



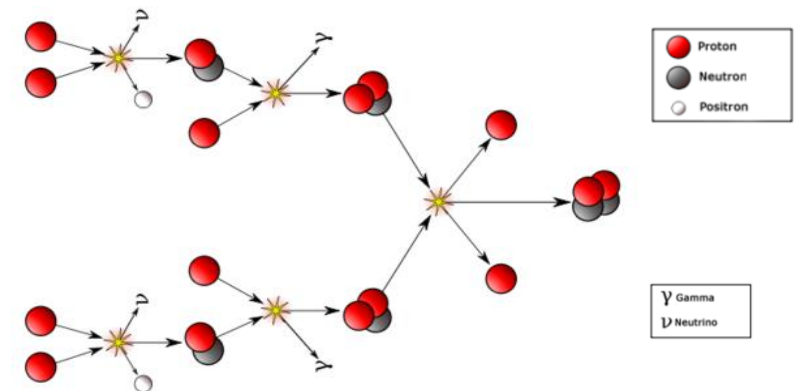
Fusion nucléaire : Les défis d'ITER

Gilles PERRIER, Chef de département Sûreté Qualité - ITER Organization

Conférence débat, Campus A&M, Aix-en-Provence 19 Mai 2026

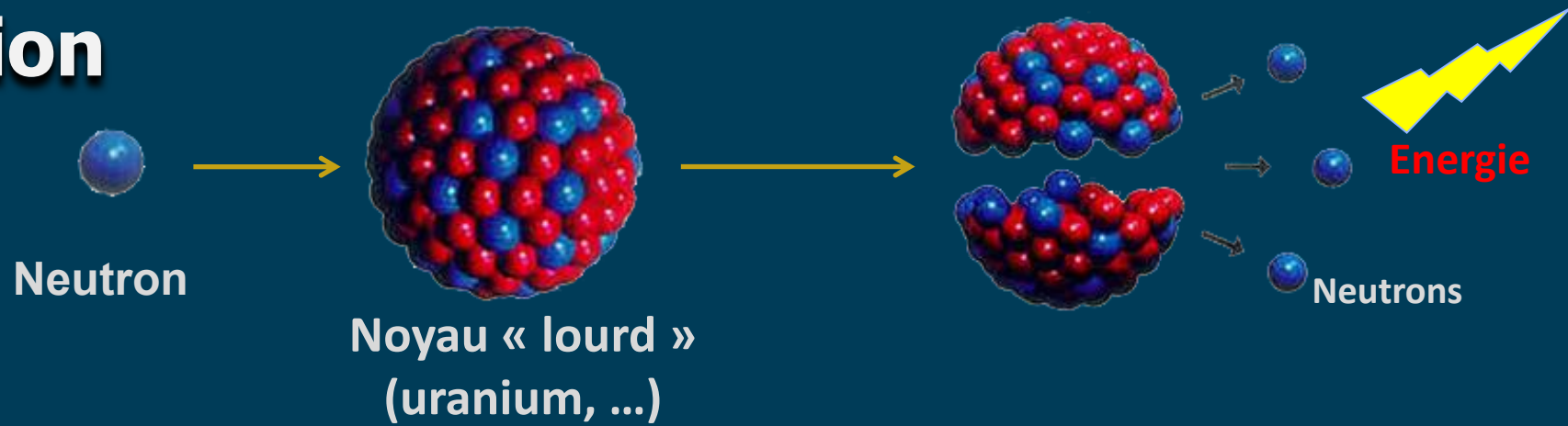
La fusion alimente notre Soleil

- Rayon du Soleil : ~100 rayons terrestres
- Masse du Soleil : 333 000 masses terrestres
- Température de surface : 5 500 °C
- Température centrale ~ 15 millions °C
- **Densité centrale ~ 150 000 kg/m³**
- **Temps de confinement ~1M années**

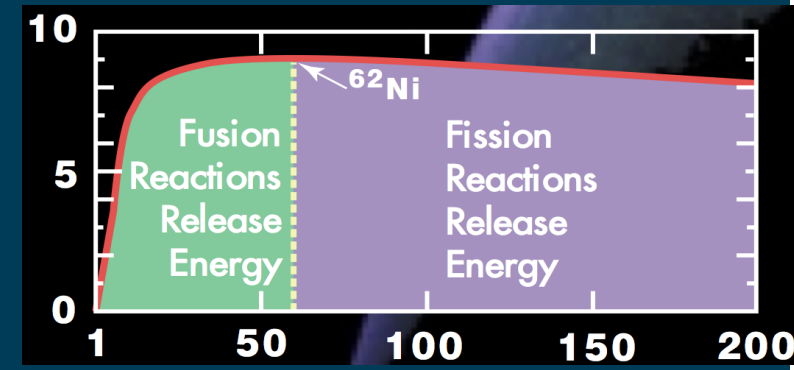
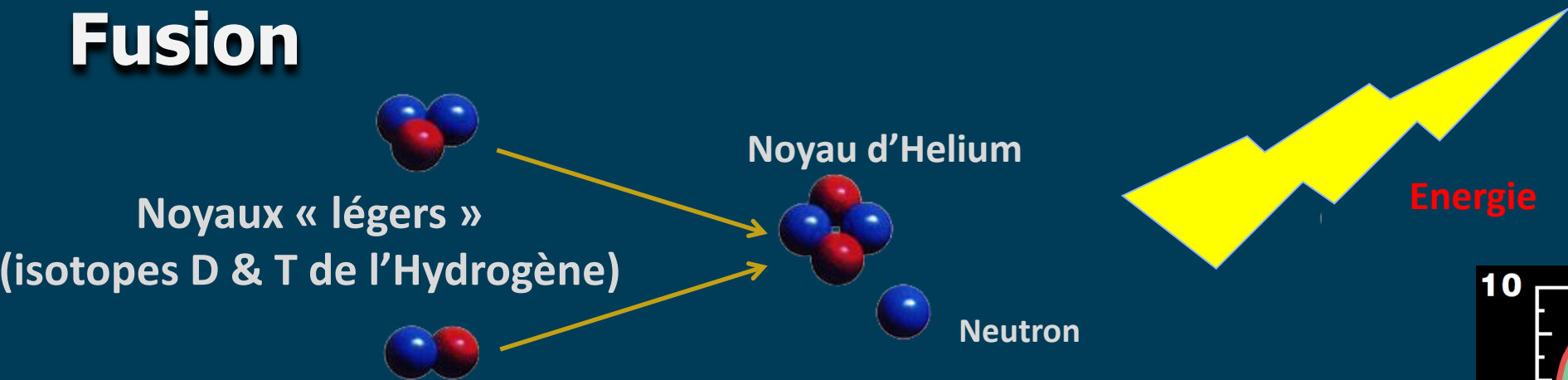


Energie Nucléaire

Fission



Fusion



Confinement du plasma

- Dans le Soleil, le confinement est assuré par les forces gravitationnelles, un mécanisme impossible à reproduire sur Terre. L'humanité a réussi à produire des quantités significatives de fusion nucléaire grâce à deux principales méthodes de confinement:

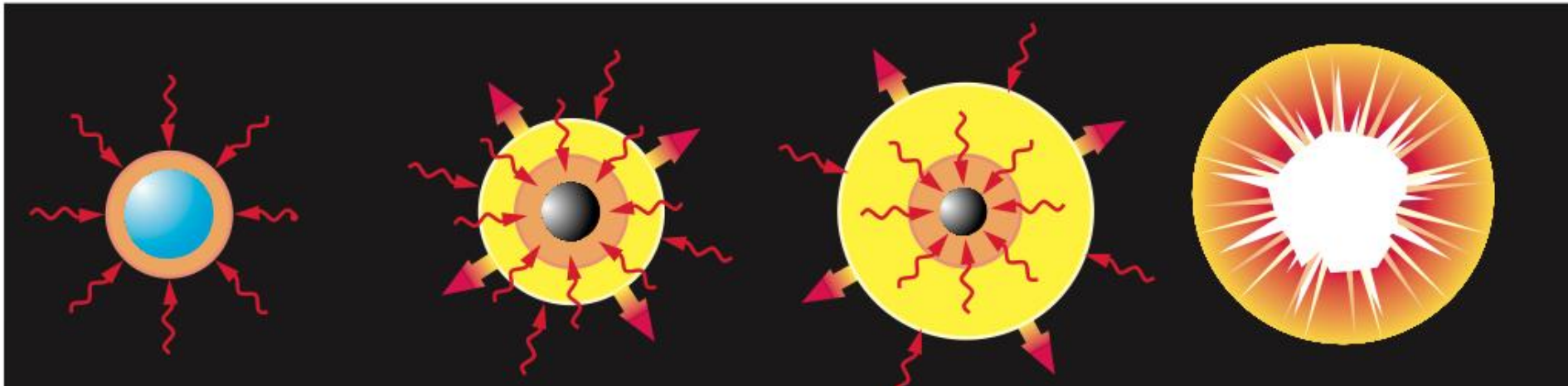
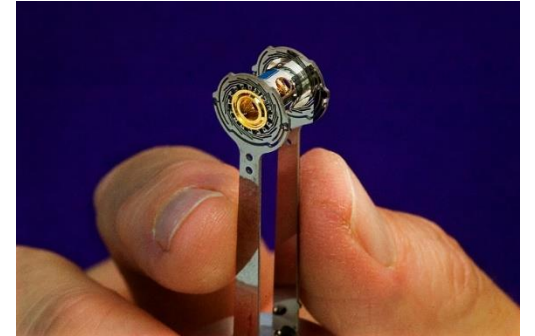
Confinement magnétique – Confinement inertiel

- Dans le confinement inertiel, de minuscules pastilles de combustible **DT** sont rapidement comprimées et chauffées à l'aide de **lasers puissants ou de faisceaux d'ions**. La couche externe de la pastille explose vers l'extérieur, créant une **onde de choc dirigée vers l'intérieur** qui comprime le cœur jusqu'à atteindre les conditions nécessaires à la **fusion**.
- Dans le confinement magnétique, le combustible de fusion est sous forme de **plasma** (gaz ionisé à très haute température). Ce plasma est maintenu confiné dans un volume fermé **grâce à des champs magnétiques**.

Confinement inertiel

L'implosion par laser de petites pastilles solides de deutérium-tritium (≈ 3 mm de diamètre) permet d'atteindre les conditions nécessaires à la fusion.

- **Génération de pression**
- **Compression**
- **Allumage et combustion** : au pic de compression, le combustible atteint une densité d'environ **1000 fois** la densité initiale pendant $\sim 10^{-11}$ s. Le cœur est chauffé et un « **allumage par étincelle** » (**spark ignition**) se produit.



Surface de
chauffage

Compression

Allumage

Combustion

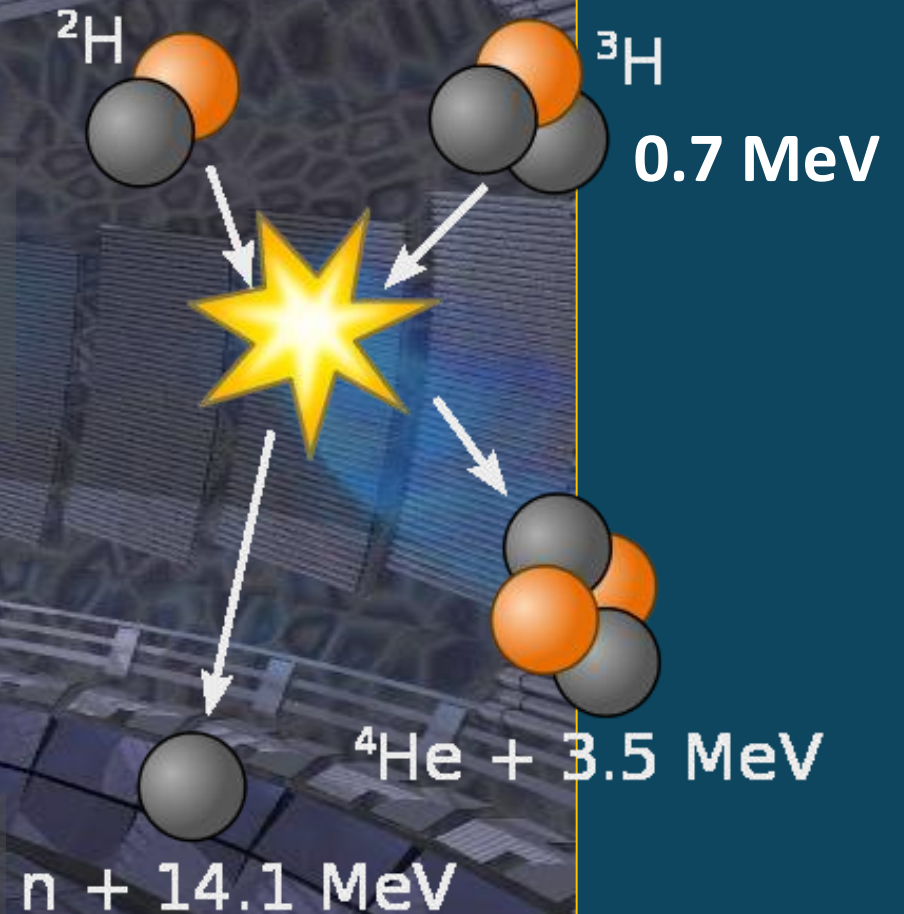
Fusion Magnétique

Densité très faible: 1 milligramme par m³

Température très élevée*: 150 millions de degrés C

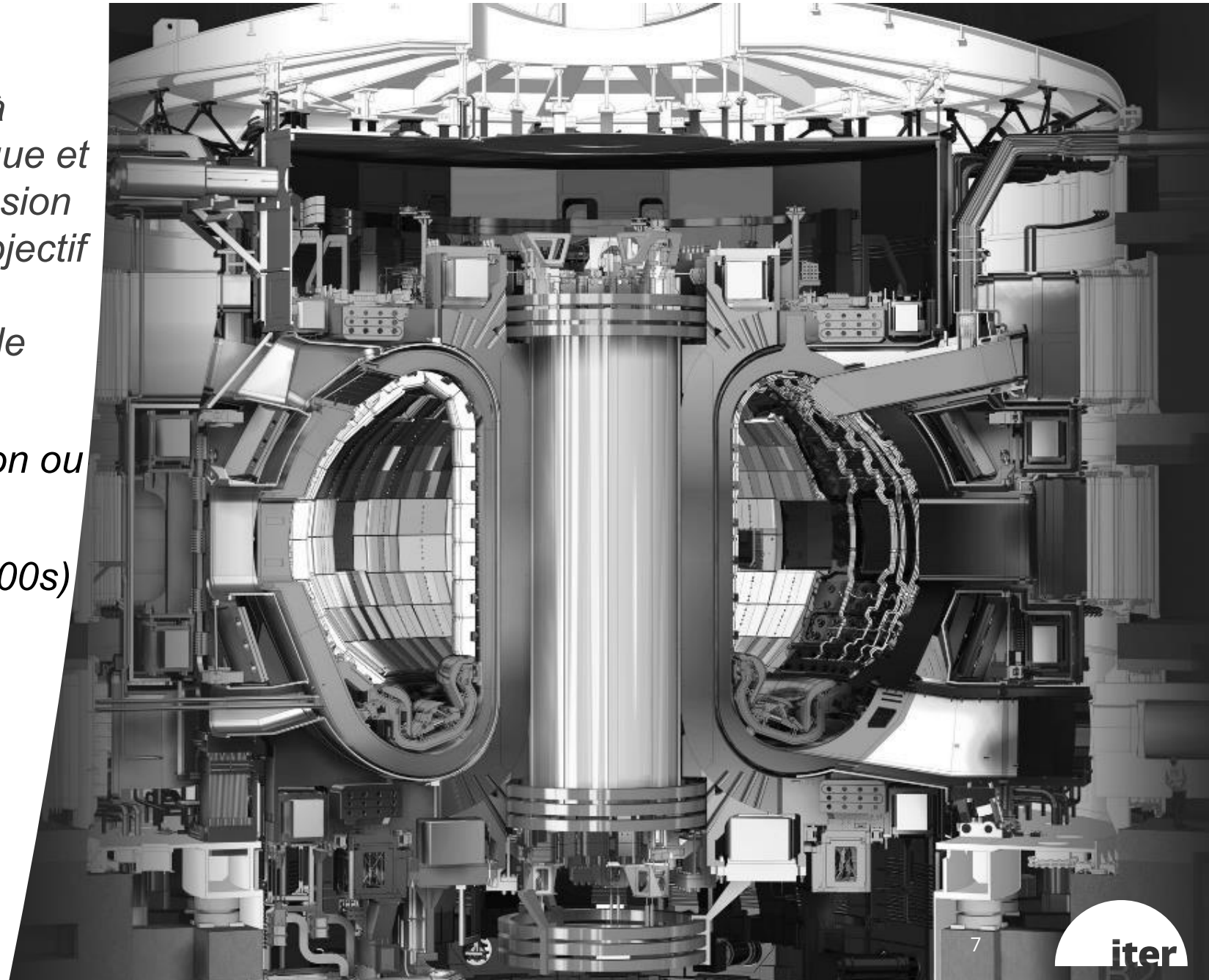
Temps de confinement modéré: quelques secondes

** A de telles températures, les noyaux et les électrons sont totalement dissociés: c'est l'état "**plasma**" de la matière.*



QU'EST-CE QU'ITER?

- ...un projet international visant à démontrer la faisabilité scientifique et technologique de l'énergie de fusion à des fins pacifiques, dont un objectif essentiel est d'atteindre une production soutenue d'énergie de fusion
- Auto-chauffage dominant (*ignition* ou $Q > 10$)
- Equilibre thermique (400s → 3600s)
- Démonstration du concept de production du tritium
- Expérience en matière d'autorisation nucléaire



ITER, c'est QUOI?

Un **tokamak** conçu pour la performance en puissance et en durée.

Une chambre à vide toroïdale de **830m³**, première barrière de confinement.

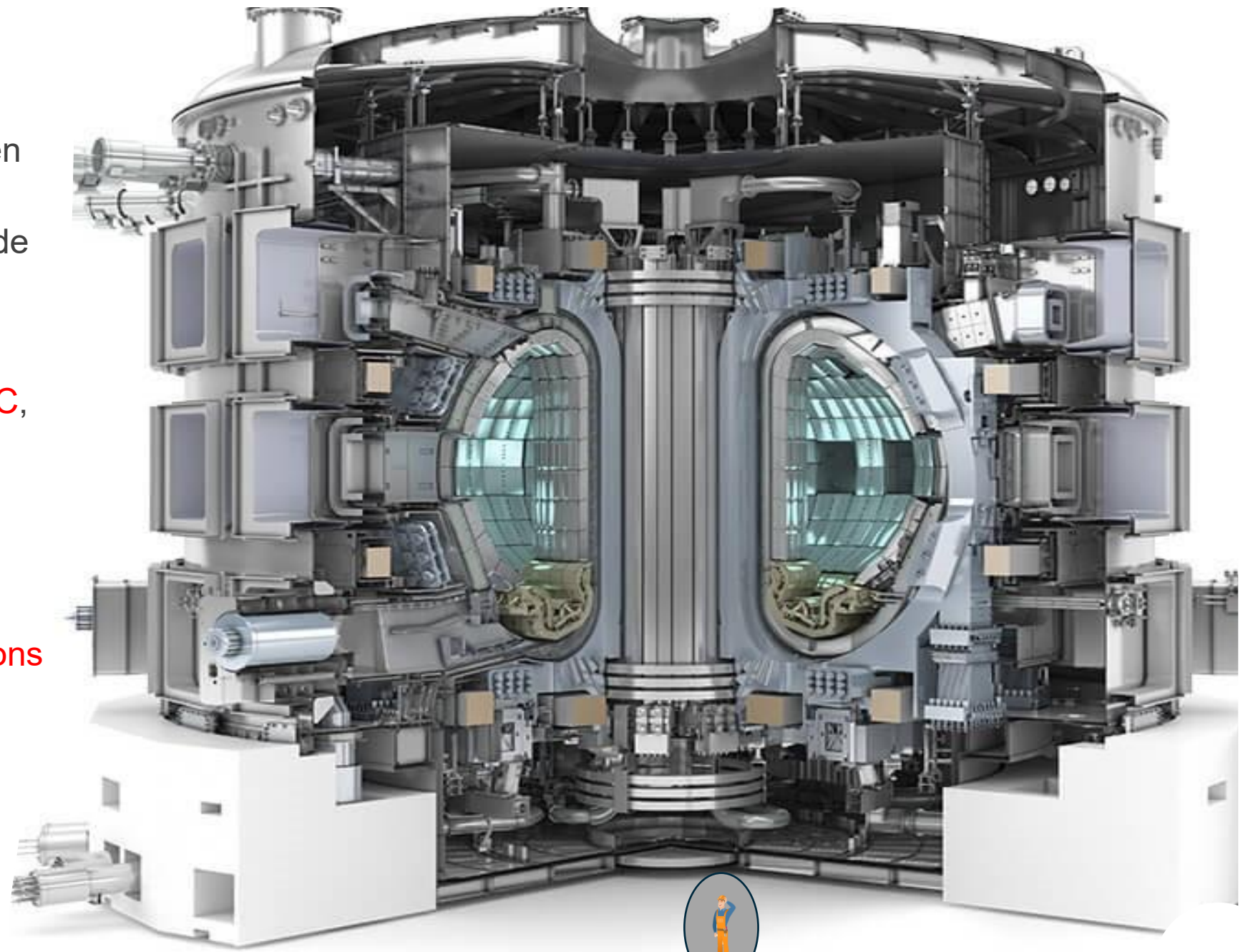
Un aimant supraconducteur de **10 000 tonnes**, refroidi à **-269°C**, enfermé dans un **cryostat** de **30mx30m**.

La plus grosse **unité de réfrigération** au monde

Un plasma de **deutérium** et de **tritium**, chauffé à **100-150 millions de degrés**.

Des auxiliaires fournissant **chauffage, combustible, diagnostics, contrôles**, etc.,

Une évacuation continue de la chaleur (**10-20 MW/m² sur le divertor**).

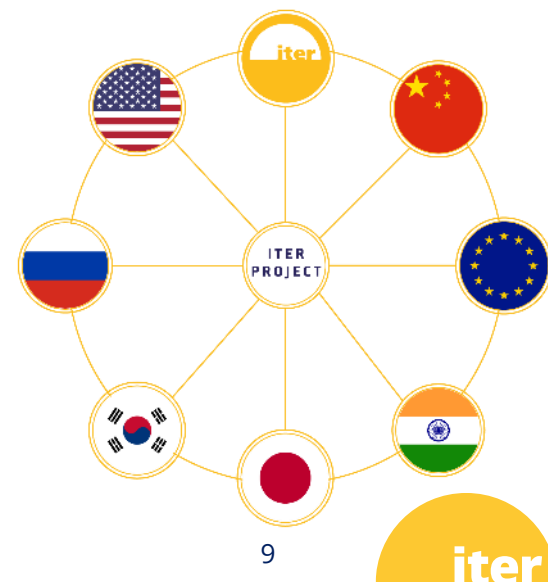


30 m



Un défi générationnel

- Une collaboration internationale sans équivalent dans l'histoire
- Les membres contribuent en grande partie en nature
- L'Europe, en tant qu'hôte, finance 45 %. Tous les autres membres financent 9 %.



China EU India Japan Korea Russia USA

DE L'INTENTION ... à LA REALISATION

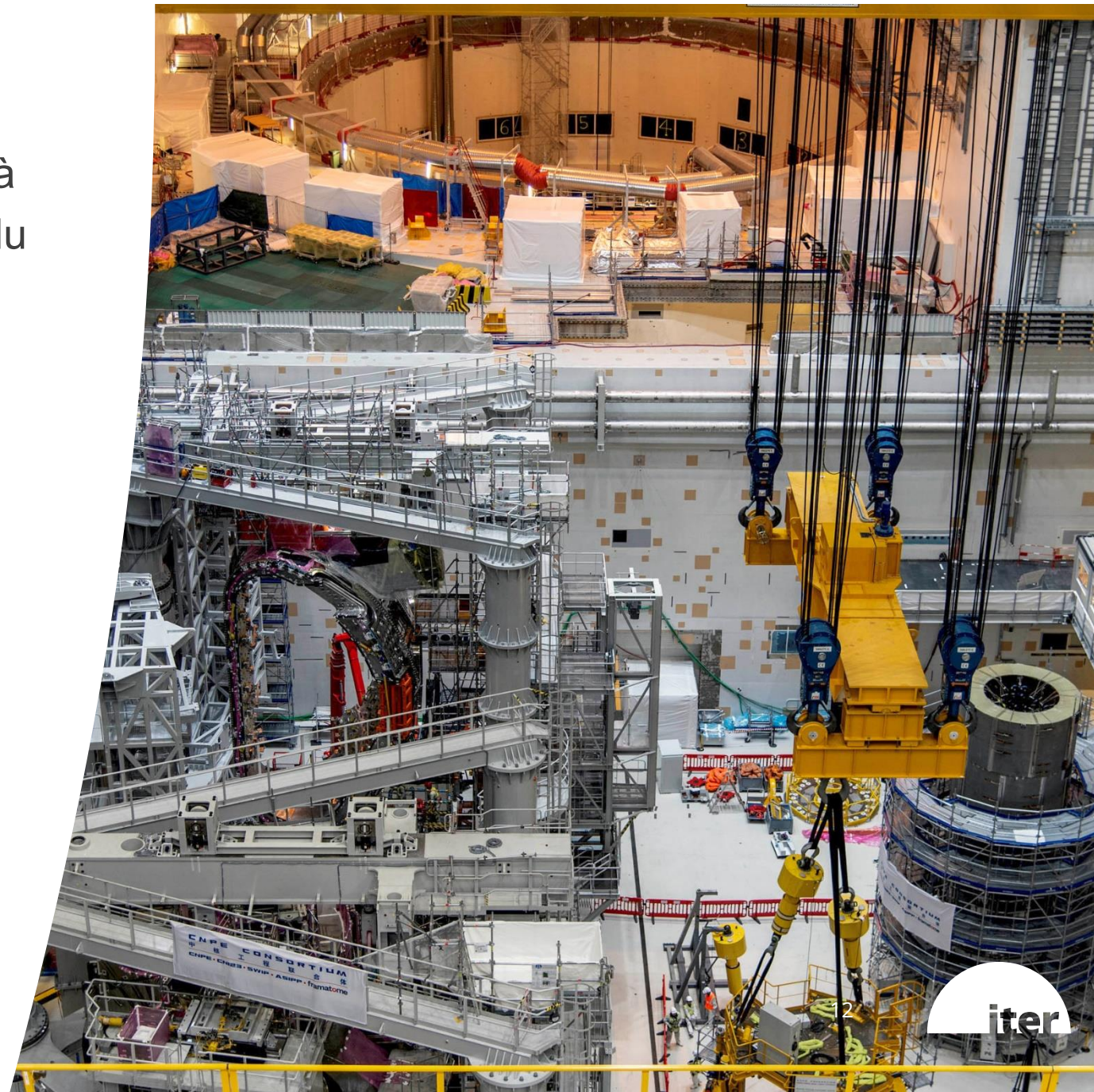




**CONSTRUCTION ET MISE EN SERVICE DU SITE~ 5 000
employés et sous-traitants travaillent chaque jour sur le site**

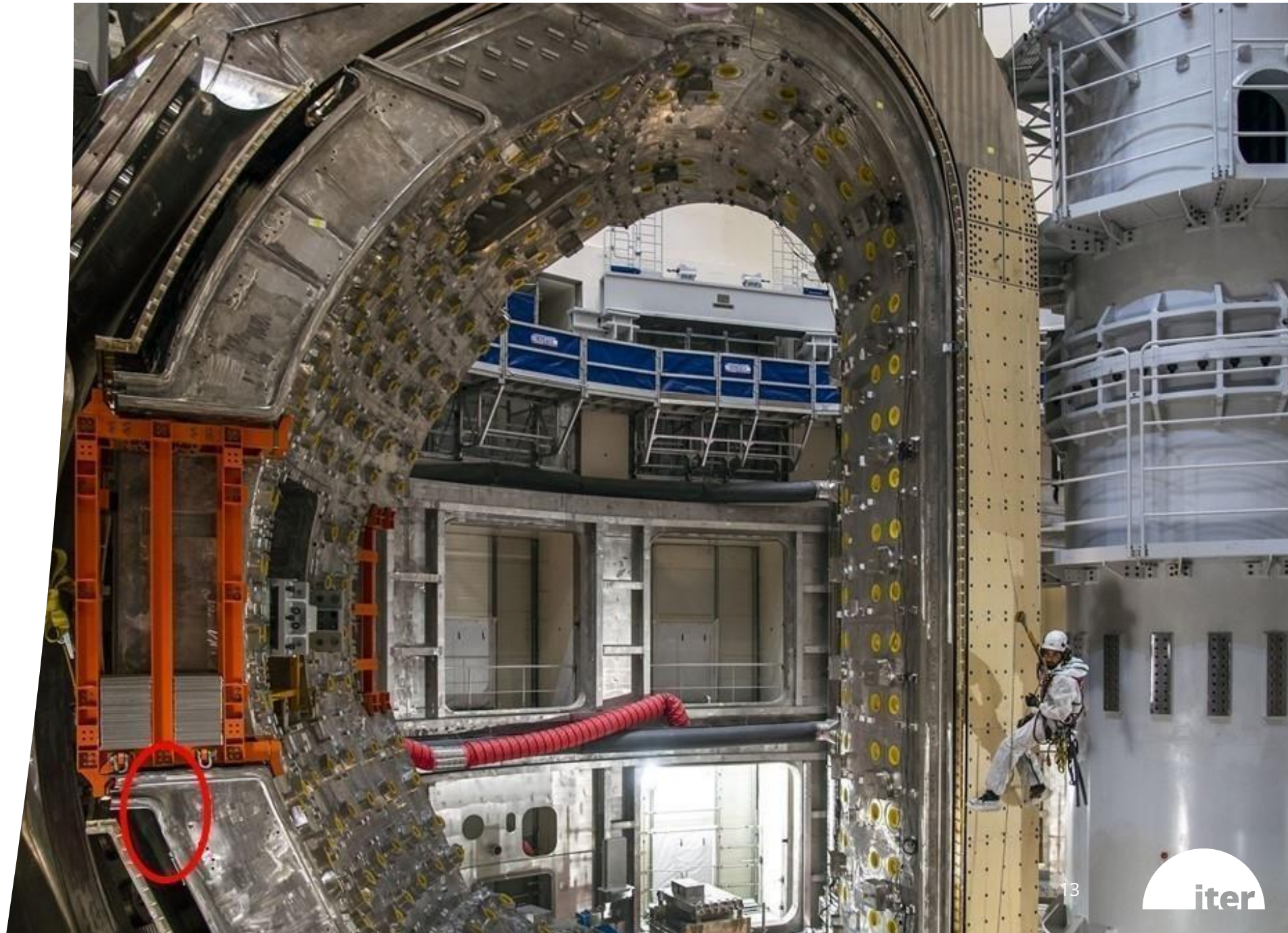
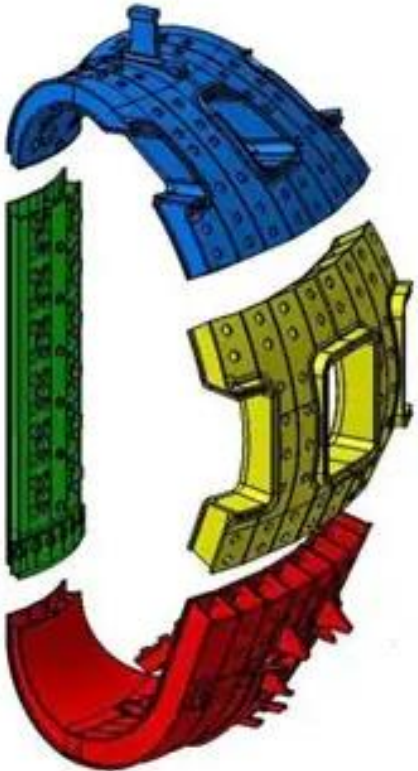
Il y a trois ans...

- Réparations des chanfreins de la chambre à vide et des tuyauteries de refroidissement du bouclier thermique
- Rétablissement de la confiance avec l'autorité de sûreté
- Gestion des conséquences d'une performance historiquement insuffisante dans l'exécution du projet
 - Révision des contrats d'assemblage
 - Réorganisation
 - Renforcement des effectifs
- Élaboration d'une nouvelle référence de projet (Baseline)



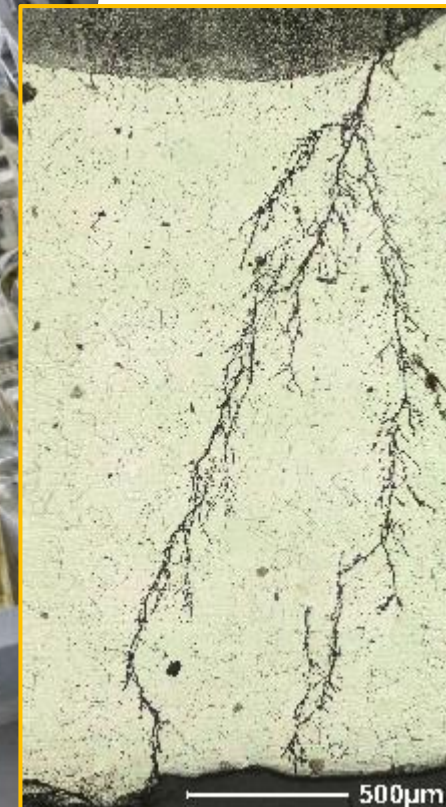
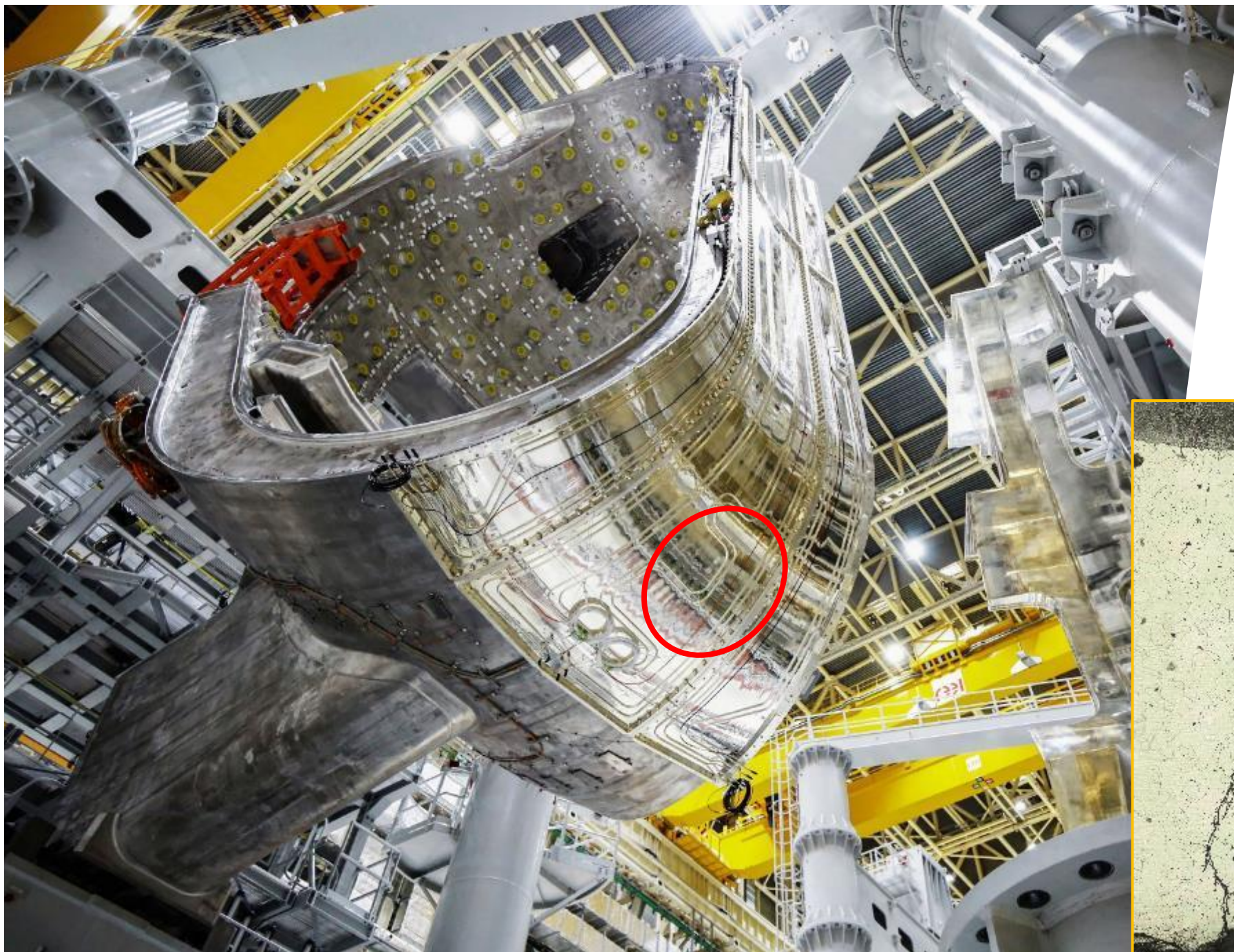
DEFIS TECHNIQUES COMPOSANTS “FIRST-OF-A-KIND”

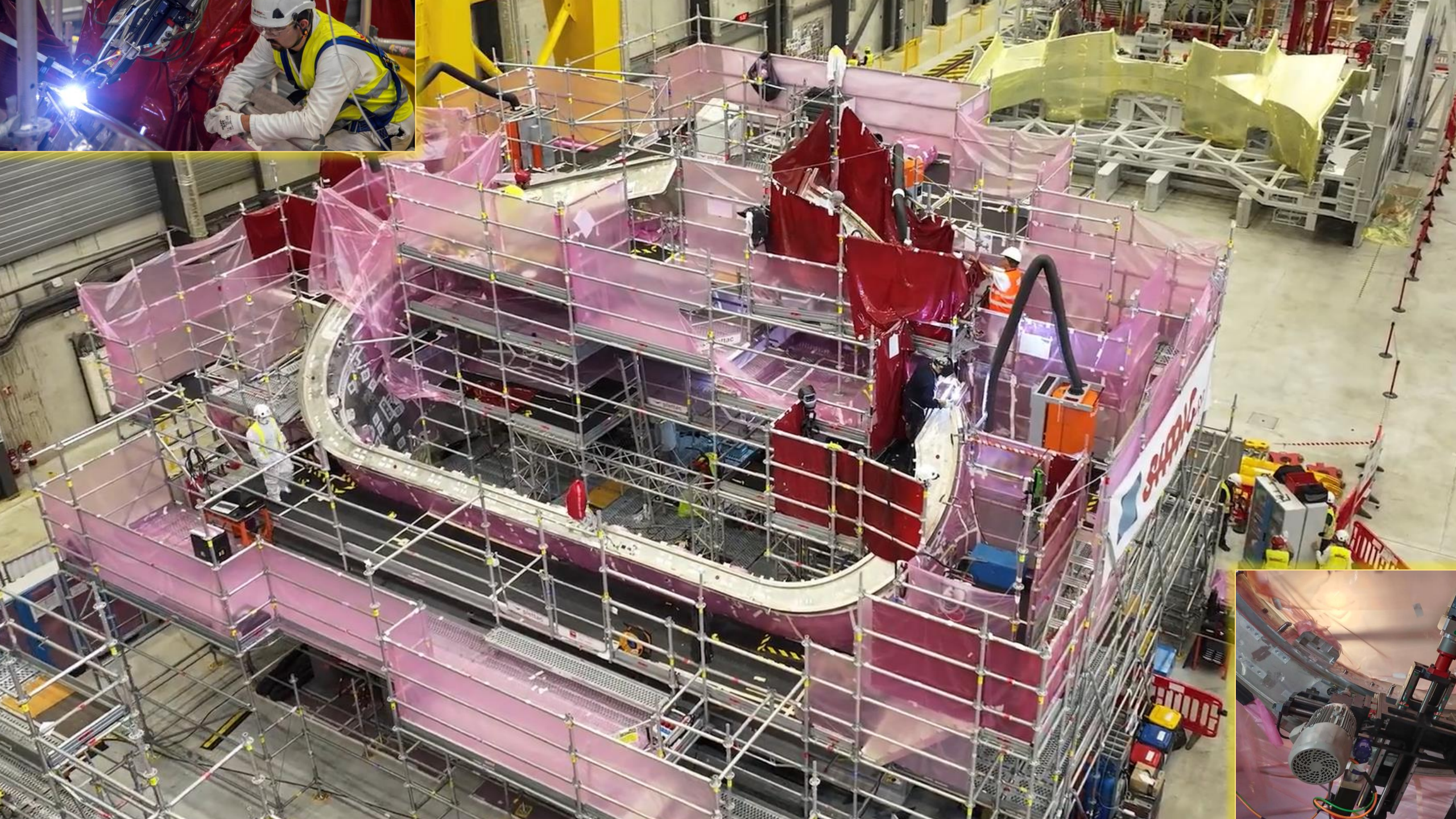
Non-conformités
dimensionnelles des
chanfreins des secteurs de
la chambre à vide



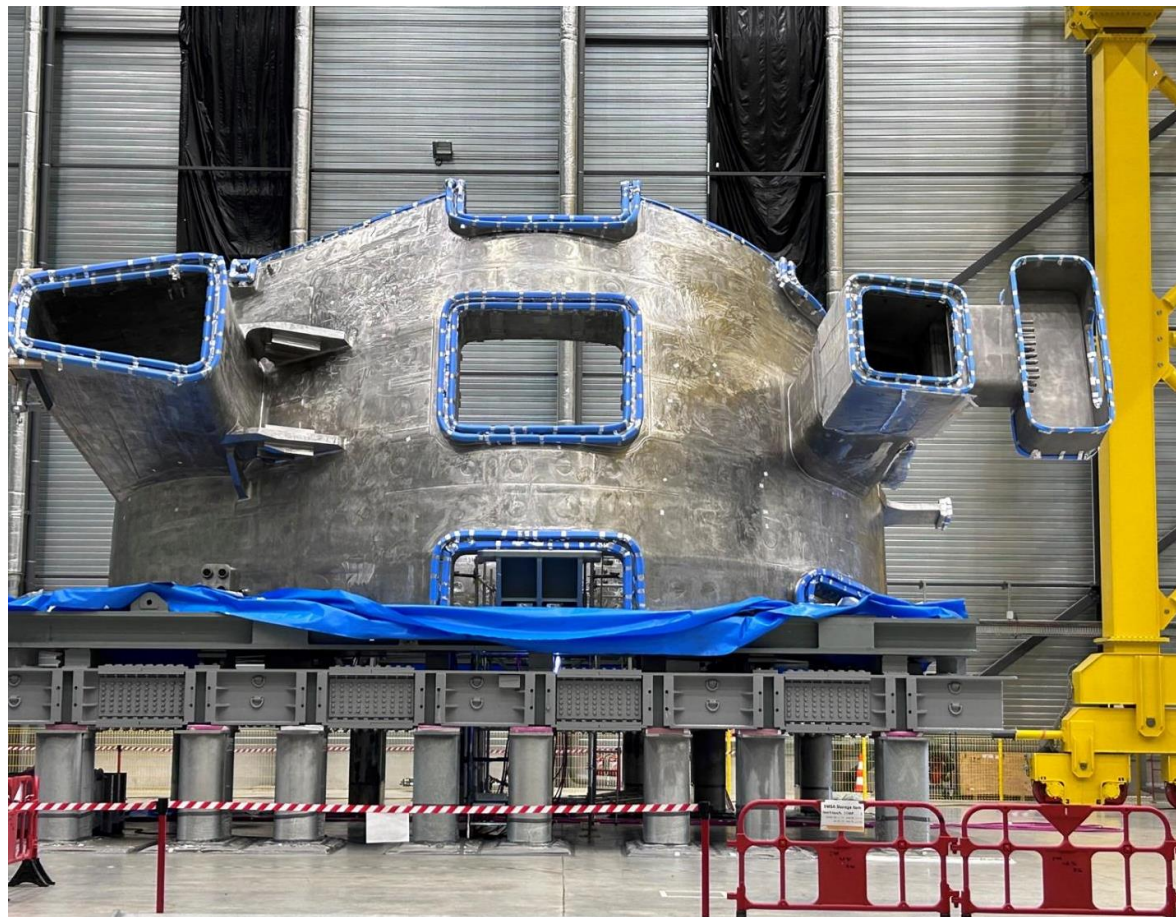
DEFIS TECHNIQUES COMPOSANTS “FIRST-OF-A-KIND”

Corrosion sous contrainte
sur les tuyauteries de
refroidissement du bouclier
thermique

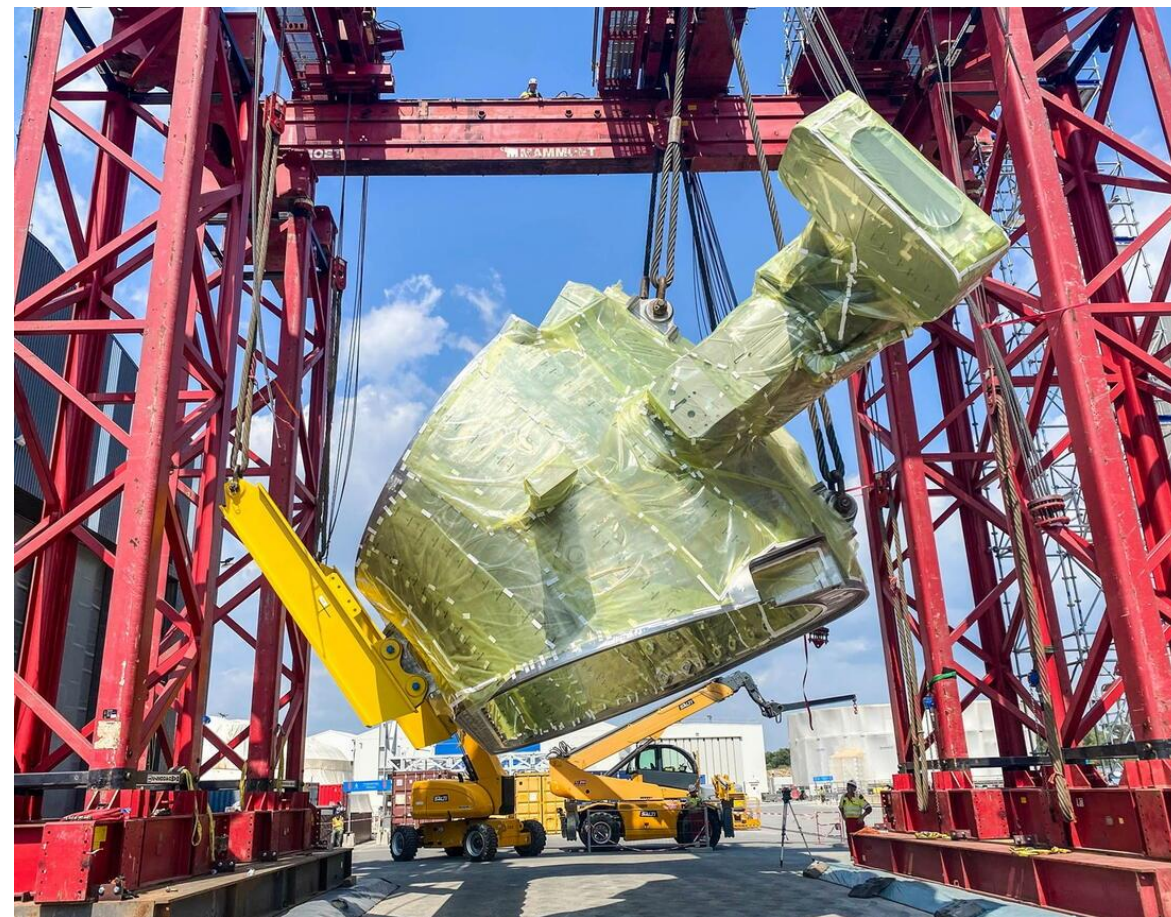




SECTEURS DE LA CHAMBRE À VIDE



La Corée a livré ses quatre secteurs.



L'Europe a livré quatre secteurs ; le premier en octobre 2024. Le deuxième a été livré en mai 2025 — présenté ici en cours de rotation pour des réparations sur la surface du chanfrein. Le cinquième et dernier sera livré en automne.



Installation du troisième module de secteur (n°5) le 24 novembre 2025.
Le quatrième secteur a été déplacé dans le puits le 28 janvier 2026.



ASSEMBLAGE DU SOLÉNOÏDE CENTRAL

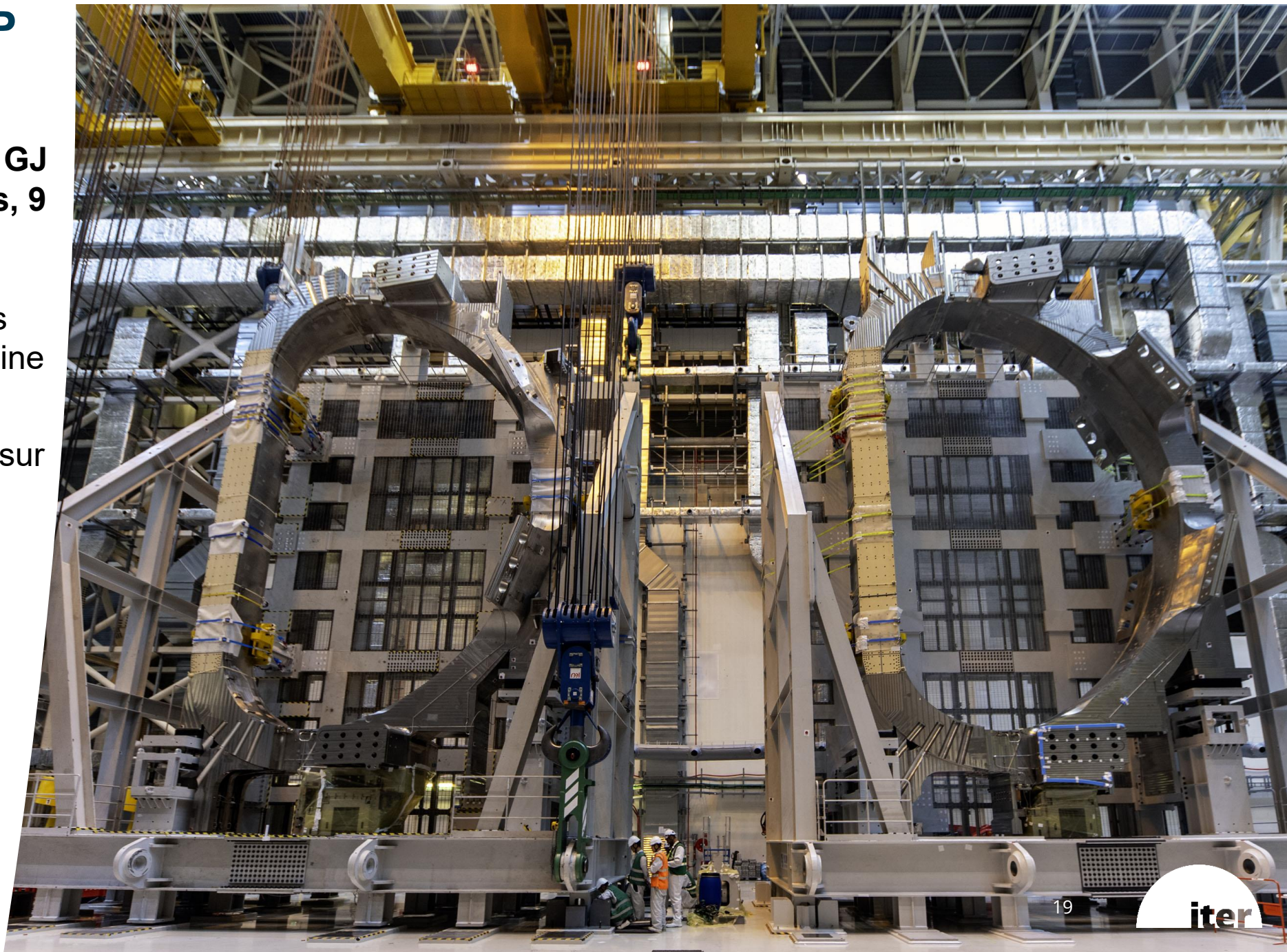
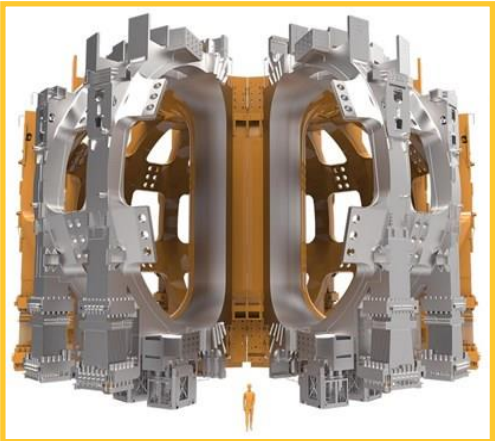
Nb₃Sn, 13,5 teslas, 42 kA
6 modules, 1 000 tonnes, 13 m
de hauteur

- Quatrième module empilé en janvier 2025
- Cinquième module (illustré) empilé en novembre 2025
- Sixième module arrivé à l'automne 2025, empilage prévu en printemps 2026
- Septième module (de réserve) arrivé sur site

BOBINES DE CHAMP TOROÏDAL

Nb₃Sn – 11,8 T – 68 kA – 41 GJ
Chaque bobine : 360 tonnes, 9 × 17 m

- Fabrication des 19 bobines terminée (y compris la bobine de réserve).
- Toutes les bobines livrées sur site (décembre 2023).



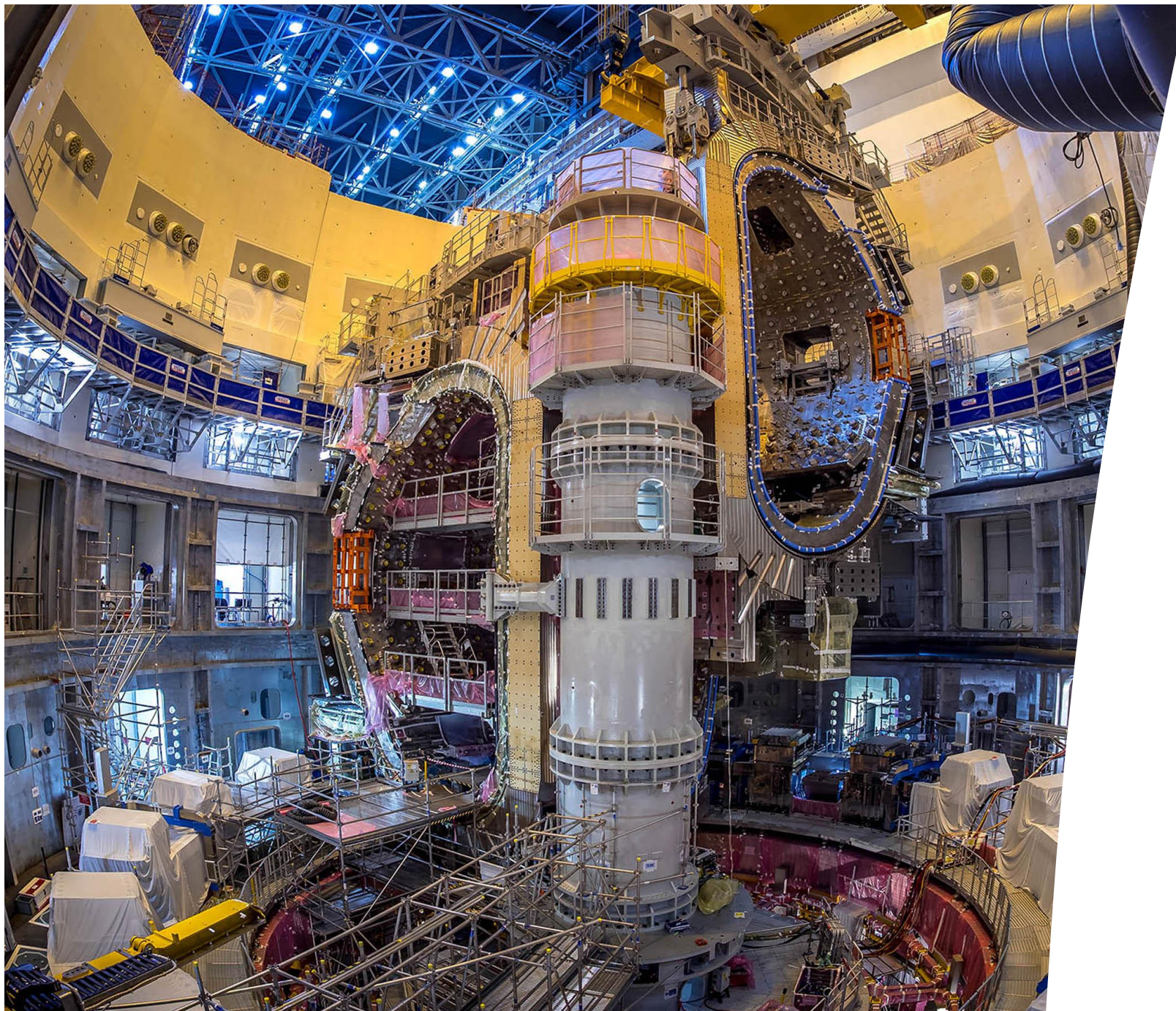
BOBINES DE CHAMP POLOÏDAL

NbTi – 6T – 45 kA – 4 GJ

Bobine la plus grande: 400 tonnes, 24 m

Les six bobines de champ poloïdal ont été fabriquées et livrées.





ASSEMBLAGE DU TOKAMAK

Contrats d'assemblage et réorganisation en 2023.

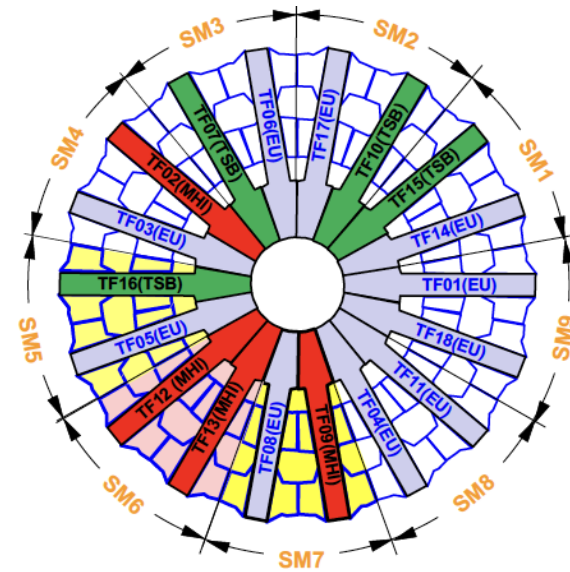
4 modules de secteur installés dans le puits du tokamak en :

avril 2025

juin 2025

novembre 2025

janvier 2026



Usine CRYOGENIQUE

75kW @ 4 Kelvin

20 tonnes d'Hélium liquide

Installation terminée

En phase de
commissioning





NOUVELLE INSTALLATION D'ESSAIS À FROID DES AIMANTS

- Les essais à froid à la température de fonctionnement (4 K) ont jusqu'à présent été limités aux modules du solénoïde central.
- Le banc d'essais à froid des aimants permettra de tester quelques bobines TF et la PF1 au courant nominal avant leur intégration, en évaluant :
 - Les performances des bobines et des jonctions
 - L'isolation à la masse haute tension à différentes températures
 - Les systèmes de protection contre les quenches
 - La décharge rapide – intégration avec l'installation cryogénique
 - Les performances thermo hydrauliques des bobines



Le cryostat est arrivé à ITER le 4 octobre 2026.

DES TRANSPORTS EXCEPTIONNELS



DEPUIS L'ANNÉE DE REDRESSEMENT 2023, LE PROJET ITER A ATTEINT DES NIVEAUX D'EXÉCUTION RECORD EN 2024 ET 2025

- Restructuration majeure de l'organisation
- Rétablissement de la confiance avec l'ASNR et lancement d'importantes simplifications
- Restructuration des contrats d'assemblage
- Réparation de composants
- Élaboration de la référence coûts et délais 2024, intégrant de nombreux nouveaux concepts
- Amélioration des processus de contrôle du projet et de la conception

... tout en atteignant un niveau d'exécution record (>100 %) pour la construction

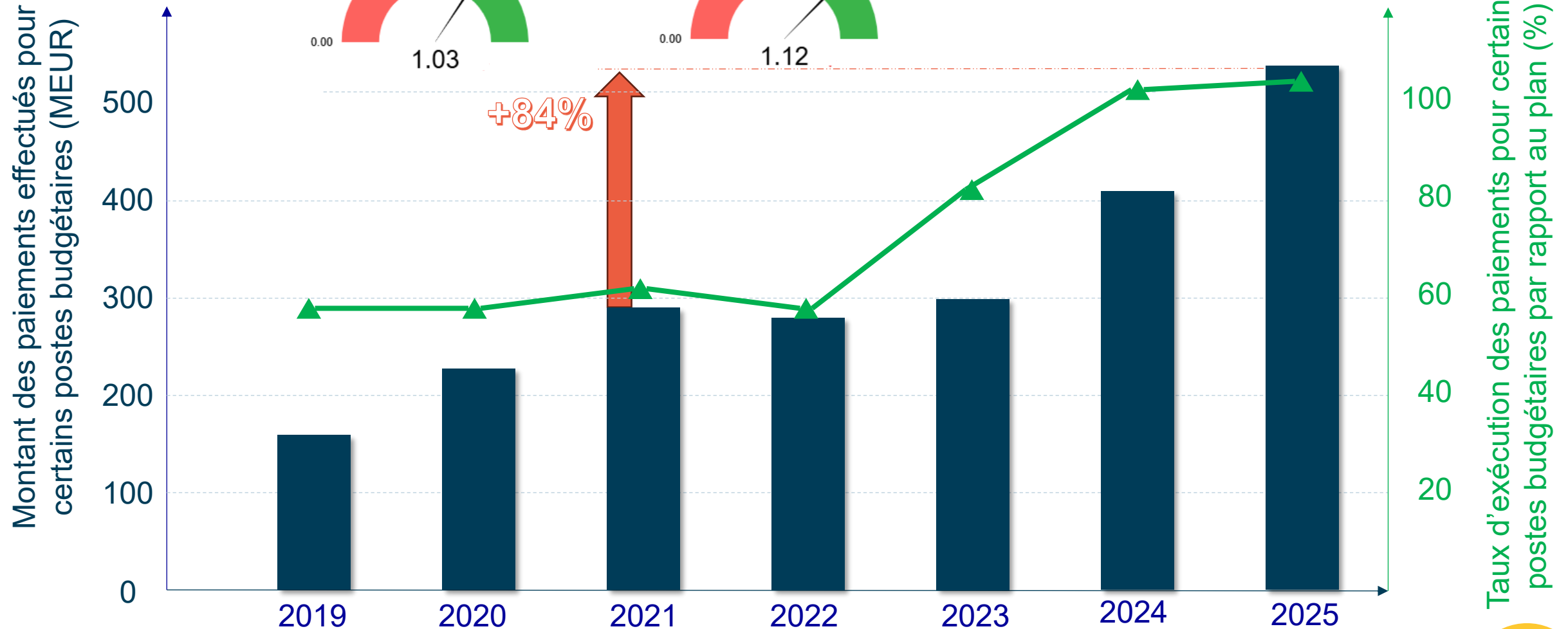
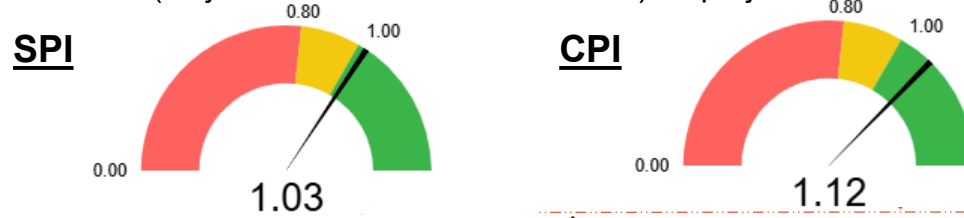
SPI = 1,03

CPI = 1,15



ITER a atteint plus de 100 % de la progression prévue des investissements de construction

SPI et CPI (de janvier 2024 à décembre 2025) du projet de construction d'ITER



Note : Les postes budgétaires liés à la construction incluent : *A111 (Investissement direct), A112 (Module Test Blanket), A321 (Services généraux), A323 (Équipements)

SURETE ET SECURITE - CADRE REGLEMENTAIRE

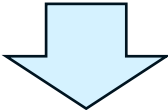
Organisation Internationale



Agreement on the Establishment of the ITER International Fusion Energy Organization for the Joint Implementation of the ITER Project

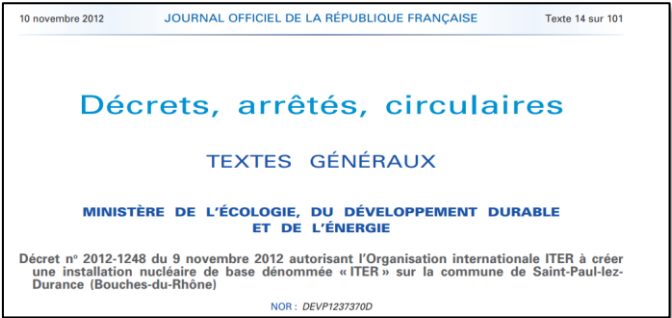
Article 14
Public Health, Safety, Licensing and Environmental Protection
The ITER Organization shall observe applicable national laws and regulations of the Host State in the fields of public and occupational health and safety, nuclear safety, radiation protection, licensing, nuclear substances, environmental protection and protection from acts of malevolence.

« Les installations ITER sont réglementées conformément aux lois et à la réglementation françaises en matière de sécurité, sûreté nucléaire, de radioprotection, de licensing, de substances nucléaires, de protection de l'environnement et de malveillance. »



ITER = Installation Nucléaire de Base (INB 174)

Réglementation Française

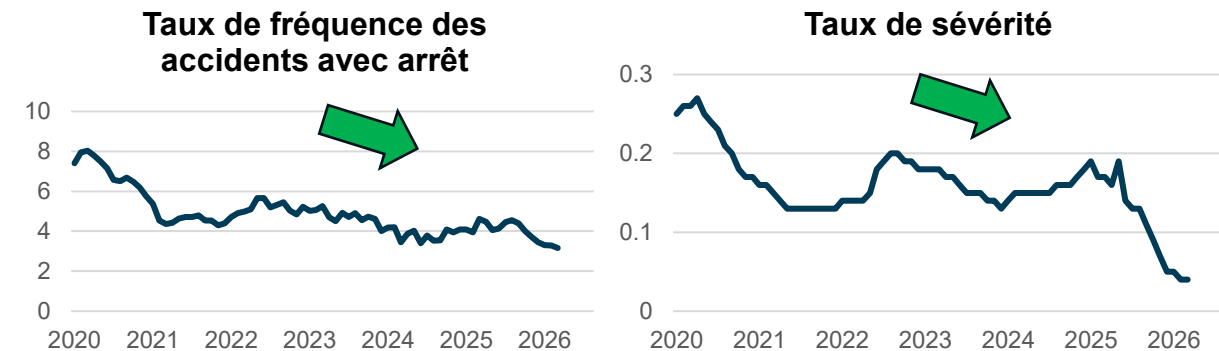


SURETE DE L'INSTALLATION



- Les enjeux de sûreté sont inférieurs à ceux d'une installation de "fission" mais demeurent pour
 - Le confinement des matières radioactives
 - La radioprotection
 - L'impact environnemental
- Facteurs clés de design
 - Pas de *Plan Particulier d'Intervention* en cas d'accident
 - Minimisation de la dose aux travailleurs
- Spécificités
 - Fusion: Adaptation du cadre réglementaire
 - Démarche expérimentale: Approche par étapes pour le licensing

SECURITE DU CHANTIER



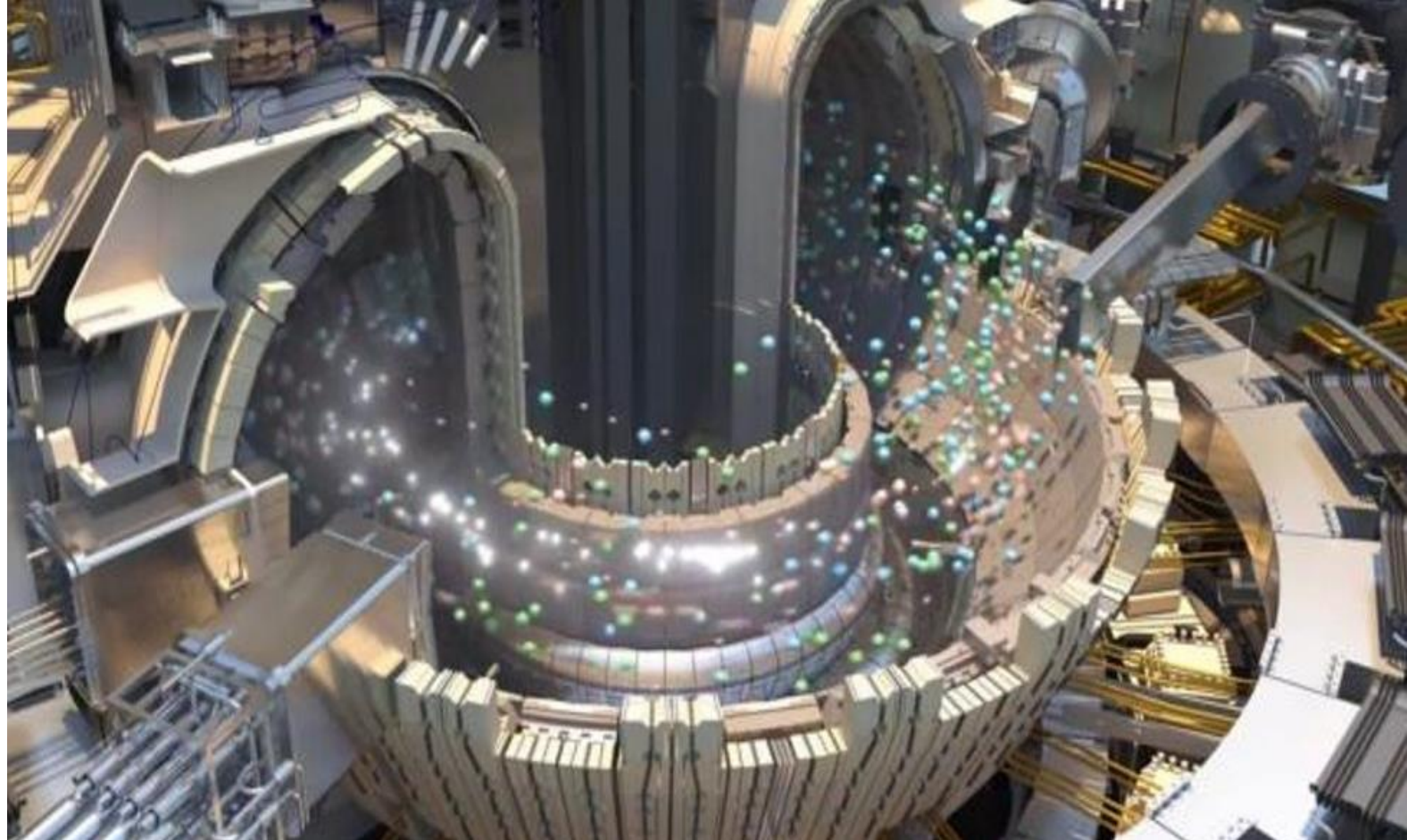
APERÇU DU NOUVEAU CALENDRIER DE RÉFÉRENCE DU PROJET

- 2024–2025 : **Poursuite de l'assemblage** du tokamak et des systèmes critiques, avec une intensification des tests préalables à l'assemblage et des réformes du contrôle qualité déjà en cours.
- 2026–2033 : **Intégration progressive et mise en service** des sous-systèmes. Rédaction de la documentation de licence et processus de validation de la sécurité.
- 2033–2034 : Activités de **mise en service intégrée**, marquant la transition de la construction vers la préparation opérationnelle.
- 2035 : Lancement de la **phase scientifique initiale** (SRO) avec des opérations de fusion deutérium-deutérium, suivies par le fonctionnement complet en énergie magnétique et courant plasma.



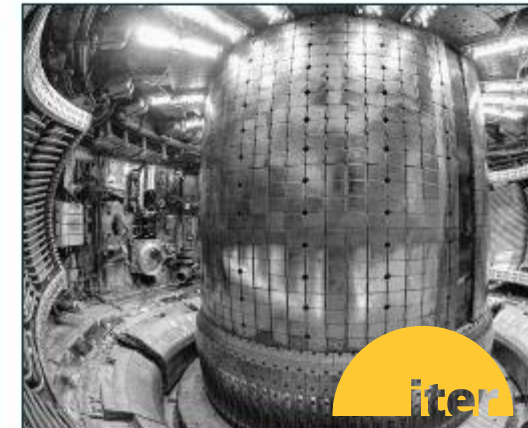
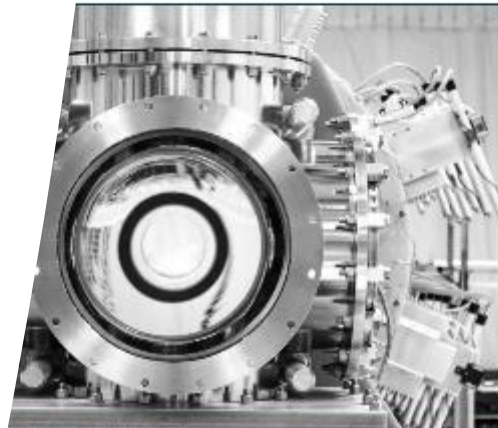
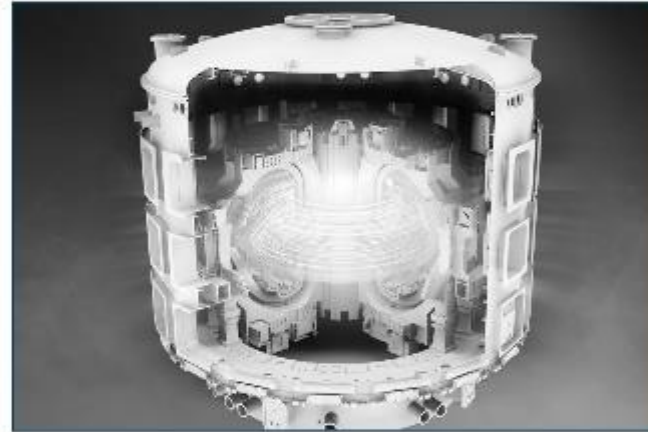
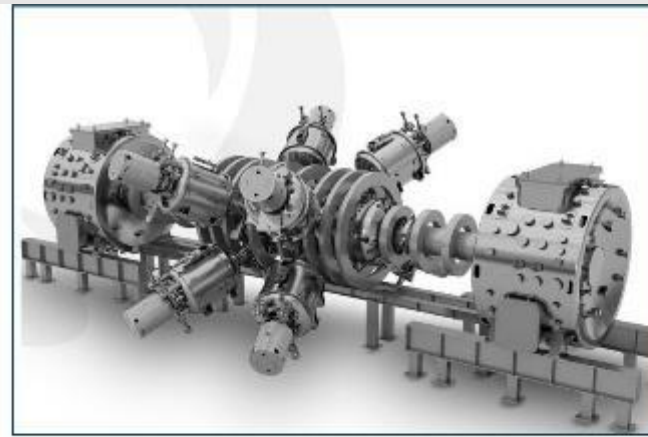
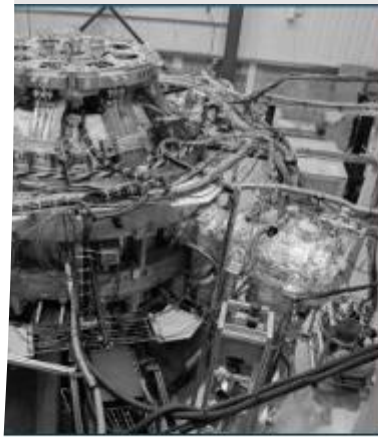
LES DÉFIS RESTANT DE LA FUSION

- **Matériaux résistants aux conditions extrêmes** (flux intense de neutrons à haute énergie)
- **Gestion de l'évacuation de la chaleur** dans la région du diverteur
- **Maintenance par télémanipulation**
Cycle du combustible tritium (production de tritium à grande échelle)
- **Évacuation efficace de la chaleur** pour la production d'électricité



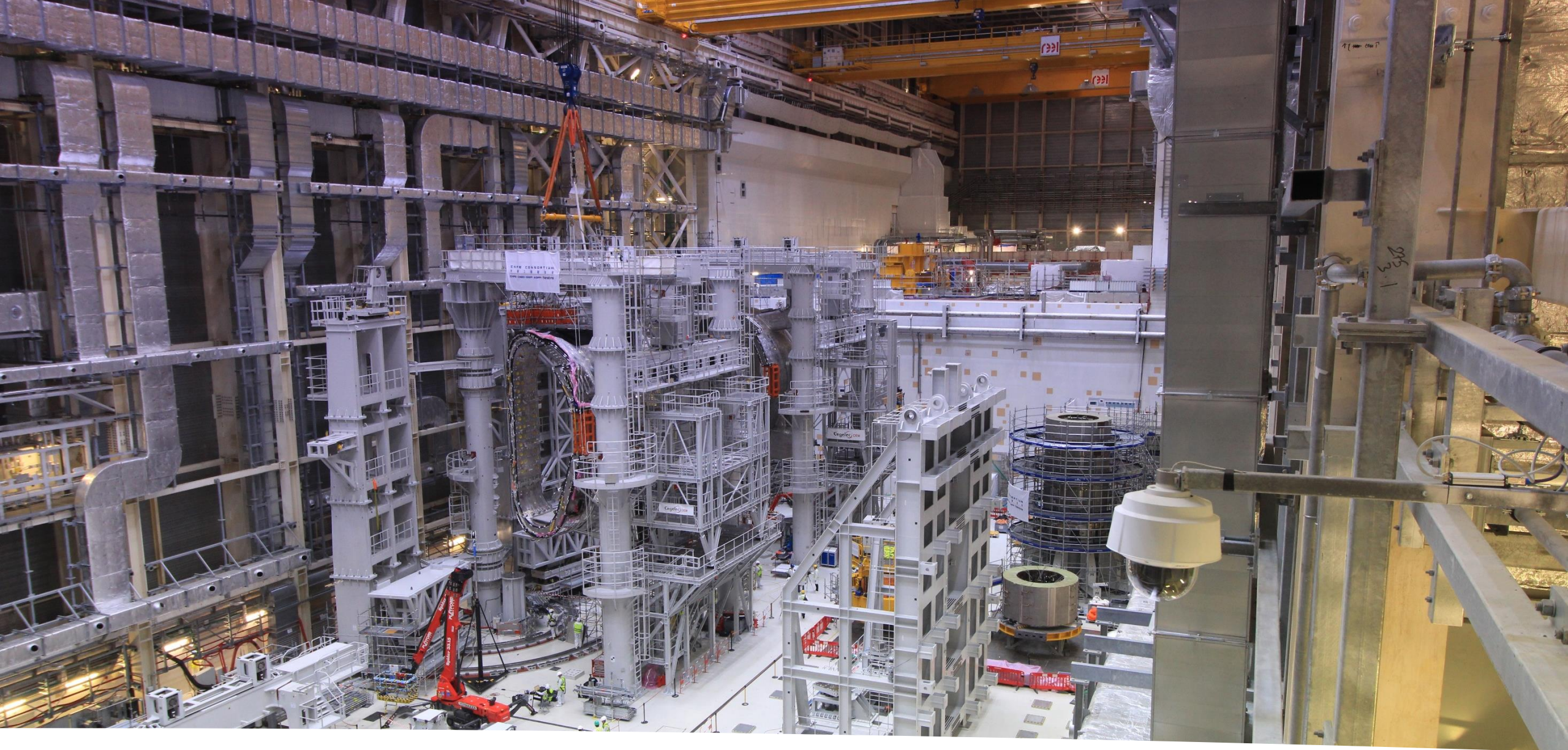
L'ENGAGEMENT d'ITER auprès du SECTEUR PRIVE

- Demandé par le Conseil ITER, Nov. 2023
- Ateliers tenus à ITER,
 - Mai 2024, Avril 2025, Avril 2026
 - **350** participants
- Établissement des canaux pour le **partage des connaissances**
 - Manuel de conception ITER
 - Accès aux documents ITER
 - >500 documents fournis
 - Open-sourcing IMAS
 - Accords bilatéraux
 - Catalogues
 - Visites Techniques
 - Discussions avec les experts ITER
 - Accès aux groupes ITPA
 - Séjours d'industriels
 - Help desk dédié
 - ...



An aerial drone shot of the ITER facility in Cadarache, France. The central feature is a massive, dark, rectangular building with a flat roof, which is the Tokamak Building. To its left is a large, white, cylindrical structure, the Tore Supra vacuum vessel. The surrounding area includes various smaller buildings, parking lots filled with cars and trucks, and industrial equipment. In the background, there are more industrial structures and a large, open field. The overall scene depicts a large-scale industrial and scientific complex.

ITER by
drone
April 2026



Merci !