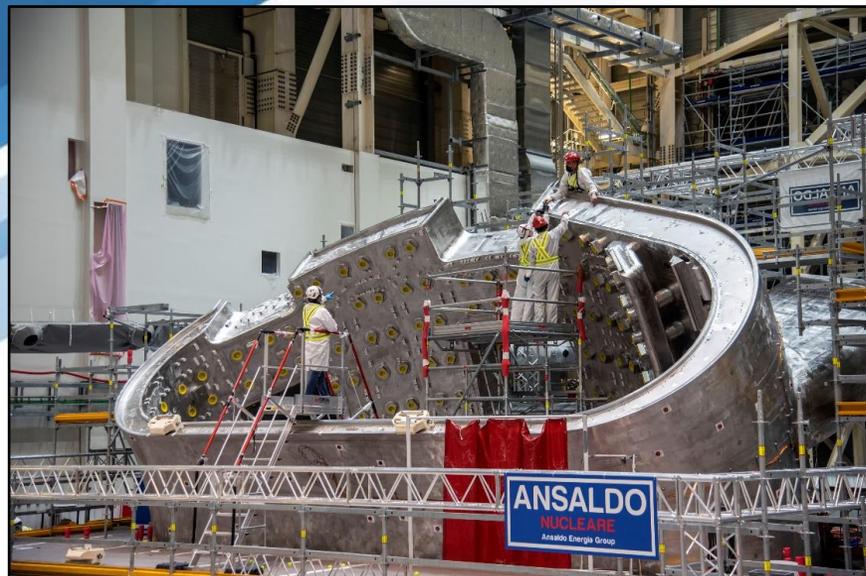


Défi global, réponse globale



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

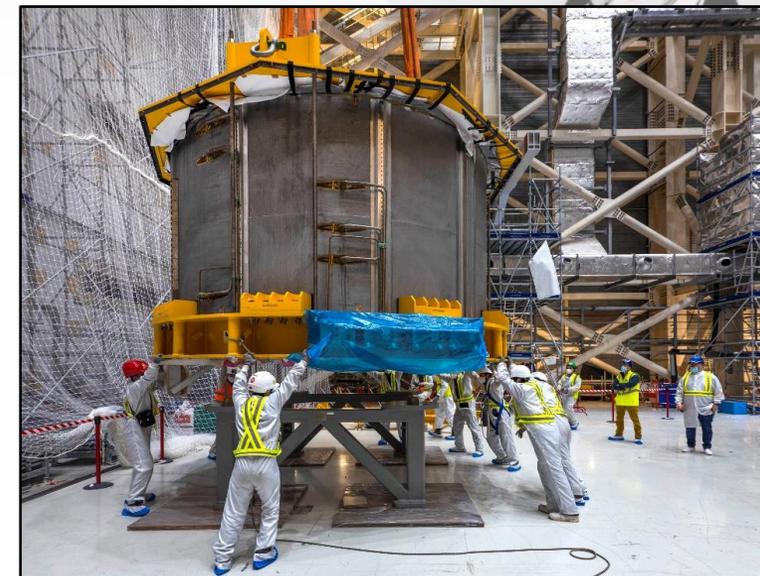
Chine Europe Inde Japon Corée Russie États-Unis



Comme tous les éléments de la machine, ce secteur de chambre à vide livré par la Corée a dû être « équipé » (diagnostics, instrumentation, etc.) avant d'entrer dans la phase de pré-assemblage.



Préalablement à leur installation dans le portique de sous-assemblages, les deux premières bobines de champ toroidal, livrées par le Japon, ont été équipées d'une dizaine de tonnes de d'éléments et de dispositifs divers.



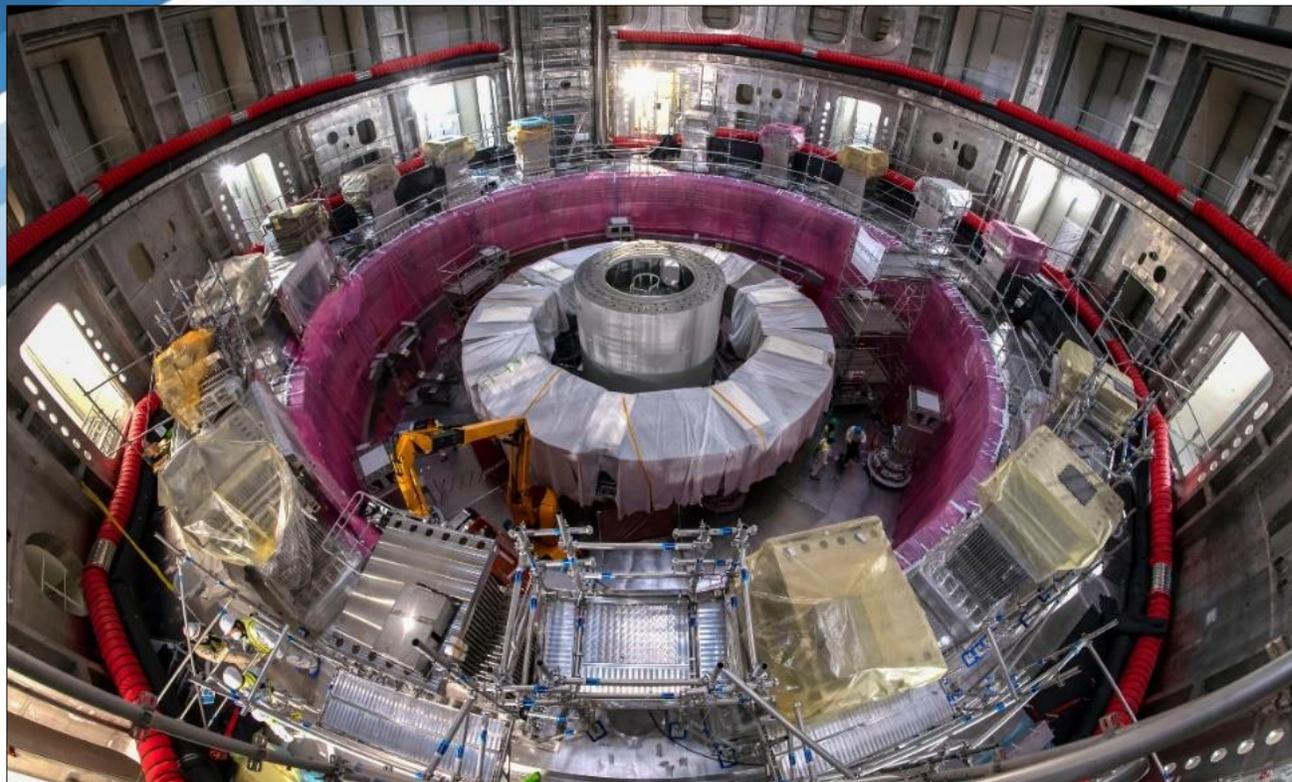
Le 10 février 2022, le premier des six modules du solénoïde central (fourni par les Etats-Unis) a été positionné sur la « table » où seront réalisées les opérations de contrôle et d'équipement.





28 juillet 2020, Emmanuel Macron inaugure virtuellement la phase d'assemblage :
« ITER est un acte de confiance en l'avenir [...] Grâce à la science, demain peut être meilleur qu'hier. »

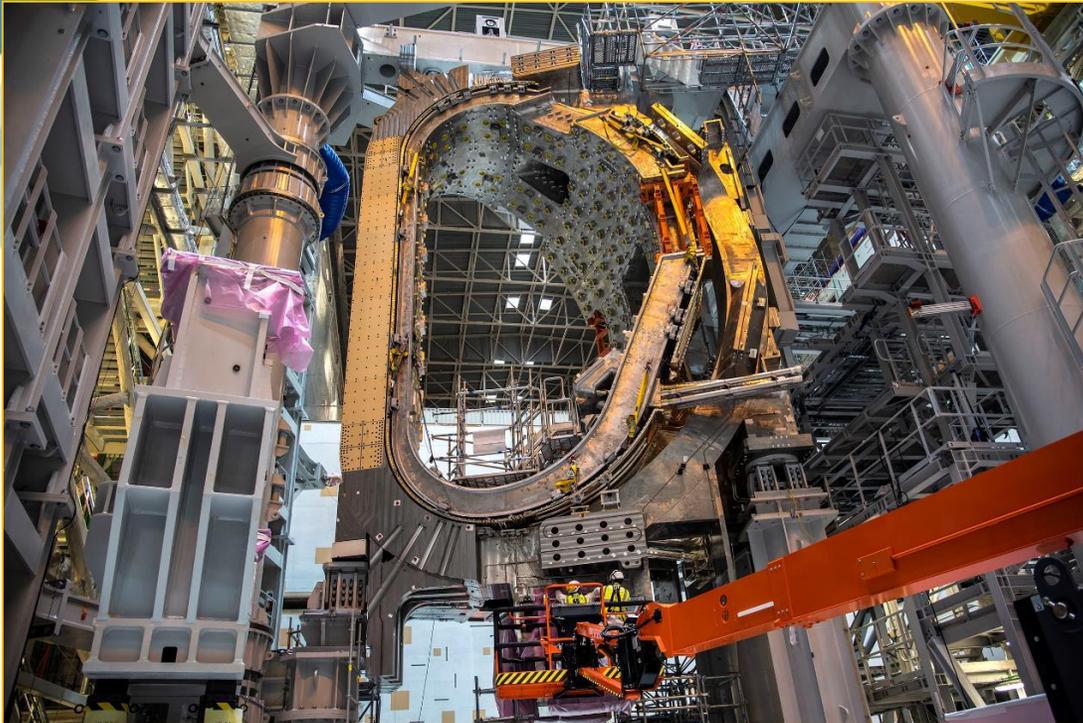




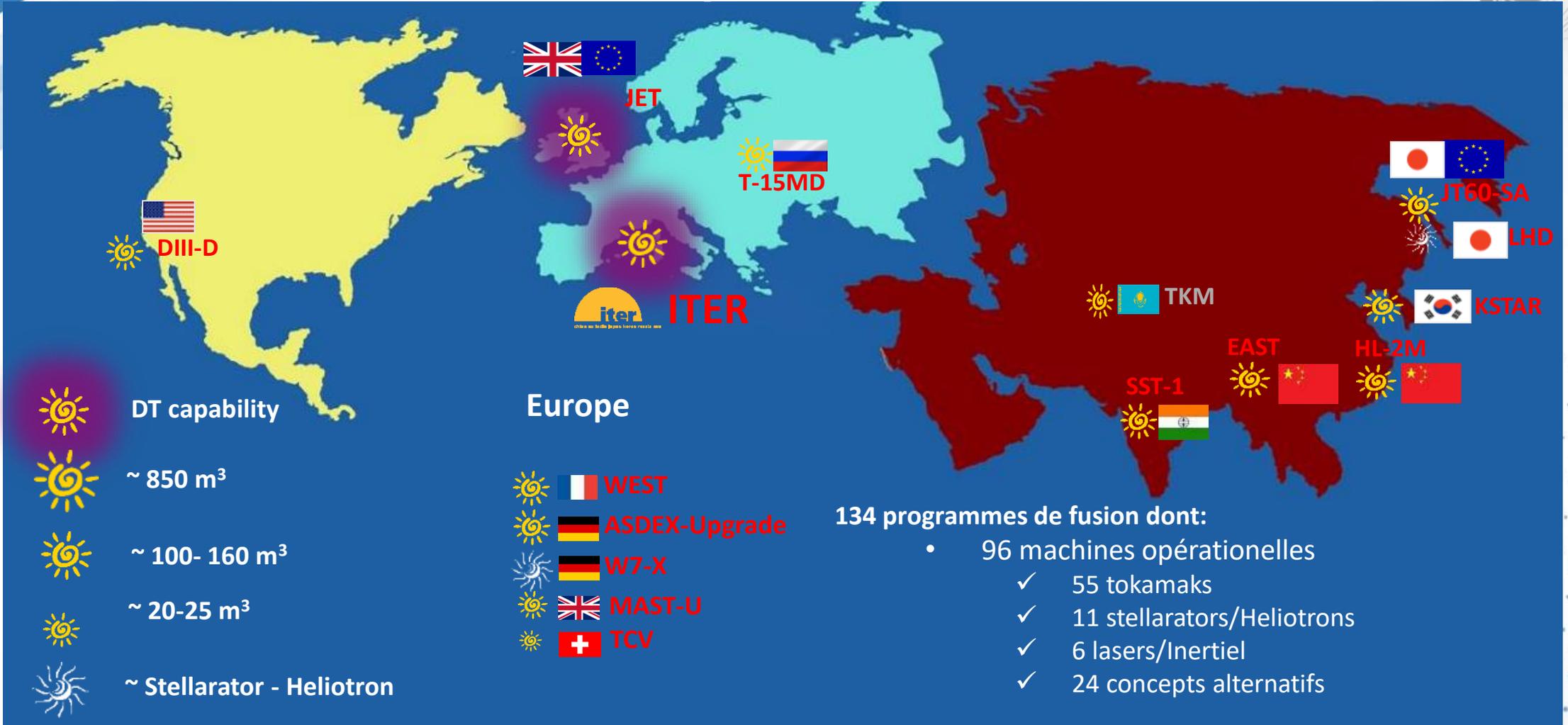
21 avril 2021 – Bobine poloidale n° 6 (10 m Ø – ~440 t)

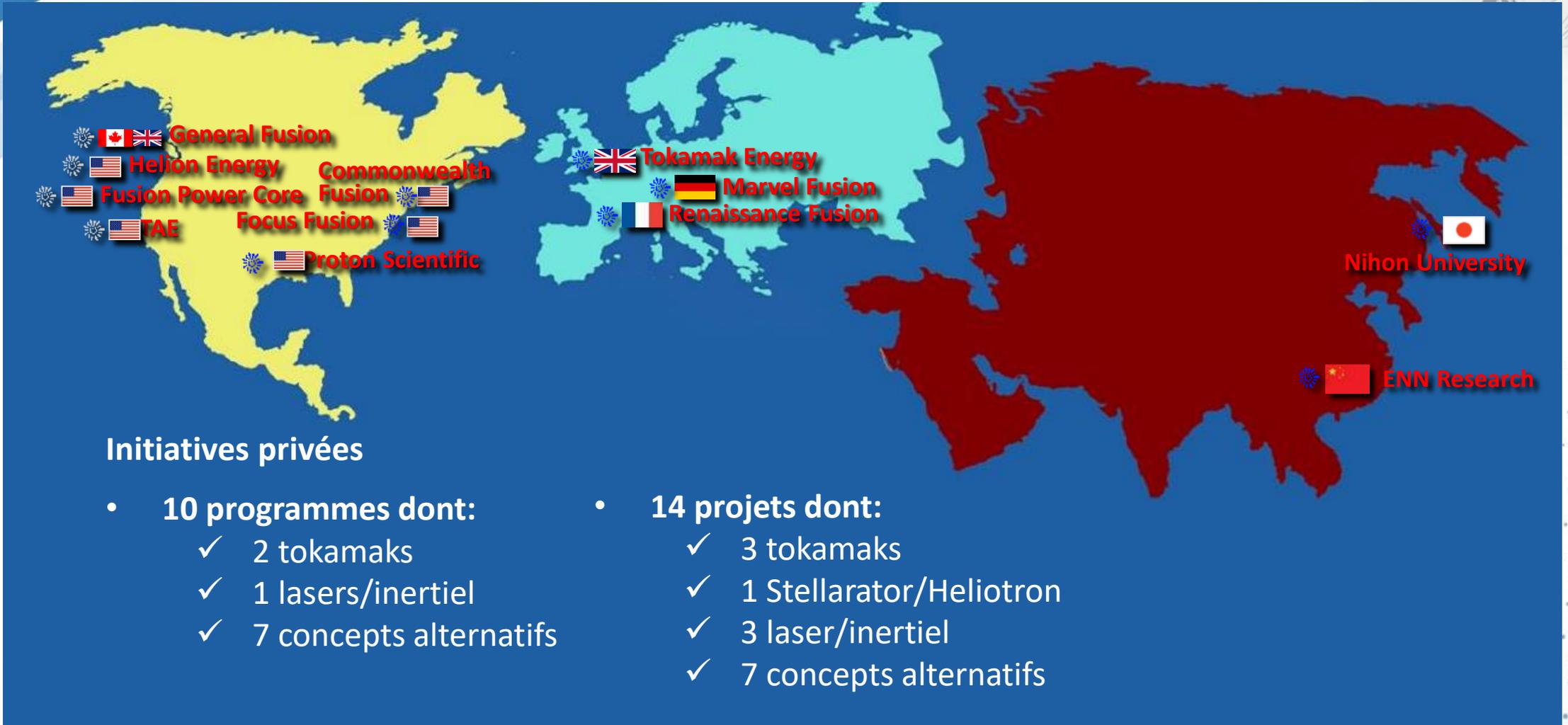


16 sept. 2021 – Bobine Poloidale n° 5 (17m. Ø – ~350 t)



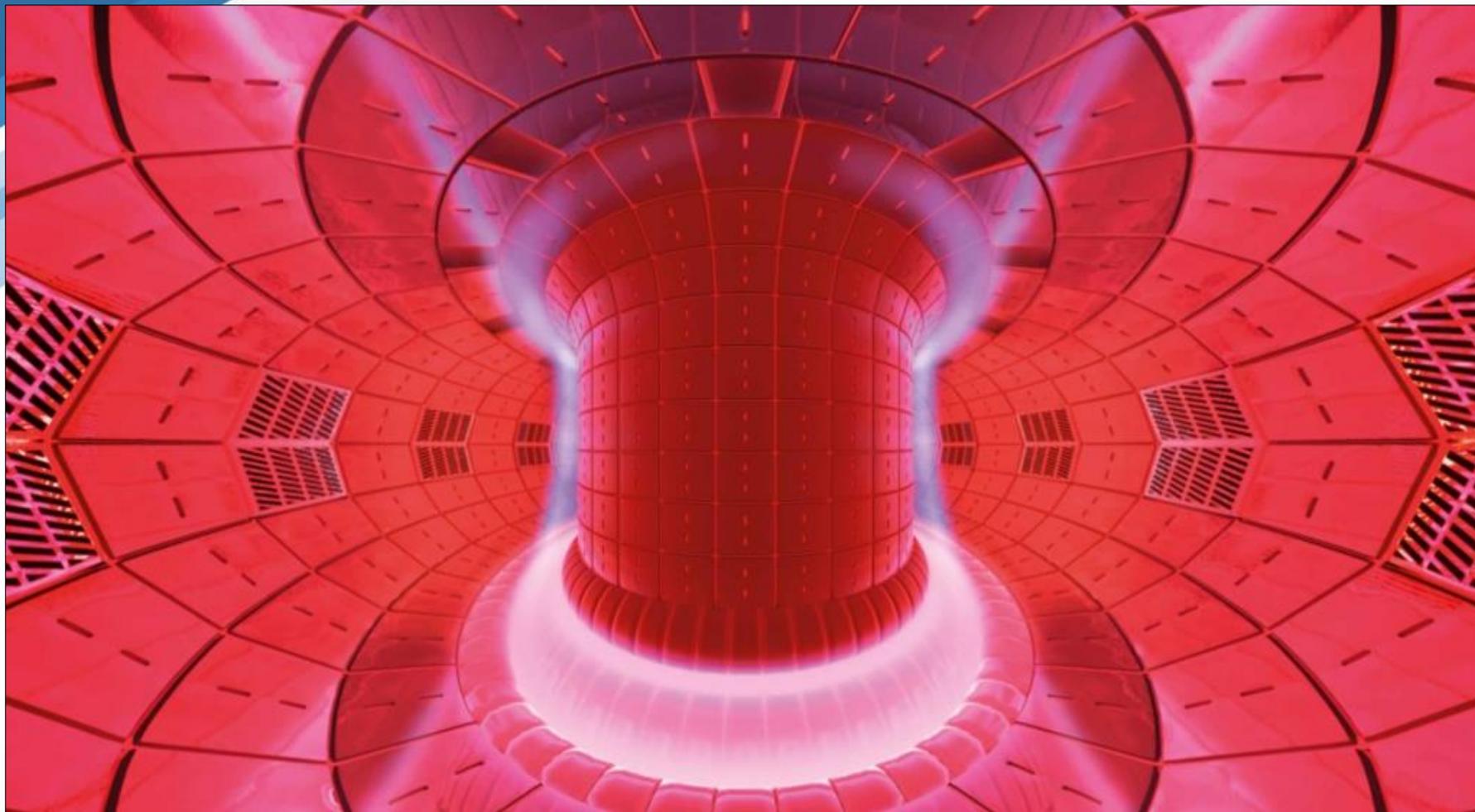
12 Mai 2022 – le premier secteur du tokamak est positionné (~1300 t)





- 10 programmes dont:
 - ✓ 2 tokamaks
 - ✓ 1 lasers/inertiel
 - ✓ 7 concepts alternatifs

- 14 projets dont:
 - ✓ 3 tokamaks
 - ✓ 1 Stellarator/Heliotron
 - ✓ 3 laser/inertiel
 - ✓ 7 concepts alternatifs



Atteindre 500 MW de puissance de fusion pour au moins 400 secondes
(gain d'énergie de 10 au niveau du plasma).

Démontrer la stationnarité de principe en atteignant également 300 MW / 1 heure



ITER Director-General Bernard Bigot chairs High-Level Panel discussion at COP26 on 12 Nov 2021

En Mémoire du

Dr. Bernard Bigot

Directeur Général d'ITER, 2015-2022



china eu india japan korea russia usa



Merci de votre attention

