

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



D'ITER aux réacteurs: des défis scientifiques et technologiques.

R. Sabot, G. Bonhomme & WEST team

Remerciements à J. Bucalossi, P. Ghendrih, P. Magaud,
P Monnier-Garbet, B. Saoutic, ... pour leurs transparents

roland.sabot@cea.fr



www.cea.fr

- **ITER vs le réacteur**
- **Défis scientifiques pour ITER et le réacteur**
 - *Chauffage du plasma (cf. présentation G. Bonhomme)*
 - **Interaction plasma paroi**
 - **Mesures et contrôle du plasma**
- **Défis technologiques pour ITER et le réacteur**
 - **Télémanipulation**
 - **Génération et gestion du tritium**
- **Les progrès récents**
- *GB: Au-delà d'ITER: les matériaux pour le réacteur*

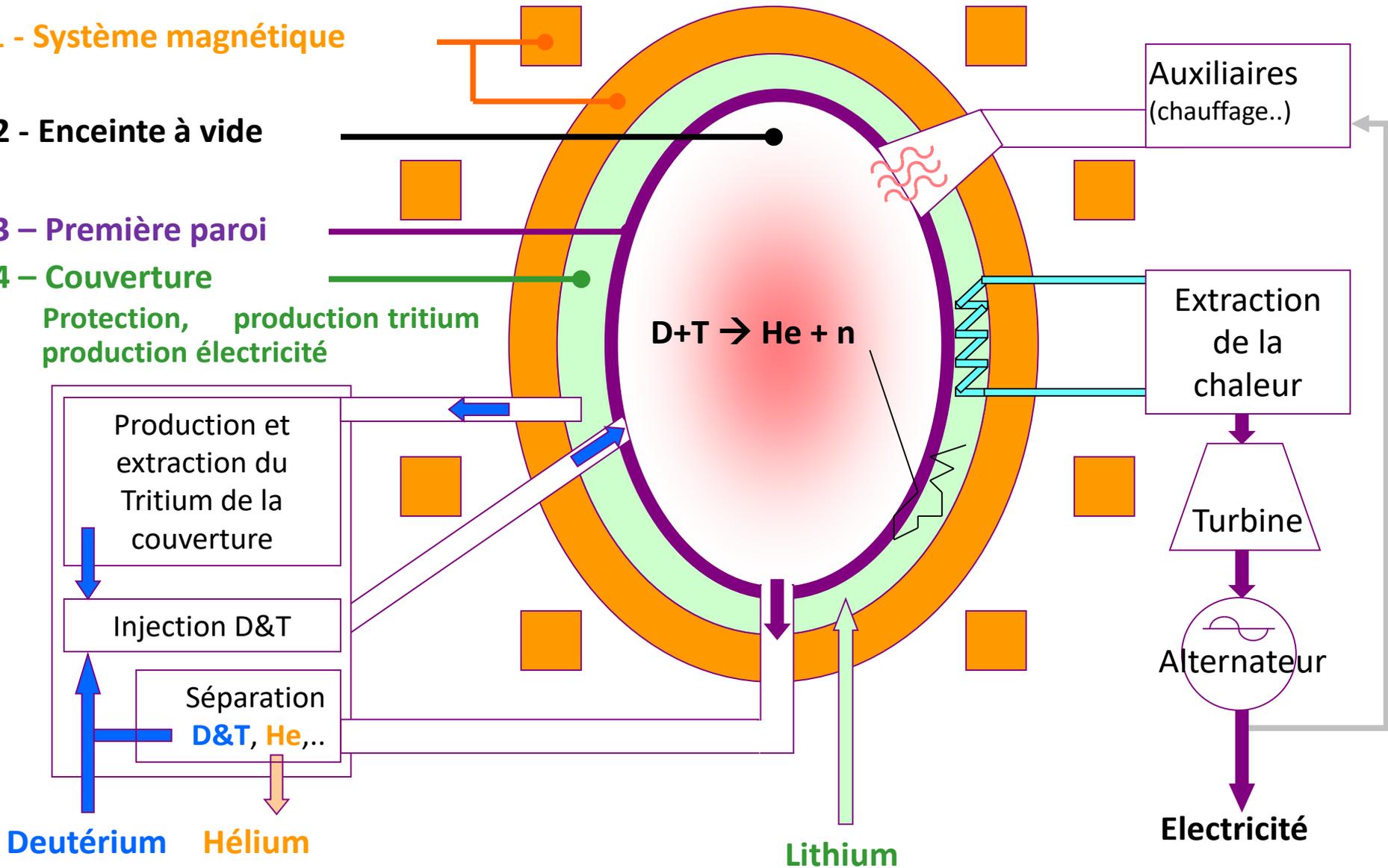
1 - Système magnétique

2 - Enceinte à vide

3 - Première paroi

4 - Couverture

Protection, production tritium
production électricité



1 - Système magnétique

2 - Enceinte à vide

3 - Première paroi

4 - Couverture

Protection, ~~production tritium~~
~~production électricité~~

ITER : pas de production d'électricité
Pas de production de tritium

Auxiliaires
(chauffage..)

Extraction
de la
chaleur

6 modules de
génération de
tritium

Injection D&T

Séparation
D&T, He,..

Deutérium Hélium

Tritium



~~Turbine~~

~~Alternateur~~

~~Electricité~~

~~Lithium~~

Performance

- $Q \geq 10$ pendant ~ 400 s
- Explorer le régime stationnaire ($Q=5$)
- Flux neutronique (14 MeV) moyen $> 0,5$ MW/m², fluence $> 0,3$ MW a/m²

Fonctionnement

- **Plasma en combustion:** confinement des α , auto-chauffage par le plasma
→ équilibre, instabilités

$$Q = 10 \Rightarrow P_{\alpha} = 2 \times P_{\text{add}}$$

- Test **de modules de couverture tritigène** à haute température
- Disponibilité des **technologies essentielles** pour la fusion : aimants supraconducteurs, maintenance robotisée, composants à haut flux
- Démonstration de la **sûreté de fonctionnement et du faible impact sur l'environnement**

L'essentiel de la physique du réacteur devrait être démontrée par ITER

Performance

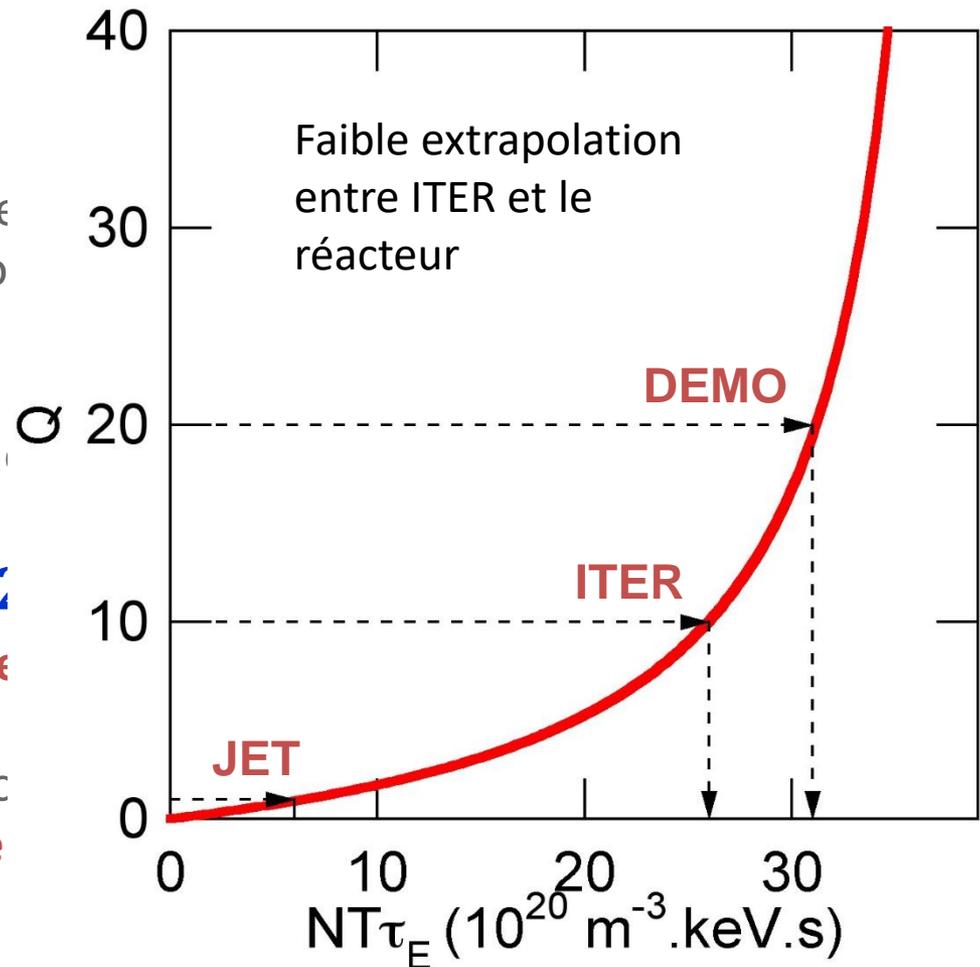
- $Q \geq 10$ pendant ~ 400 s
- Explorer le régime stationnaire
- Flux neutronique (14 MeV) mo

Fonctionnement

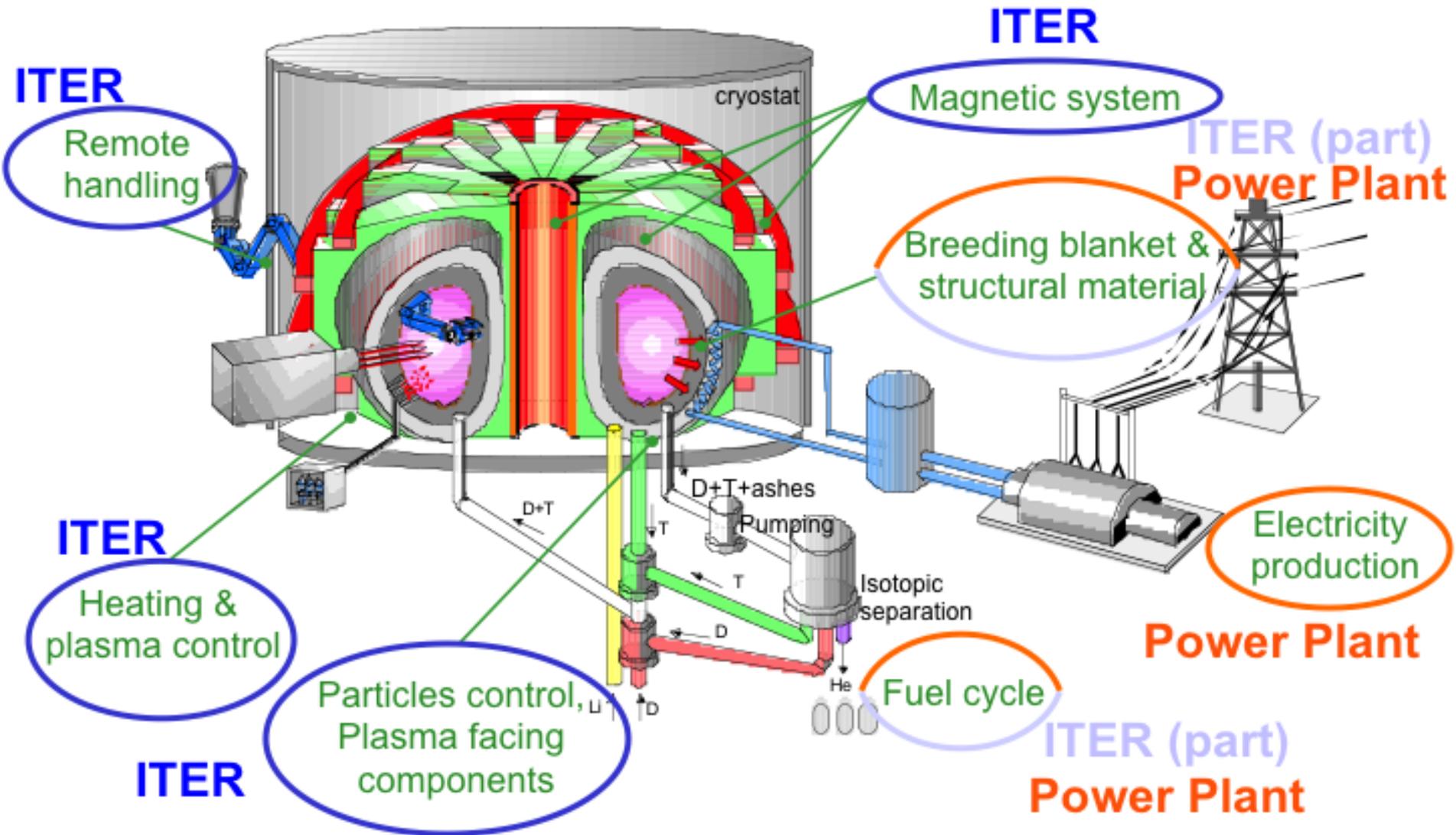
- **Plasma en combustion:** confinement
→ équilibre, instabilités

$$Q = 10 \Rightarrow P_{\alpha} = 10 P_{\text{ext}}$$

- Test **de modules de couverture**
- Disponibilité des **technologies** supraconducteurs, maintenanc
- Démonstration de la **sûreté de l'environnement**



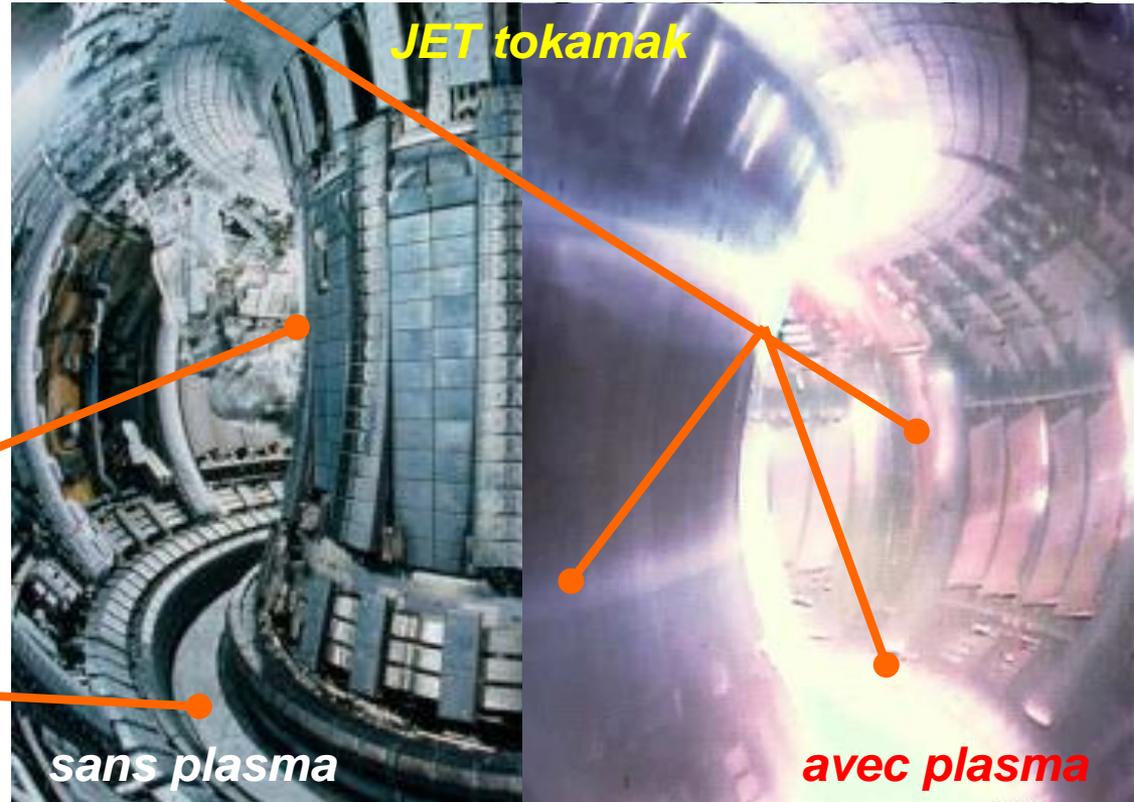
Rapide augmentation de Q avec $nT_i\tau_E$ pour $Q > 10$
→ faible extrapolation entre ITER et DEMO



Défis scientifiques pour ITER et le réacteur

- Composants face au plasma**
- Mesures et contrôle du plasma**

C'est la **première surface matérielle** vue par le plasma. Elle est exposée à de nombreuses contraintes : thermique (plusieurs MW/m²), neutronique, érosion...



JET tokamak

sans plasma

avec plasma

Choix des matériaux très important

- T fusion élevée
- Faible activation
- Coût

Candidats:

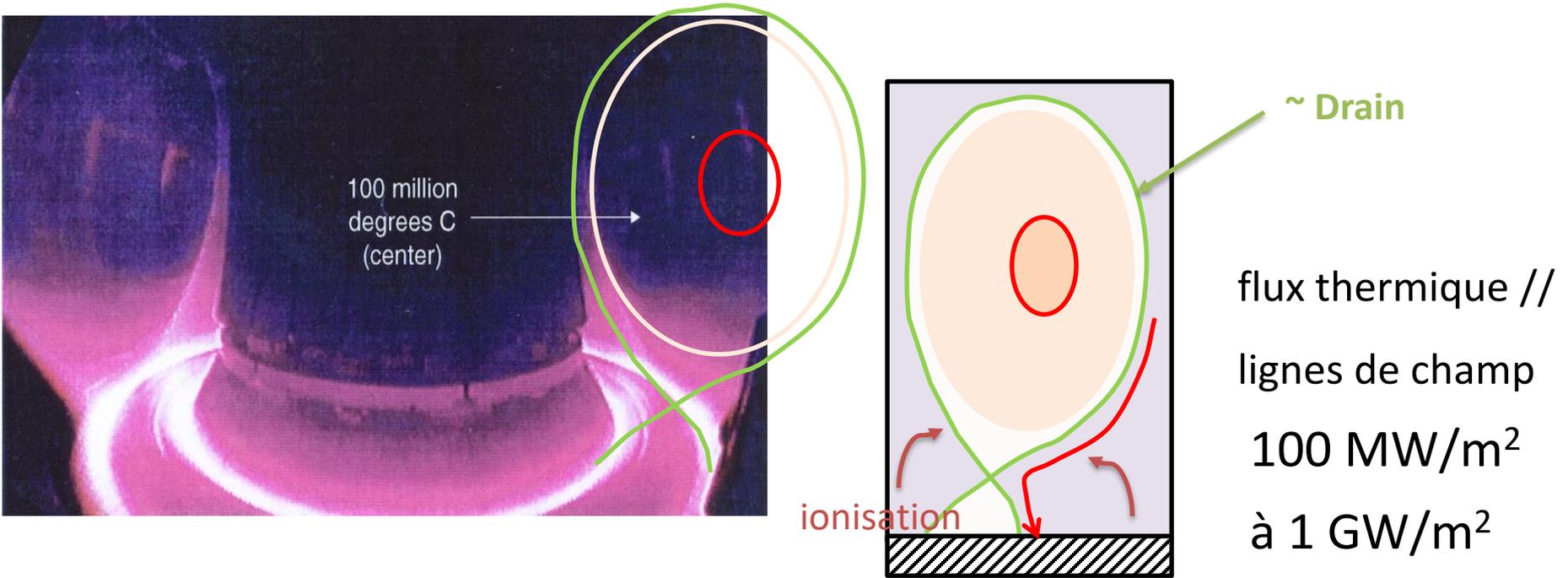
Béryllium

Carbone

Tungstène (W)

Impuretés dégrade les performances plasma:

- Elément légers (Be, C) → ionisation totale → rayonnement faible, **C=1-2% acceptable**
- Eléments lourds (W) → rayonnement très élevé ⇒ il faut **C<10⁻⁴**

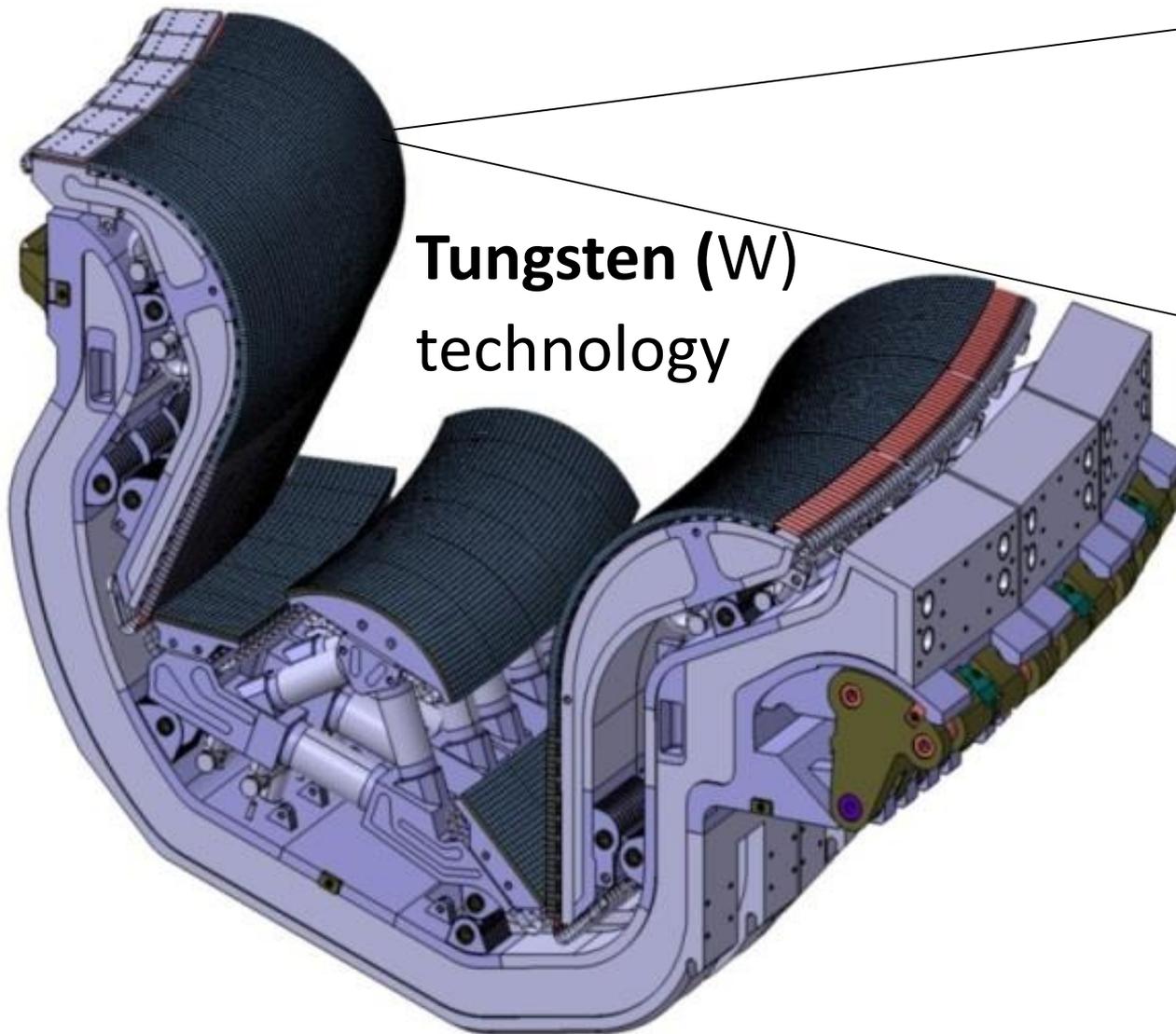


Effet géométriques + pertes par rayonnement

$$\text{Flux } \Gamma_{\parallel}^E \div 10 \text{ à } 100$$

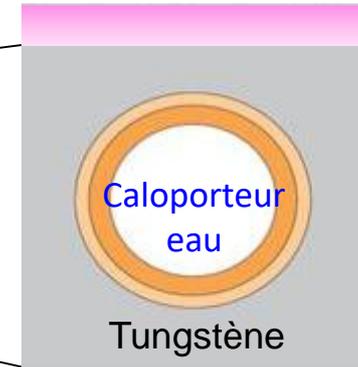
$$\Gamma_{\text{div}}^E = 3 \text{ à } 20 \text{ MW/m}^2$$

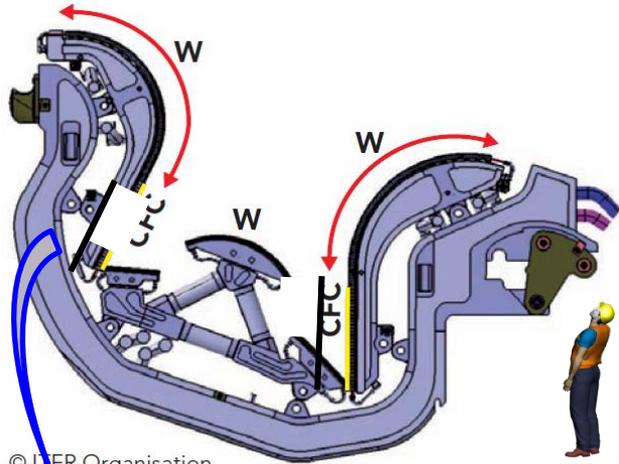
Carbone impossible dans ITER (ou réacteur), car il piège le tritium
 → Le divertor d'ITER est en tungstène (Be sur les murs)



**Tungsten (W)
technology**

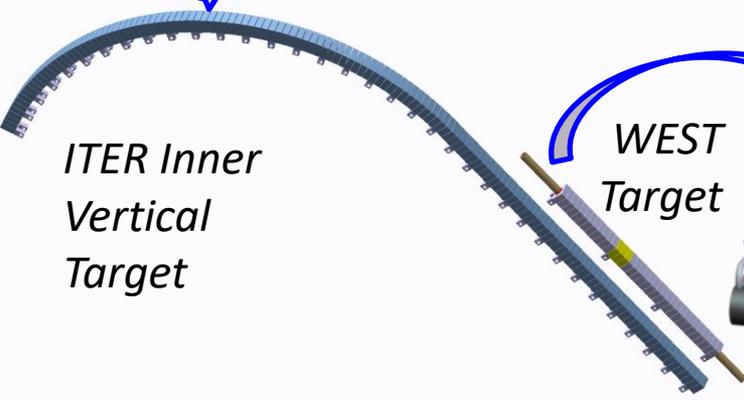
Plasma



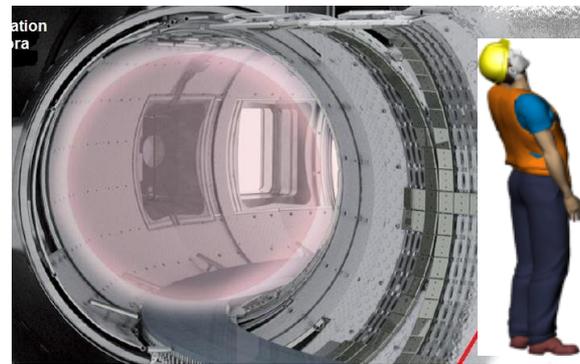


© ITER Organisation

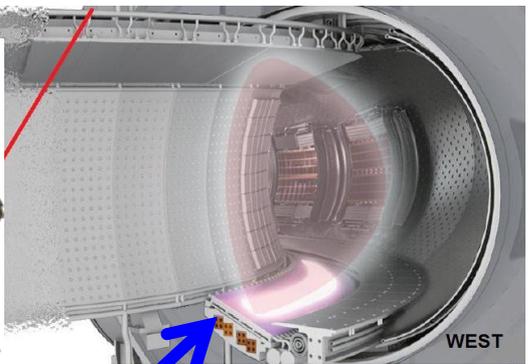
ITER divertor $\leq 10 \text{ MW} / \text{m}^2$



TORE SUPRA (<2012):
6,5 min de plasma en 2003

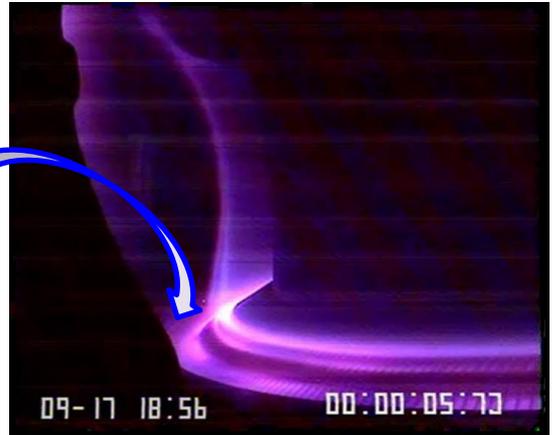
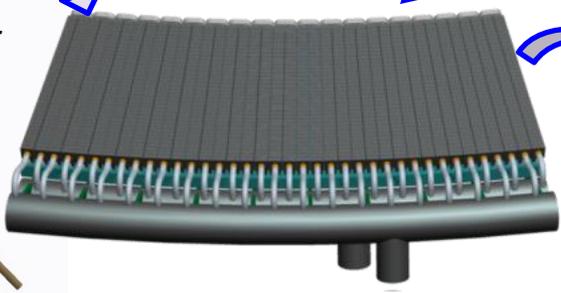


WEST depuis 2016



Supraconducteur + parois refroidies = plasma longue durée

WEST divertor



Après une phase I (2016-2021) avec un divertor non-refroidi, le divertor WEST basé sur les composants similaires à ITER a été achevé en 2021.

► Divertor bas

- Composants type ITER W:
<20 MW/m²

► Divertor haut

- CuCrZr avec dépôt W:
8 MW/m²

► Baffle (déflecteur)

- CuCrZr avec dépôt W:
5 MW/m²

► Anneau de garde interne

- Tuiles en BN ou W massif:
1 MW/m²

► Panneau de protection

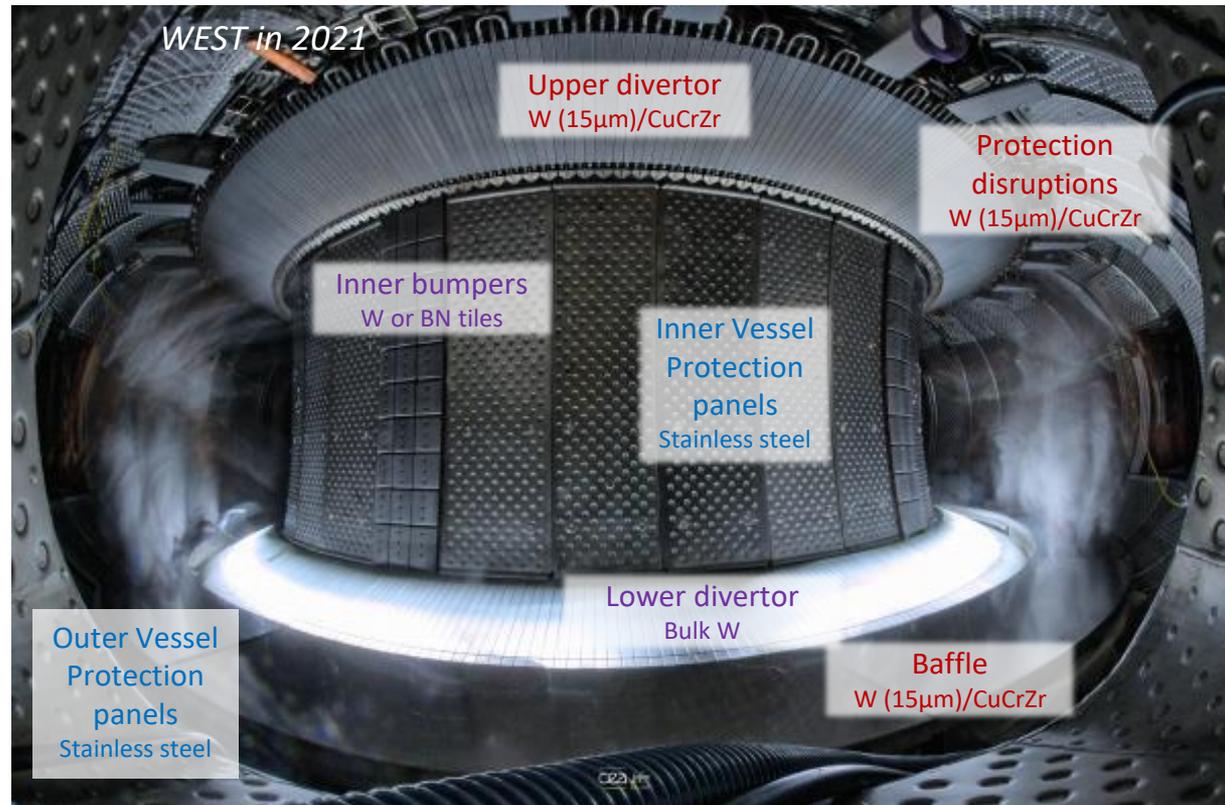
- Panneau inox:
0.3 MW/m²

► Upper port protection

- Tuiles CuCrZr avec dépôt W

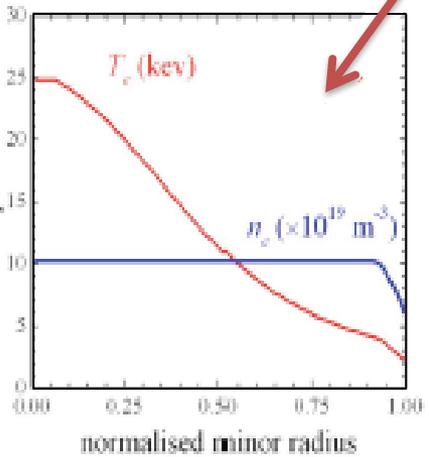
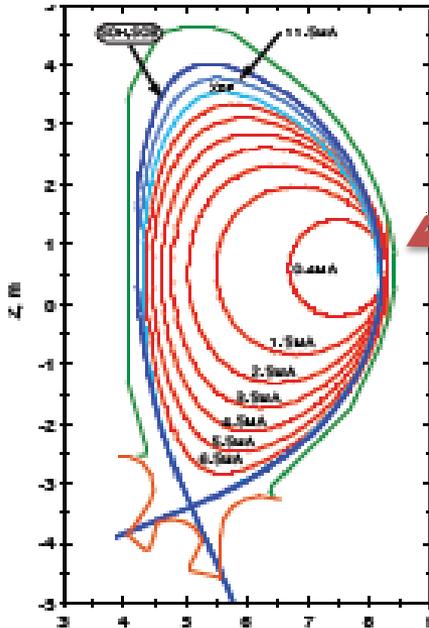
► Limiteurs externes

- Limiteur mobile W massif ou BN:
1 MW/m²
- Protection d'antennes: CFC dépôt W
10 MW/m²

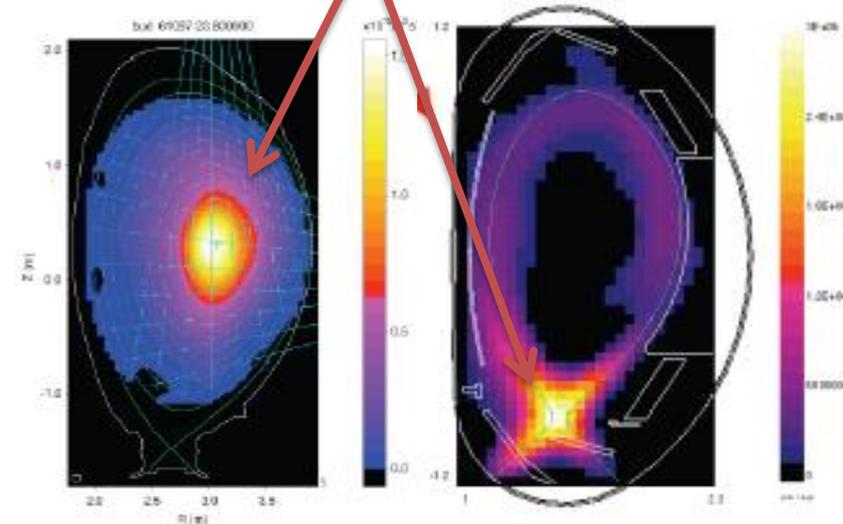
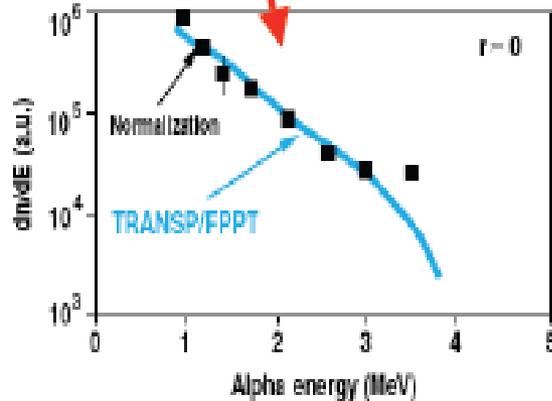


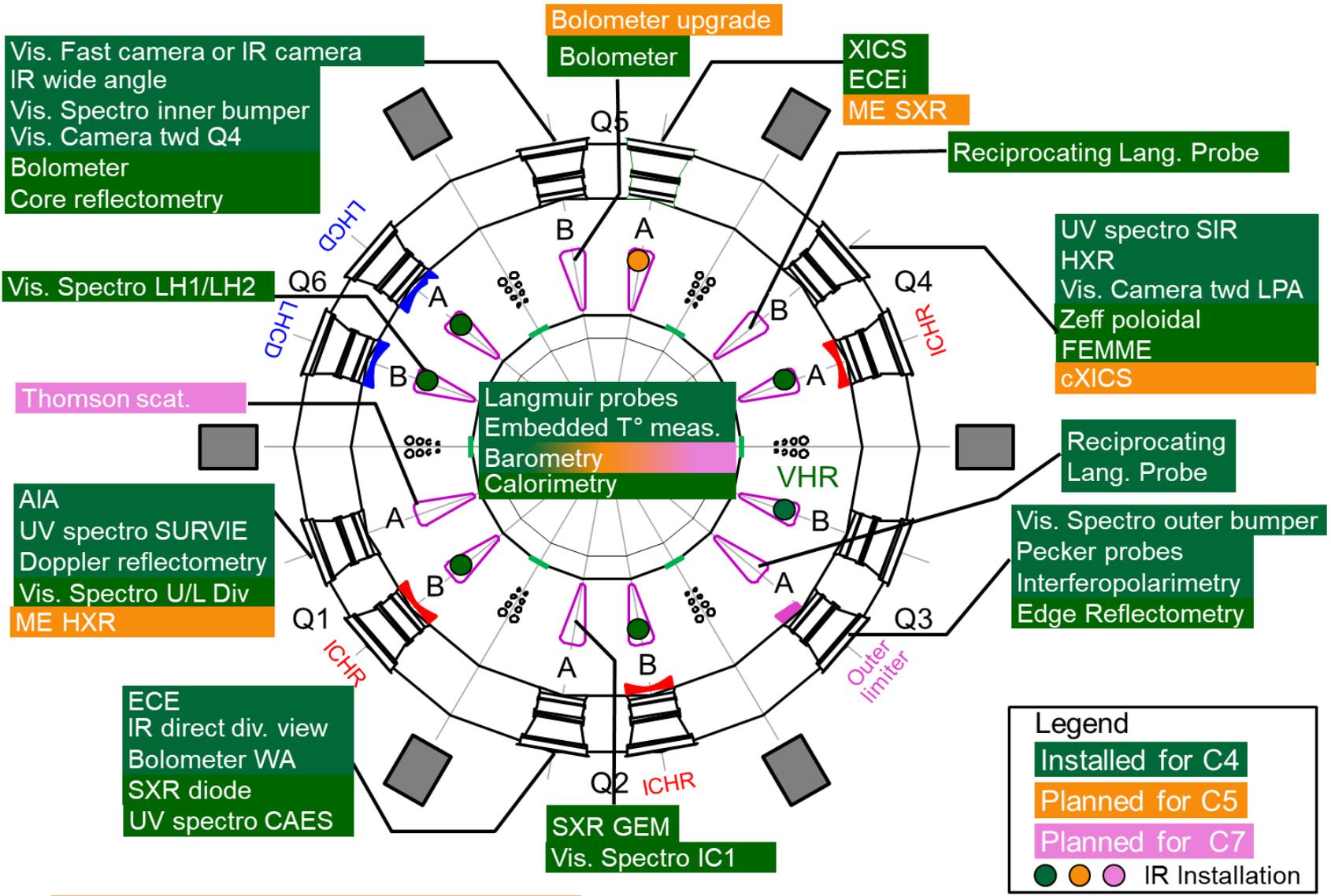
Objectif: test des éléments du divertor longue durée & P>10 MW/m²

- le plasma (forme, courant...)
- Les interactions avec le divertor et les parois
- Les bilans (matière, énergie...)
- Rayonnement



- Fusion power: neutron, α particule





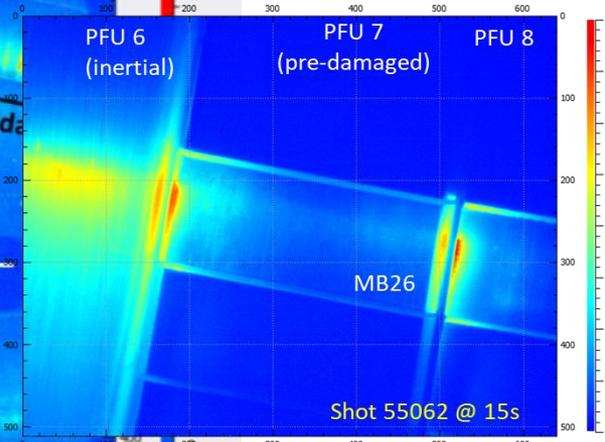
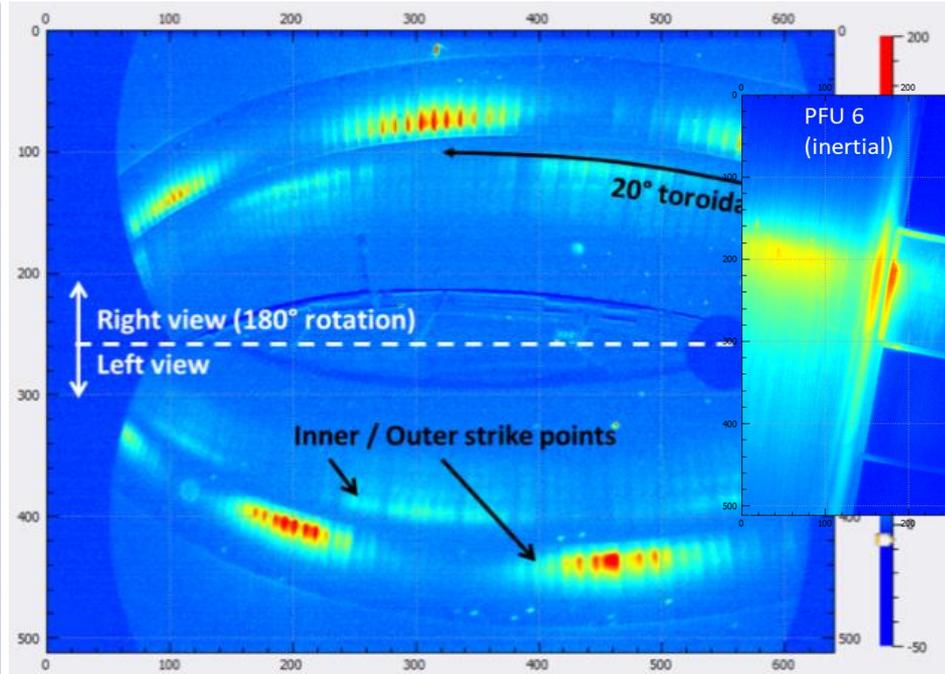
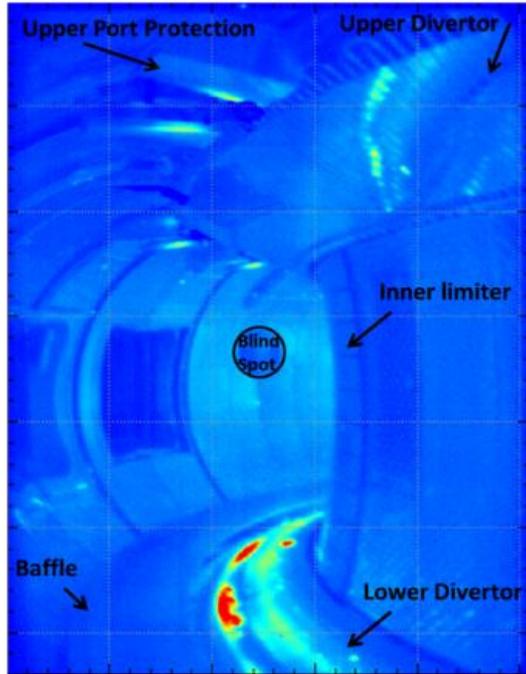
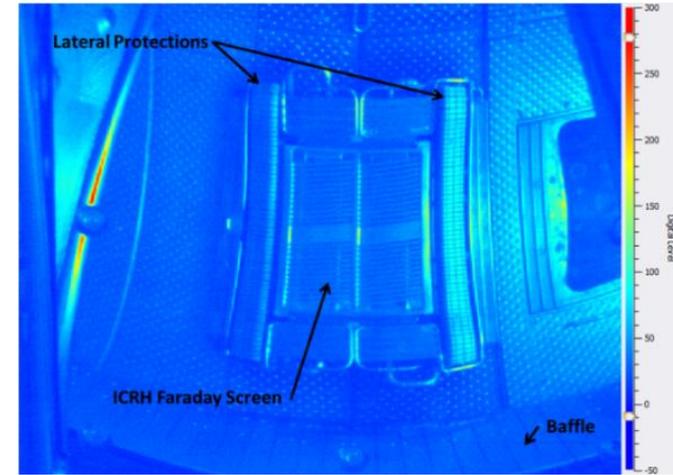
Lower divertor : Upgraded Langmuir probes + embedded PFU diags

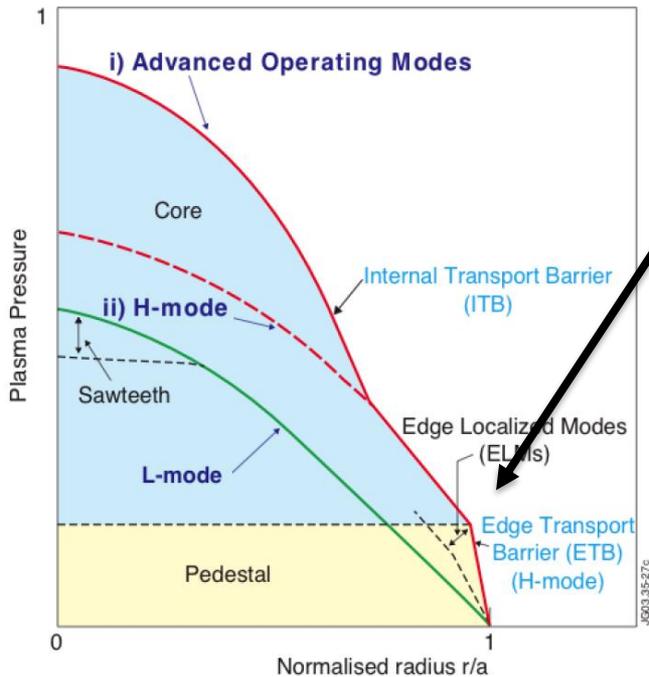
Fast IR (under discussion).

Caméras IR pour mesurer la température des CFP

- ▶ 1 camera grand angle (60° field of view, 3 to 8 mm/pixel)
- ▶ 6 visées complete divertor (2x30°)
- ▶ 1 Very High Resolution divertor view (0.1 mm/pixel)
- ▶ 5 antennes de chauffage

Développement d'outils IA pour le contrôle TR et la classification des évènements.

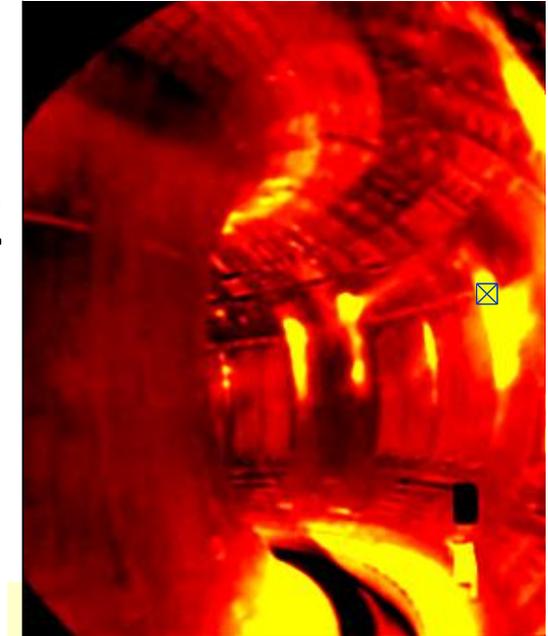




Relaxation régulière de la barrière de transport externe en mode H

$$\Delta E_{ELM} \sim 0,03 - 0,05 E_{plasma}$$

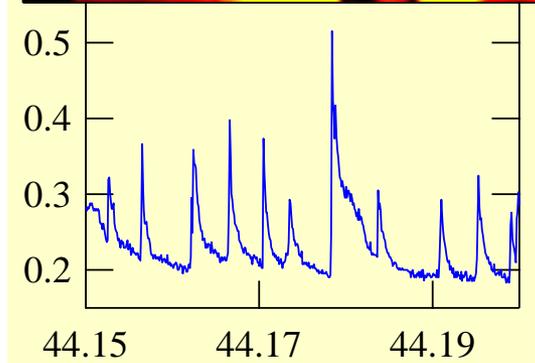
ELM impacts on JET vessel



Dans ITER, cela peut conduire à des flux d'énergie et de particules très élevés sur le divertor et les parois, érosion, influx d'impuretés, voir fonte locale du divertor.

➔ Dans ITER, il faudra maîtriser l'amplitude des ELMs pour éviter les endommagements.

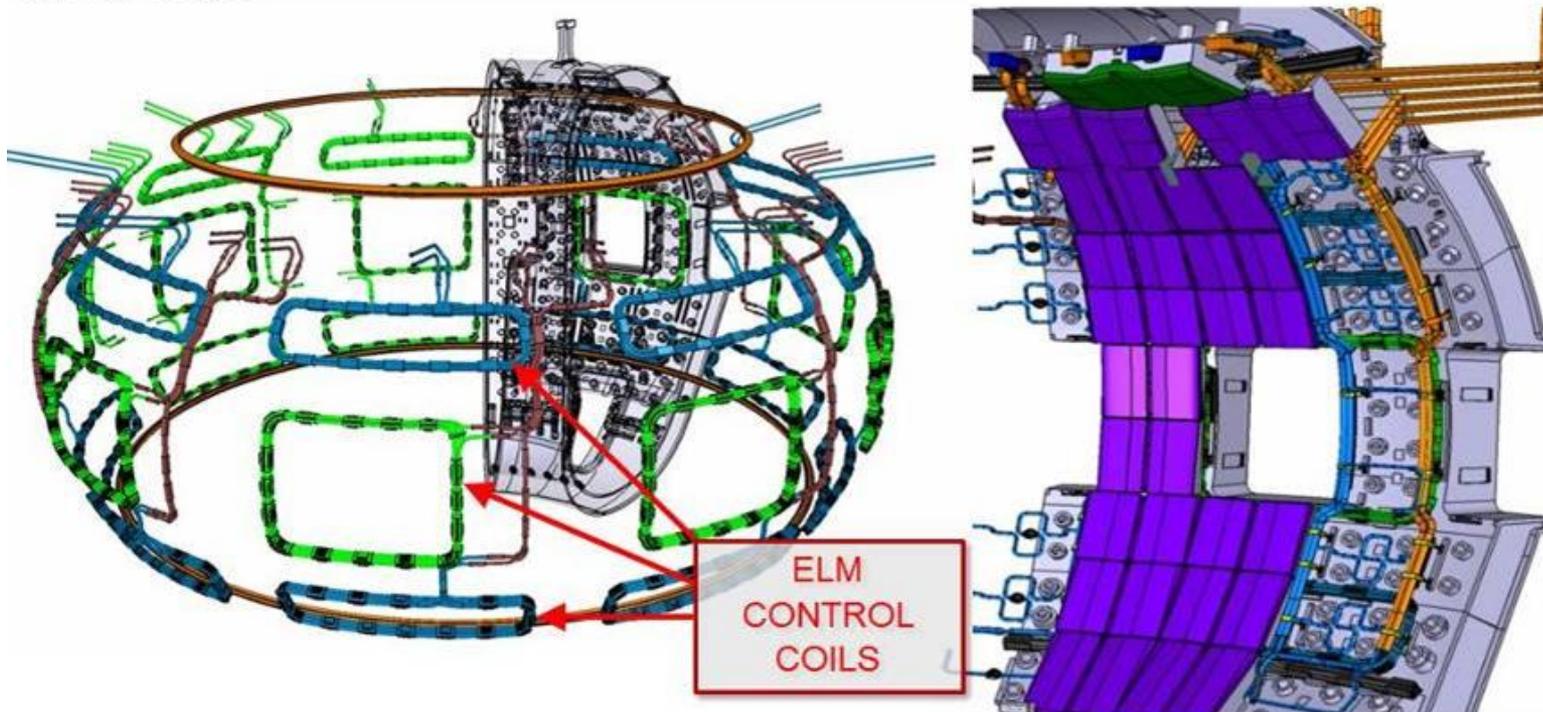
ELMs time trace



Plusieurs techniques pour ↗ fréquence des Elms et/ou ↘ l'amplitude

- Injection de glaçons de deutérium au bord
- Déplacement vertical rapide du plasma (kicks)
- Perturbation magnétique au bord (ergodisation lignes de champ)

Design activity underway with good progress → integration challenge



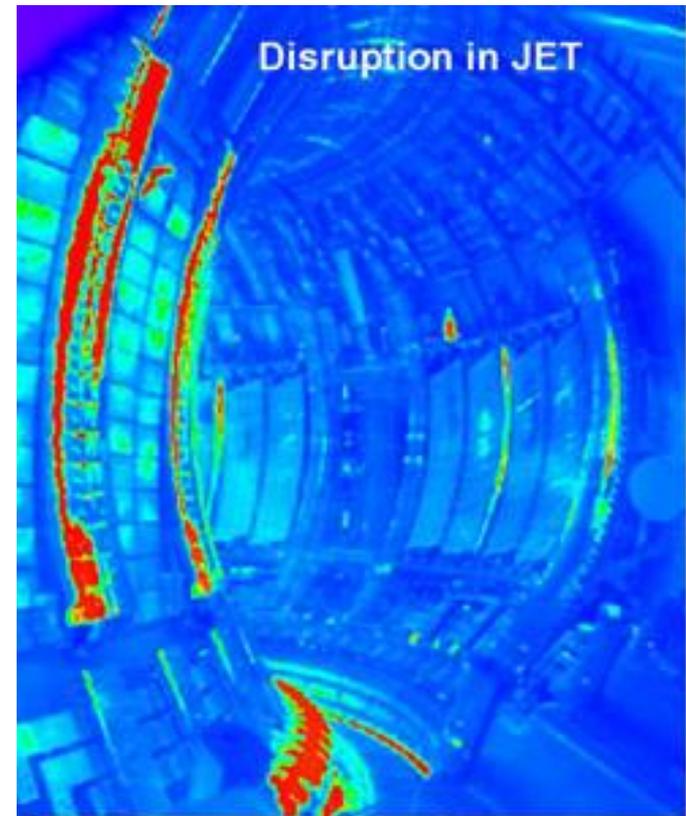
Les disruptions (fin brutale du plasma) engendrent des flux importants d'énergie et de particules qui peuvent endommager les composants face au plasma.

⇒ Dans ITER, il faudra détecter les précurseurs des disruptions pour

- les éviter
- les atténuer

Les mesures temps réel de différents paramètres (courant plasma, position vertical, rayonnement...) permettent de prédire l'apparition d'une disruption:

- ▶ réaliser un arrêt prématuré du plasma
- ▶ si besoin réaliser une injection massive de gaz pour que le plasma perde son énergie par rayonnement avant de toucher la paroi ou les composants face au plasma.



Flux thermique sur la paroi lors d'une disruption à JET

Défis technologiques pour ITER et le réacteur

- **Télémanipulation**
- **Génération et gestion du tritium**

**Après le premier plasma, tout devra être télémanipulé
(installation, soudure, découpe, retrait ...)**

Dans WEST, nous disposons d'un bras robot pour faire des inspections pendant les campagnes expérimentales.



<https://irfm.cea.fr/Phocea/Video/index.php?id=62>

■ Les 3 fonction des couvertures tritigènes:

1. Production de tritium



2. Récupération de l'énergie du neutron de 14MeV

3. Protection des composants (aimants) du neutron de 14MeV

■ Couverture tritigène = composant nucléaire formé :

T-breeders (Li-based compounds)

- ✓ Liquid Lithium (*natural 7.5% ${}^6\text{Li}$*)
- ✓ Liquid Eutectic Pb-15.8Li ($T_m : 235^\circ\text{C}$)
- ✓ Liquid Molten Salts : FLiBe, FLiNaBe
- ✓ Solid Li-Ceramics : Li_4SiO_4 , Li_2TiO_3 , LiO_2

Neutron multipliers

- ✓ Be (n, 2n)
- ✓ Pb (n, 2n)
- ✓ ${}^7\text{Li}$ (n, n'T)

Structural Materials

- ✓ Ferritic/Martensitic Steels
- ✓ Vanadium Alloys
- ✓ Composites SiC/SiC

Main Coolants (relevant T for good efficiency)

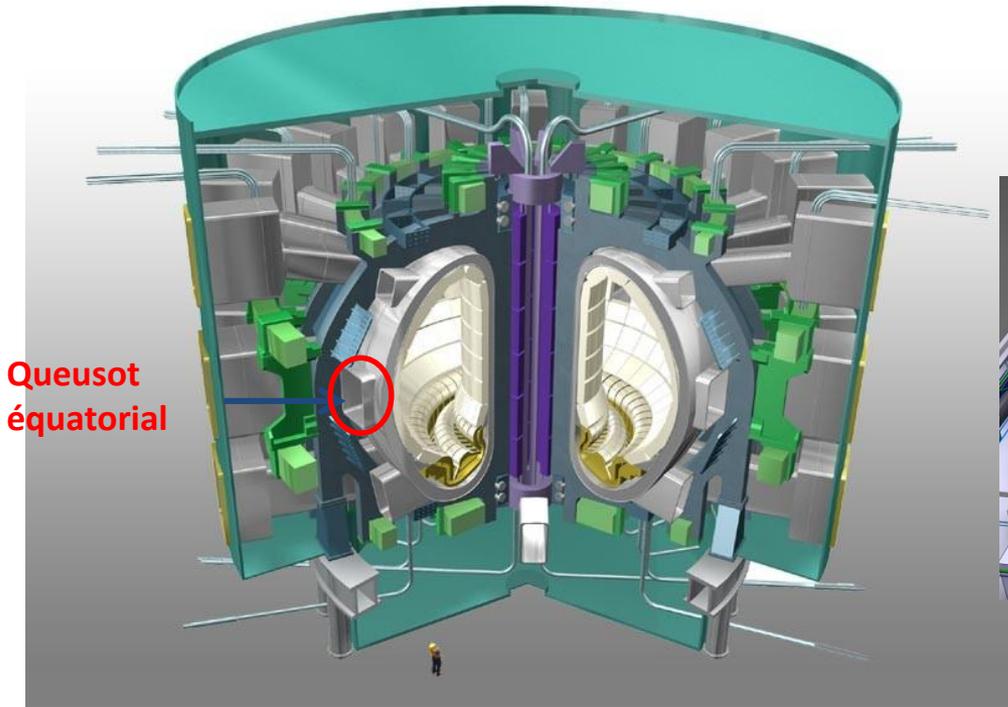
- ✓ Pressurized Water (PWR)
- ✓ Helium (and CO_2)
- ✓ Liquid Metals : Li, Pb-17Li

→ Différentes combinaisons menant à différents concepts

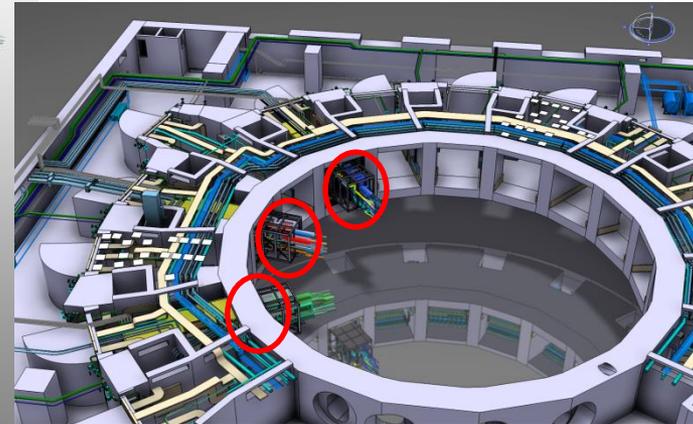


Sur ITER, le tritium sera apporté sur site, **mais** des maquettes de couvertures tritigènes seront testées: Test Blanket Module (TBM)

3 queusots pour 6 TBM, qui diffèrent par leur type de matériau tritigène (LiPb ou céramique), leur caloporteur (H₂O ou He)...



Queusot équatorial

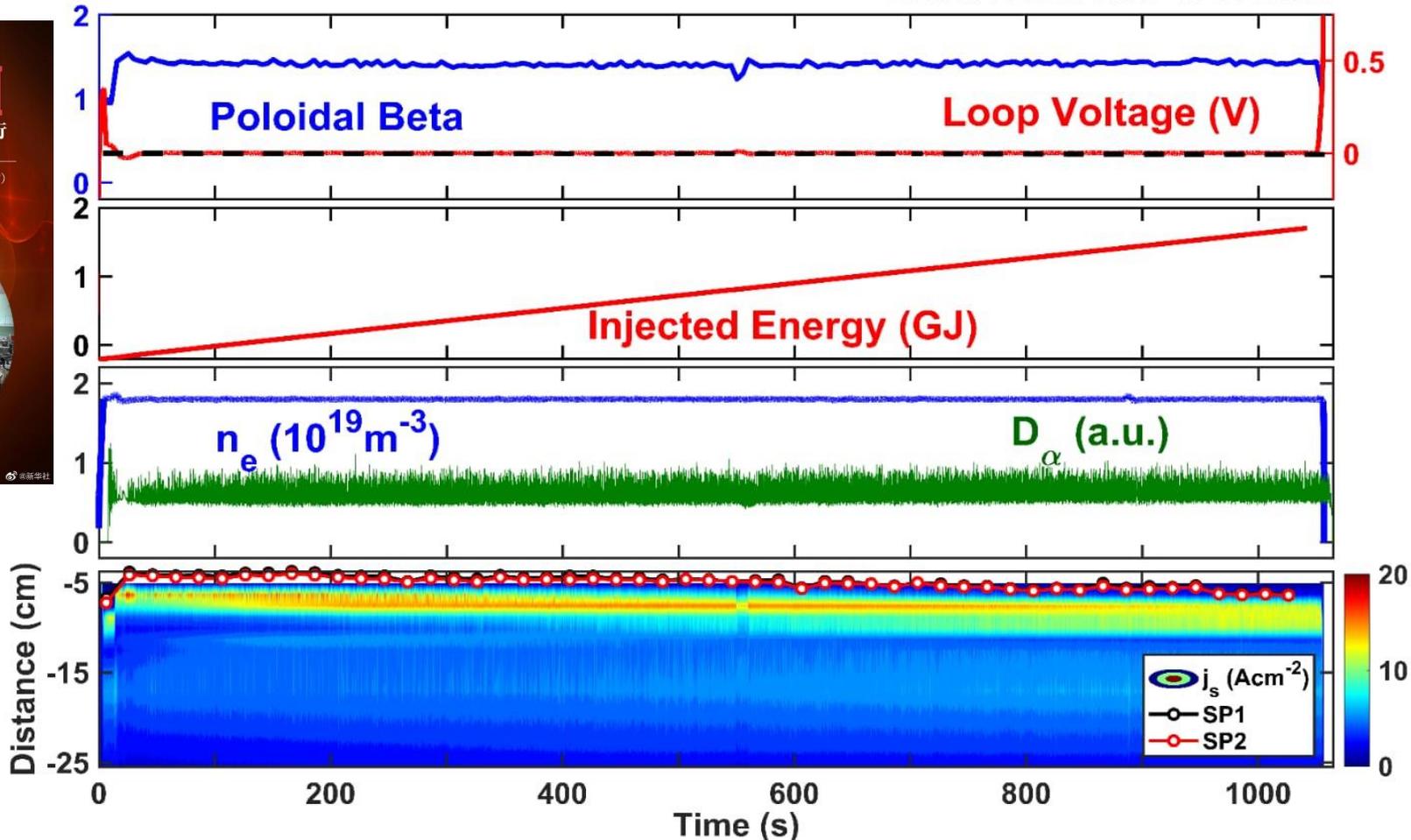


- EU: Helium Cooled Lithium Lead
- EU: Helium Cooled Pebble Bed
- JA: Water Cooled Ceramic Breeder
- KO: Helium Cooled Ceramic Reflector
- CN: Helium Cooled Ceramic Breeder
- IN: Lithium Lead Ceramic Breeder

Progrès récents

Le tokamak EAST a réalisé fin décembre une décharge stable de 1056 secondes. Avec une énergie injectée de l'ordre de ~ 1.75 GJ, le record de Tore Supra de 2003 (durée 630 s, énergie injectée 1.17 GJ) est battu.

EAST#106915 2021-12-30 21:55



1056秒

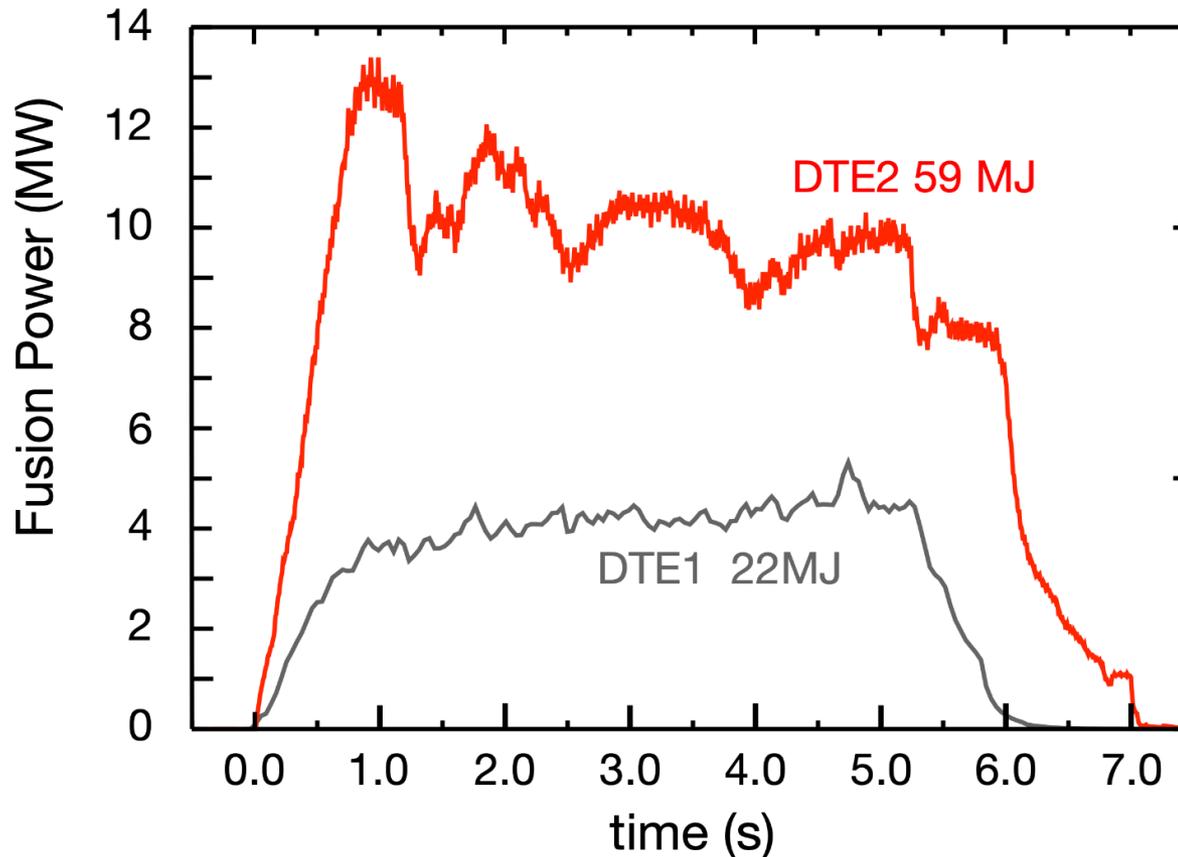
长脉冲高参数等离子体运行

2021年12月30日晚, 中国“人造太阳”——全超导托卡马克核聚变实验装置 (EAST) 创造新纪录

新华社

En décembre 2021, le JET, le tokamak européen près d'Oxford (UK) a produit 59 MJ d'énergie de fusion. C'est plus du double du précédent record de 1997.

<https://www.youtube.com/watch?v=kTLtmiCELL8>



<https://www.euro-fusion.org/news/2022/european-researchers-achieve-fusion-energy-record/>