Les défis de la fusion thermonucléaire

présenté par P. Monier-Garbet,
Institut de Recherches sur la Fusion Magnétique
CEA Cadarache, 13108 St Paul lez Durance

Plan de l'exposé

1. Les plasmas de fusion
2. Les défis scientifiques et techniques
3. Le projet ITER et l'organisation des recherches

La fusion thermonucléaire: produire de l'énergie

D + T ⇒ He + n

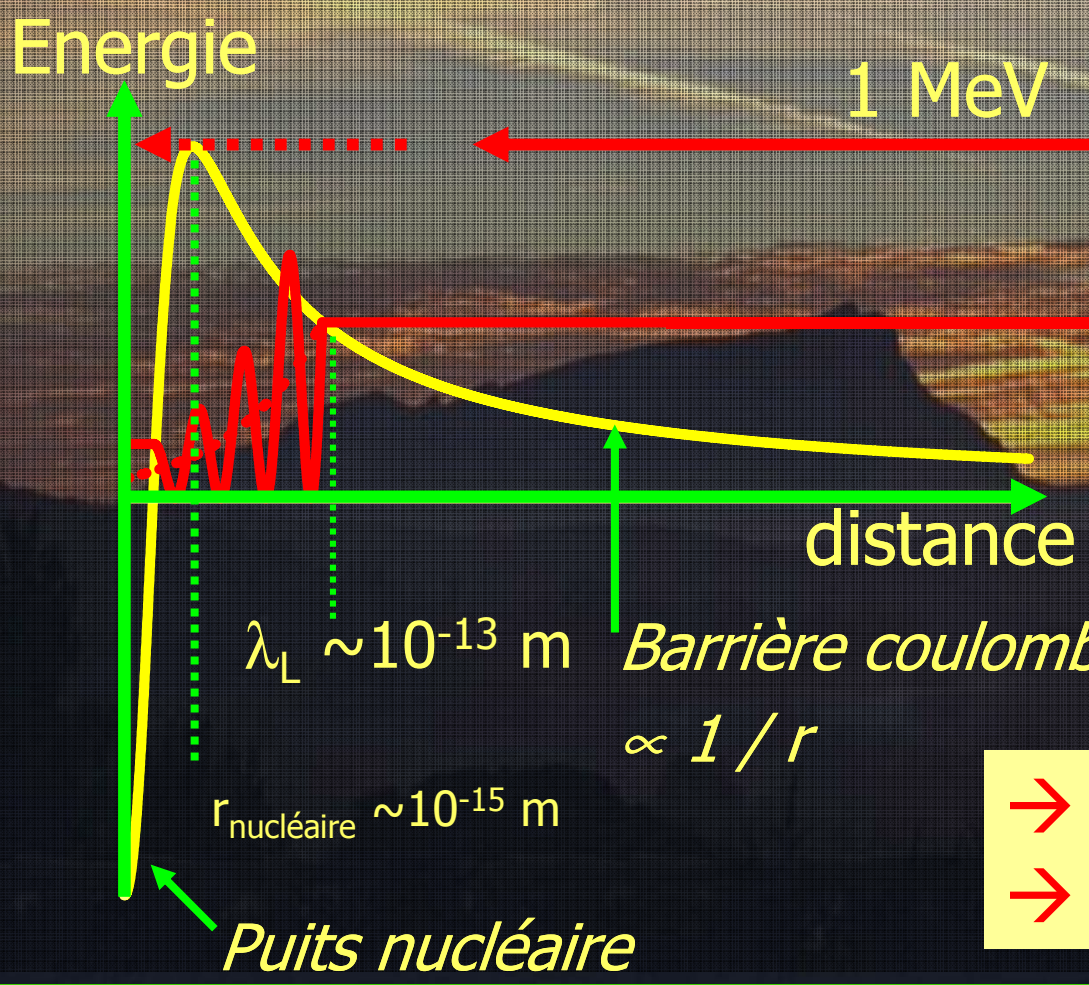
⇒ 17,6 MeV

= He (1/5) ⇒ Chauffage des noyaux

+ n (4/5) ⇒ source de T + source d'énergie

n + Li ⇒ He + T + 4.8 MeV

Conditions de réalisation: T>10keV, état plasma

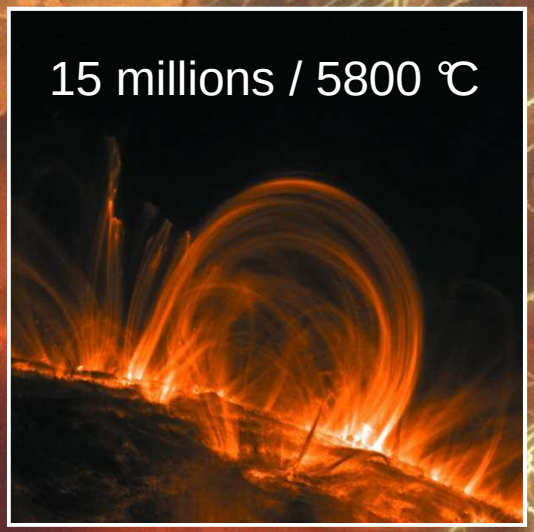


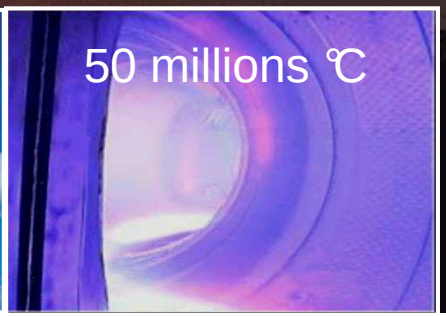
Energie
~ énergie produite

Effet tunnel
10keV ~ optimum
gain / probabilité

→ Etat plasma,
→ Chauffage du plasma

L'univers: du plasma à l'état (presque) pur





Conditions de réalisation: plasma confiné

Condition d'auto-entretien (ignition, Pext=0)

$$n_i \tau_E > 6x10^{20} sm^{-3}$$

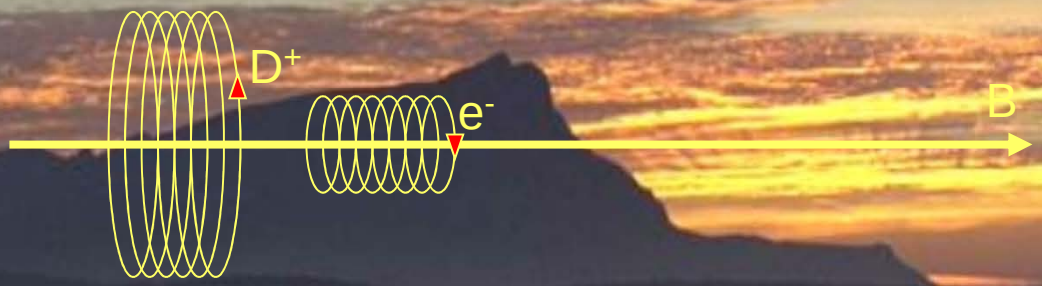
τ_E: temps de vie de l'énergie

= critère de Lawson, déduit du bilan de puissance

$$\left(\partial_t + \frac{1}{\tau_E}\right) 3nT = n_D n_T \langle \sigma v \rangle_{fusion} E_\alpha$$

Un champ magnétique intense (10^5x $B_{terrestre}$) confine les particules

Champ B uniforme

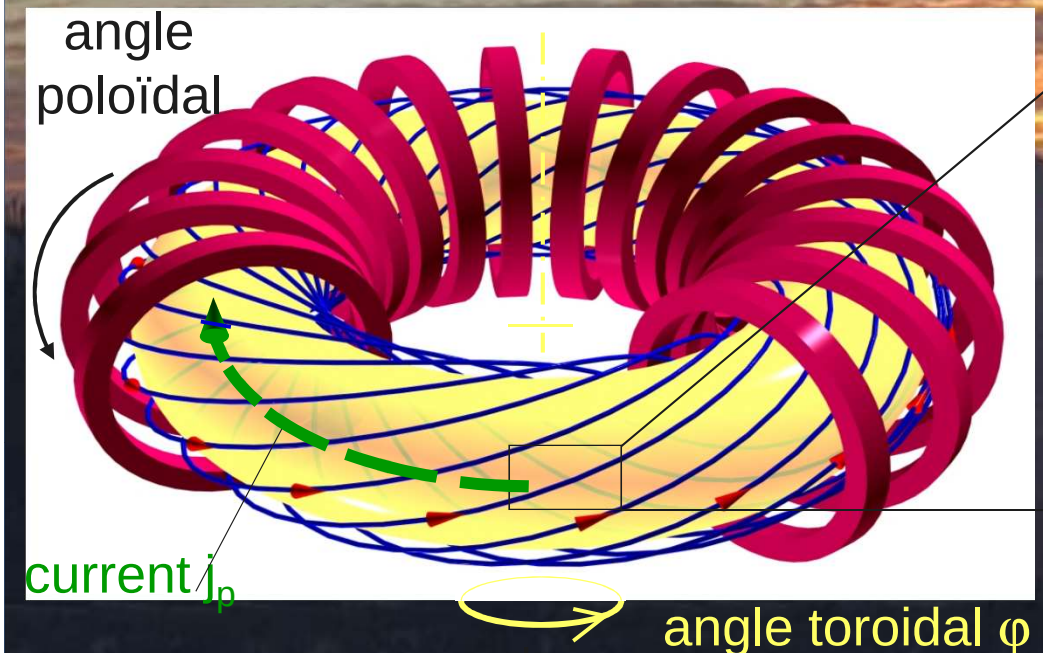


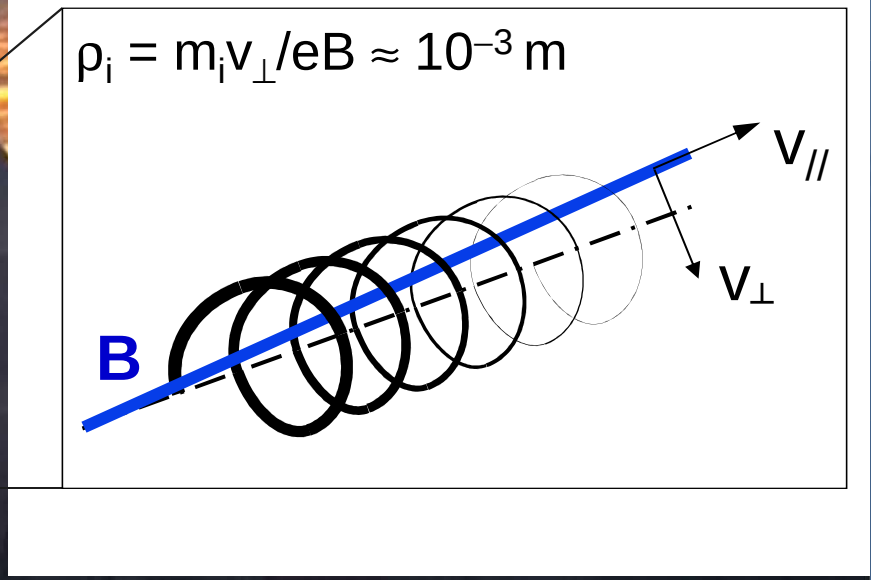
mouvement ⊥ = rotation de Larmor : ρ (≡ $v_\perp$)

mouvement // = libre, ∃ $v_{//}$

Et enfin… le tokamak

- *lignes de champ hélicoïdales*
- *trajectoires des particules ~ lignes de champ magnétique (transp.// >> transp. ⊥)*





La Fusion pourquoi? … avantages

D + T ⇒ He + n

1000g → 996.25g + 93×10^6 kWh

= consommation en énergie
de 2000 personnes par an
en Europe !

Energie nécessaire pour toute une vie : 45g (D + T)

avantages ... (suite)

- peu d'impact sur l'environnement - pas d'effet de serre.
- pas de déchets radioactifs à durée de vie longue.
- pas de risque d'accident de criticité (pas de réaction en chaine).
- la matière première est abondante : le Tritium sera produit à l'intérieur du réacteur (par les neutrons qui réagissent avec le Lithium de la couverture), et le Deuterium se trouve dans ….

L'EAU !

… inconvénients

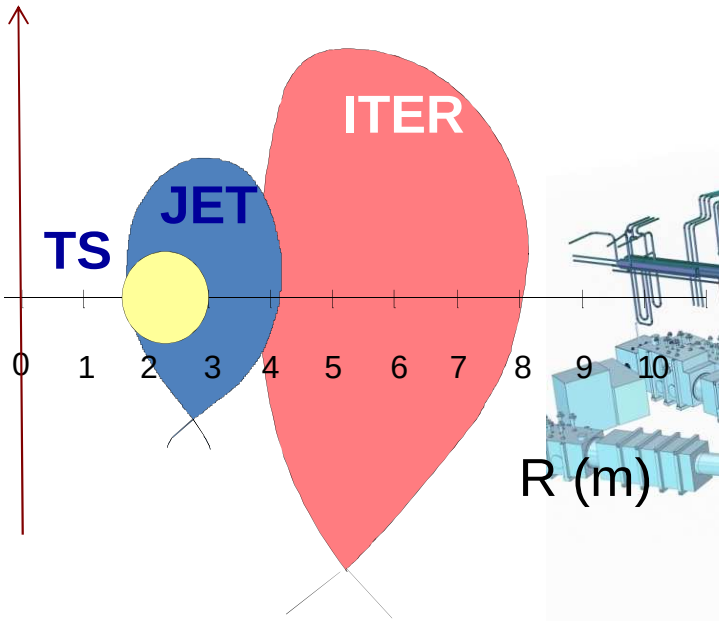
- réaction à seuil
- contraintes matériaux (neutrons …)

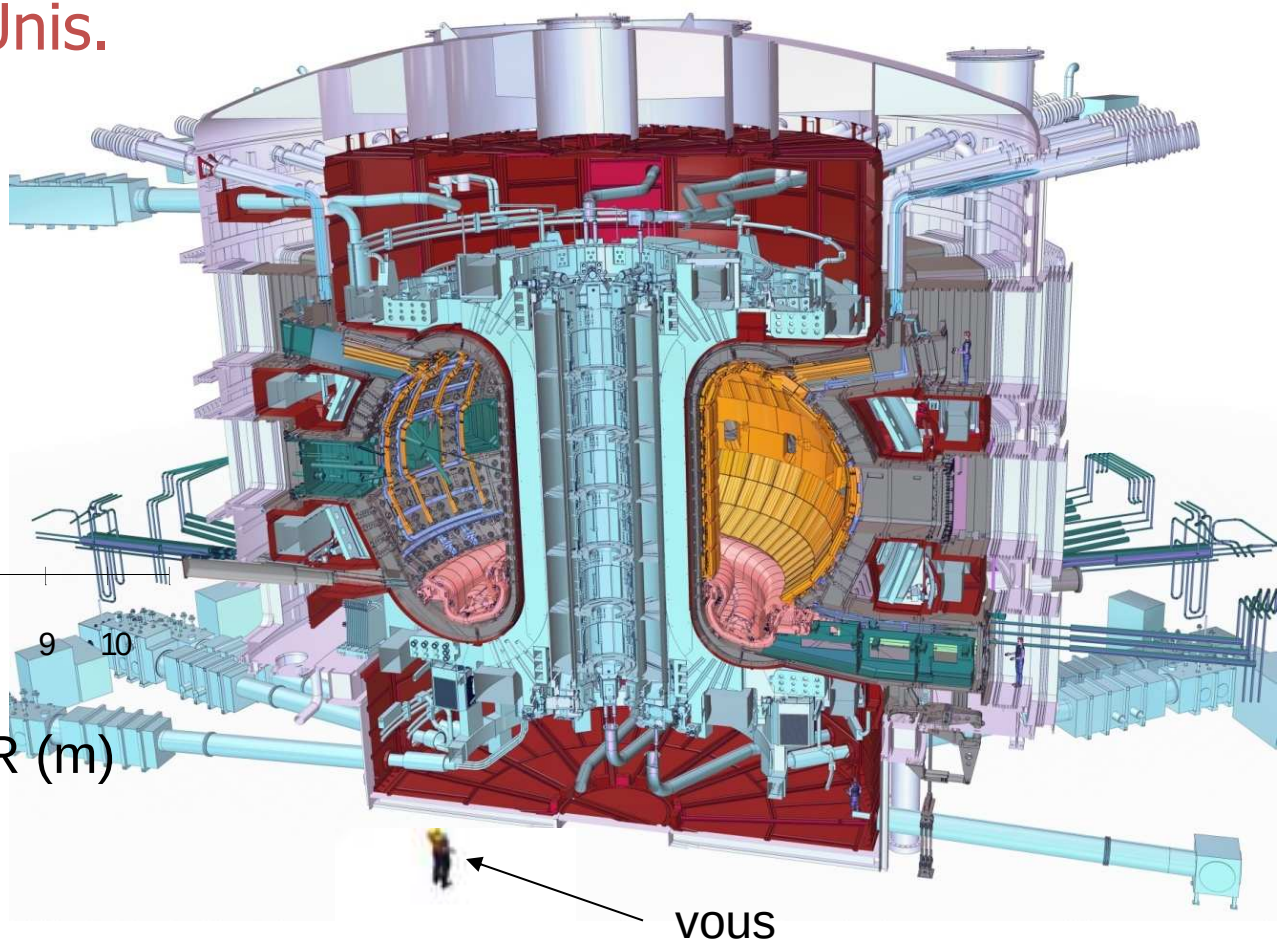
- production de Tritium (Li + n →T + He).
- stationnarité

1. Les plasmas de FUSION
2. Les défis scientifiques et techniques
Le projet ITER et son dimensionnement
Interaction plasma-paroi
Défis technologiques
3. Organisation des recherches

Le projet ITER

ITER est un projet international de recherche sur l'énergie de fusion qui associe l'Europe (+ la Suisse), la Chine, l'Inde, le Japon, la Fédération de Russie, la Corée du Sud et les Etats Unis.





Le projet ITER/ Objectifs

- Démontrer la faisabilité scientifique et technique de l'utilisation de la fusion comme source d'énergie dans un but pacifique.

- Concevoir, construire et opérer une expérience tokamak à une échelle qui permette d'atteindre cet objectif.

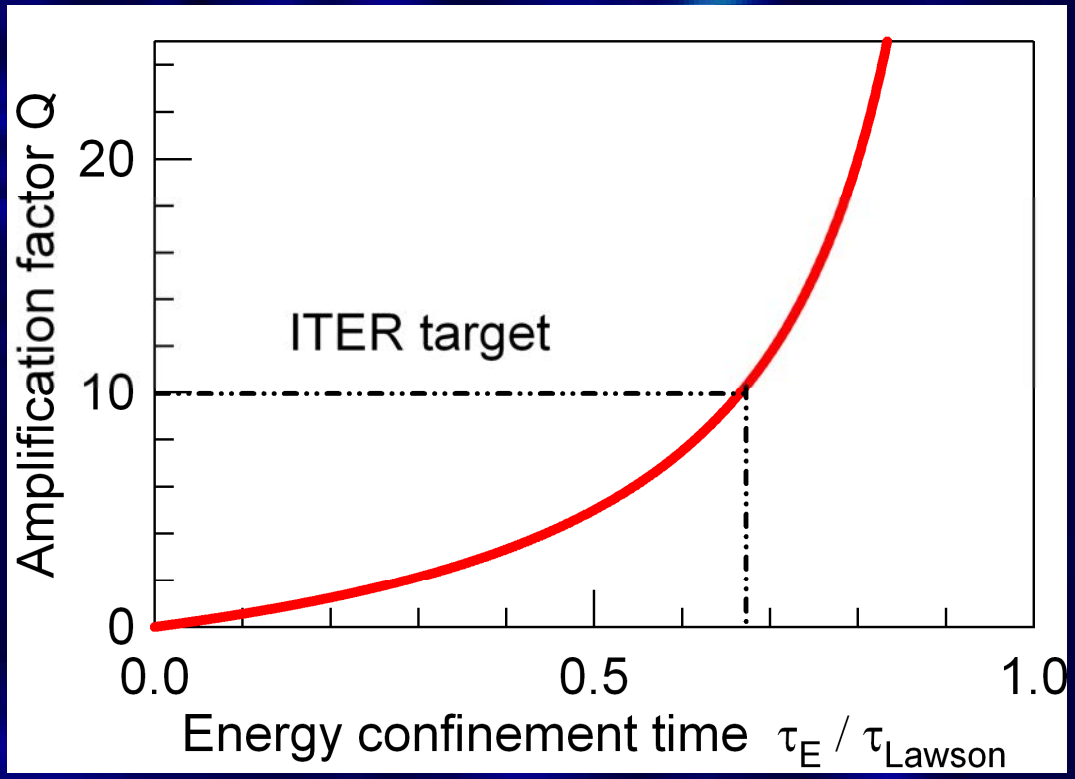
- ITER est prévu pour confiner un plasma DT chauffé de façon dominante par les particules alpha
  = un plasma auto-entretenu.

Dimensionnement

Le temps de confinement gouverne les performances du plasma

Facteur d'amplification

$$Q = \frac{P_{Fusion}}{P_{add.}}$$

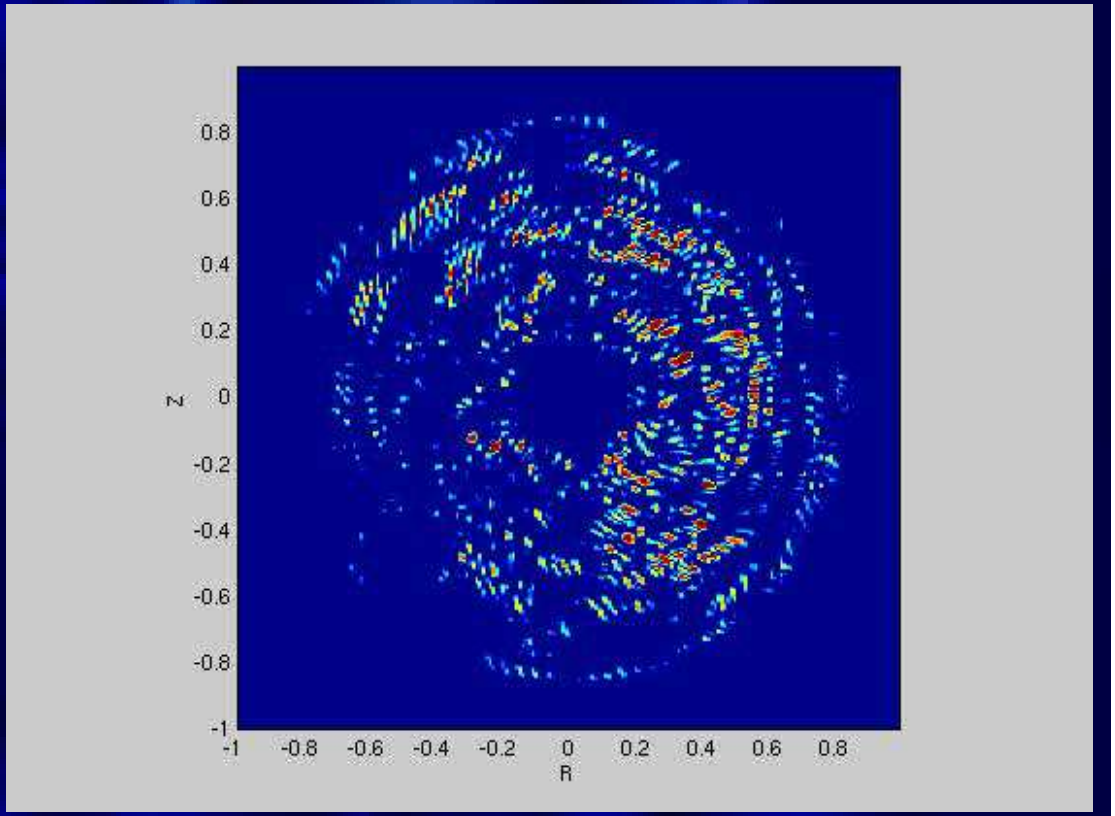


Dimensionnement

Les pertes d'énergie sont essentiellement conductives.

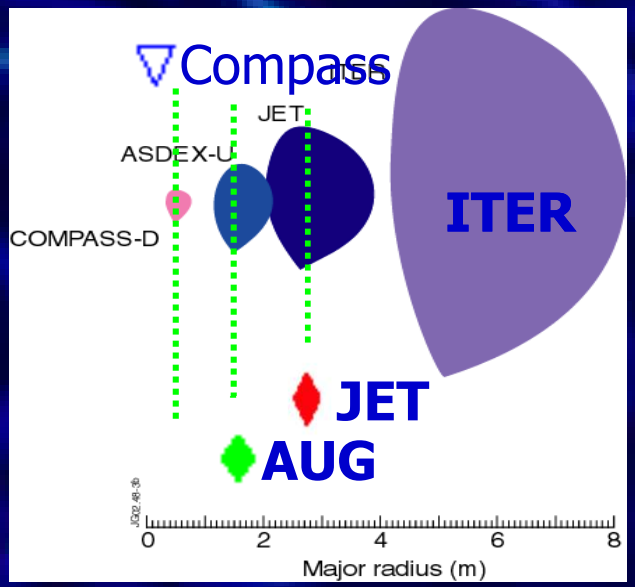
$$\tau_E \approx \frac{a^2}{\chi_{turb}}$$

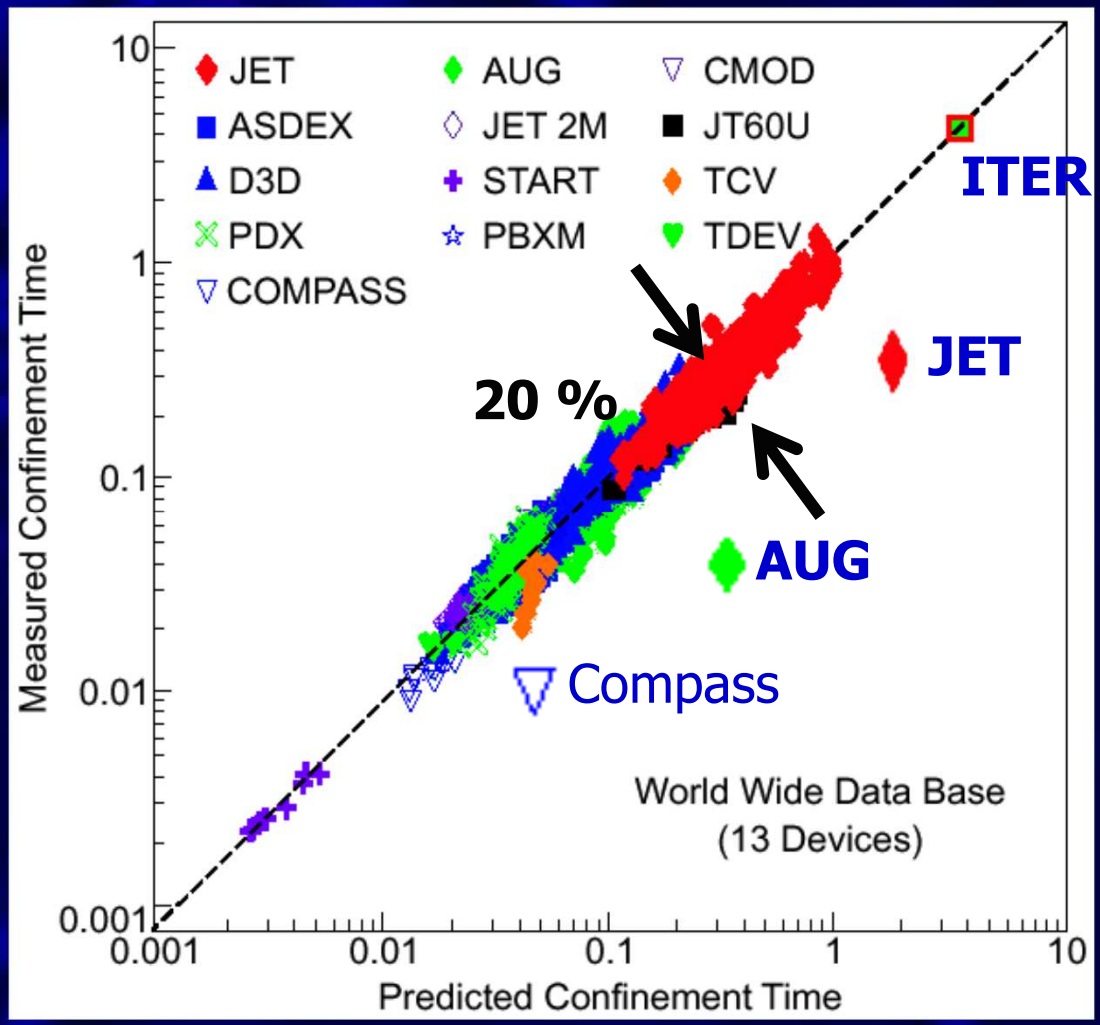
La diffusion dûe à la turbulence (χ_{turb}) détermine τ_E.



Flux Turbulent

LOIS d'ECHELLE, TAILLE d'ITER





$$\tau_{th} \propto I_p R^2 P^{-2/3}$$

L'interaction plasma-paroi: ordres de grandeur

Régime stationnaire:

ITER: 480MW neutrons, ~120MW alphas à extraire en continu → avec toutes les techniques de réduction, ~15-20MW/m^2

à comparer à:

Tore Supra: ~10 MW/m^2

Navette spatiale 2 MW/m^2

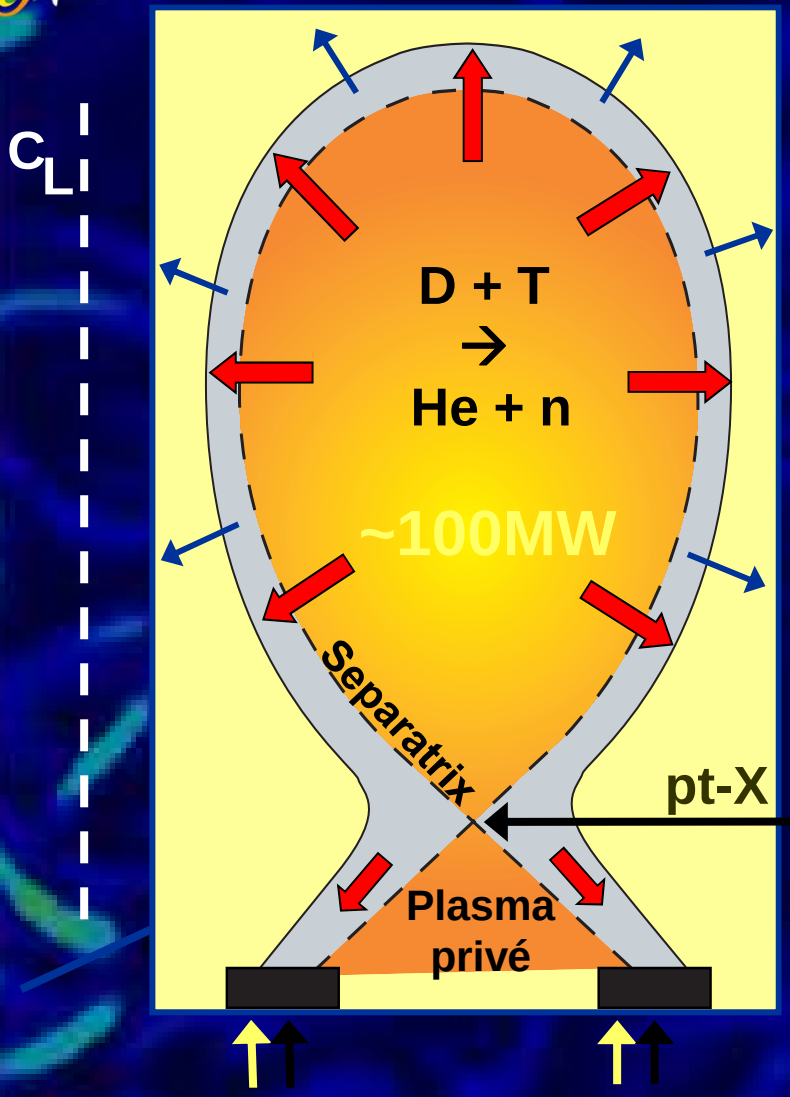
Surface du soleil 70 MW/m^2

Régimes transitoires :

perte rapide (<1ms) de 1 à 100% de l'énergie du plasma.

ITER: ELMs 20 MJ attendus → endommagement des matériaux si > 0.5MJ/m^2 (destruction µm surface)

L'interaction plasma-paroi: configuration magnétique



En régime stationnaire dans ITER, le flux d'énergie à la paroi doit être

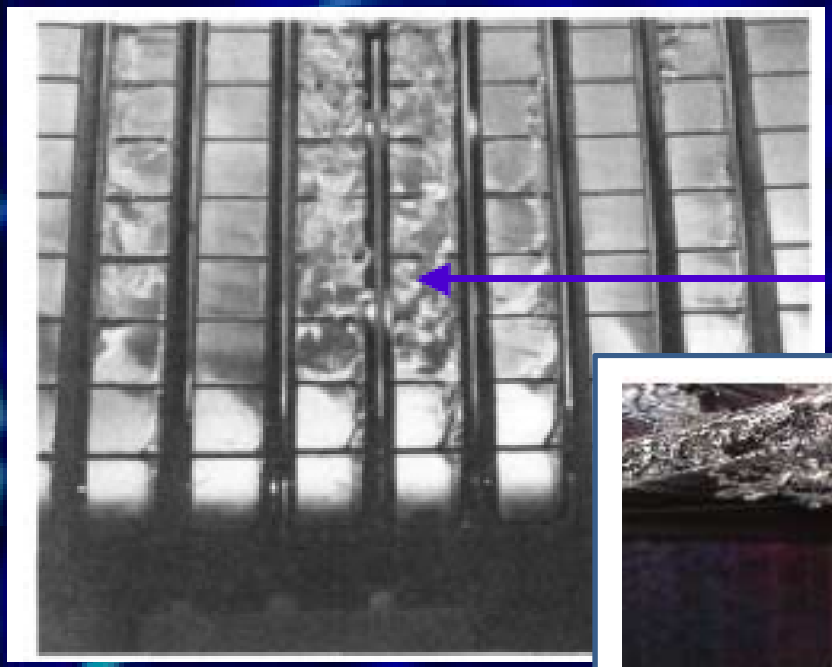
$q_{\perp} \leq 10\ MWm^{-2}$

Pour diminuer le flux d'énergie à la paroi:

- configuration magnétique
- + géometrie du divertor
- + rayonnement plasma

Interaction plasma-paroi

→ endommagement des matériaux, formation de poussières



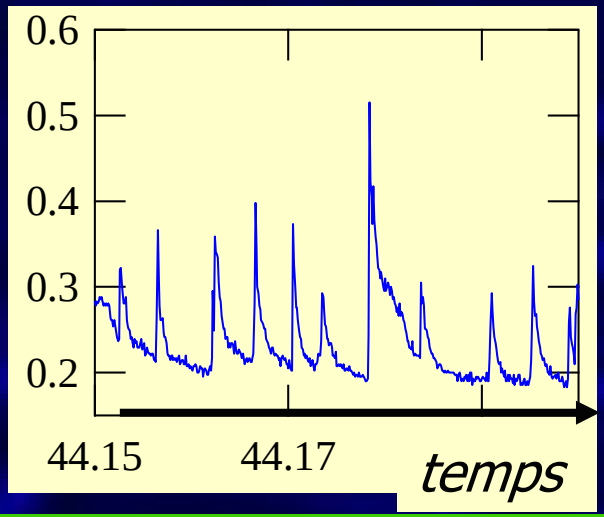
Tore Supra

JET

Exemple de régime transitoire les ELMs

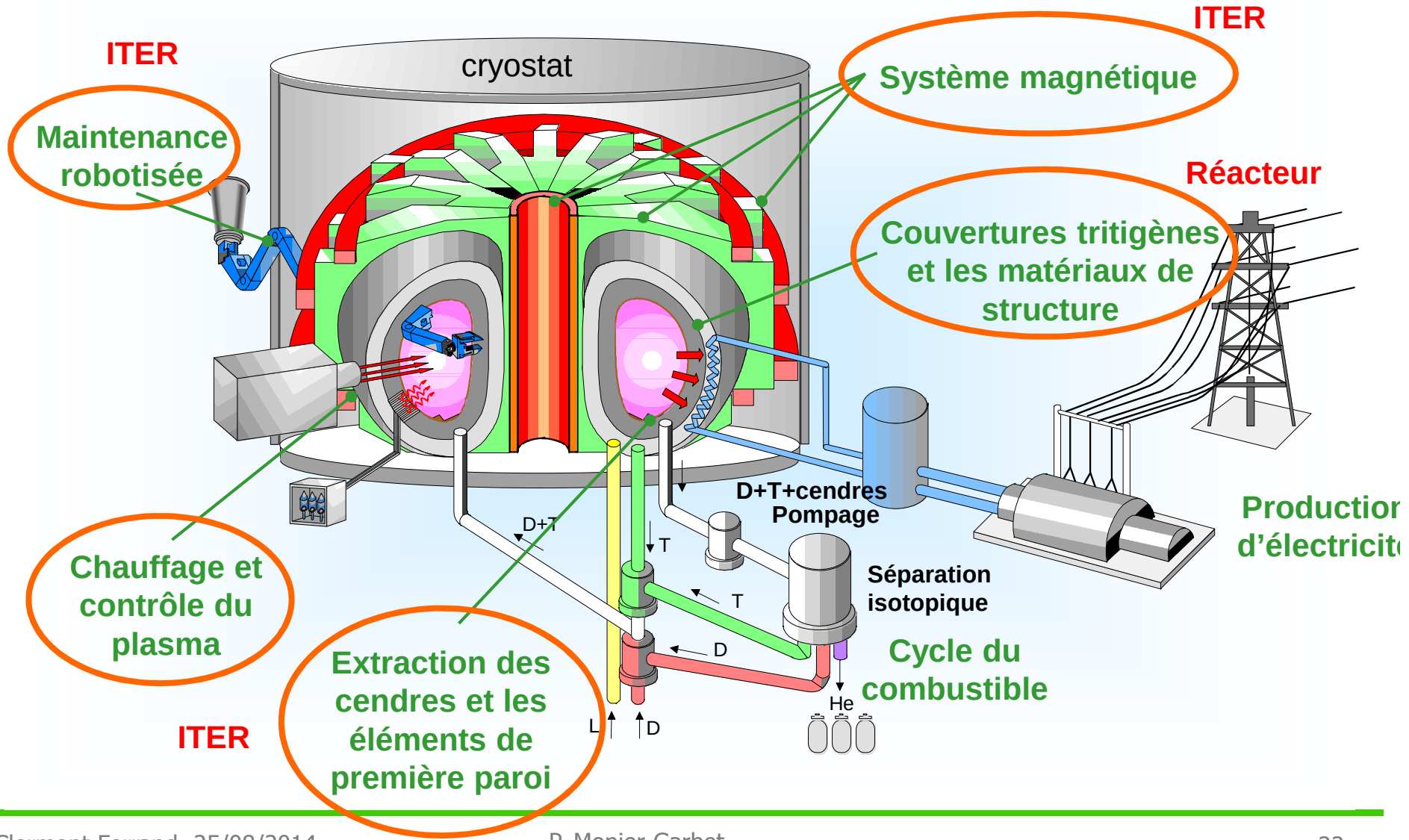
émission visible
image moyenne

Impact
d'un ELM
sur la paroi



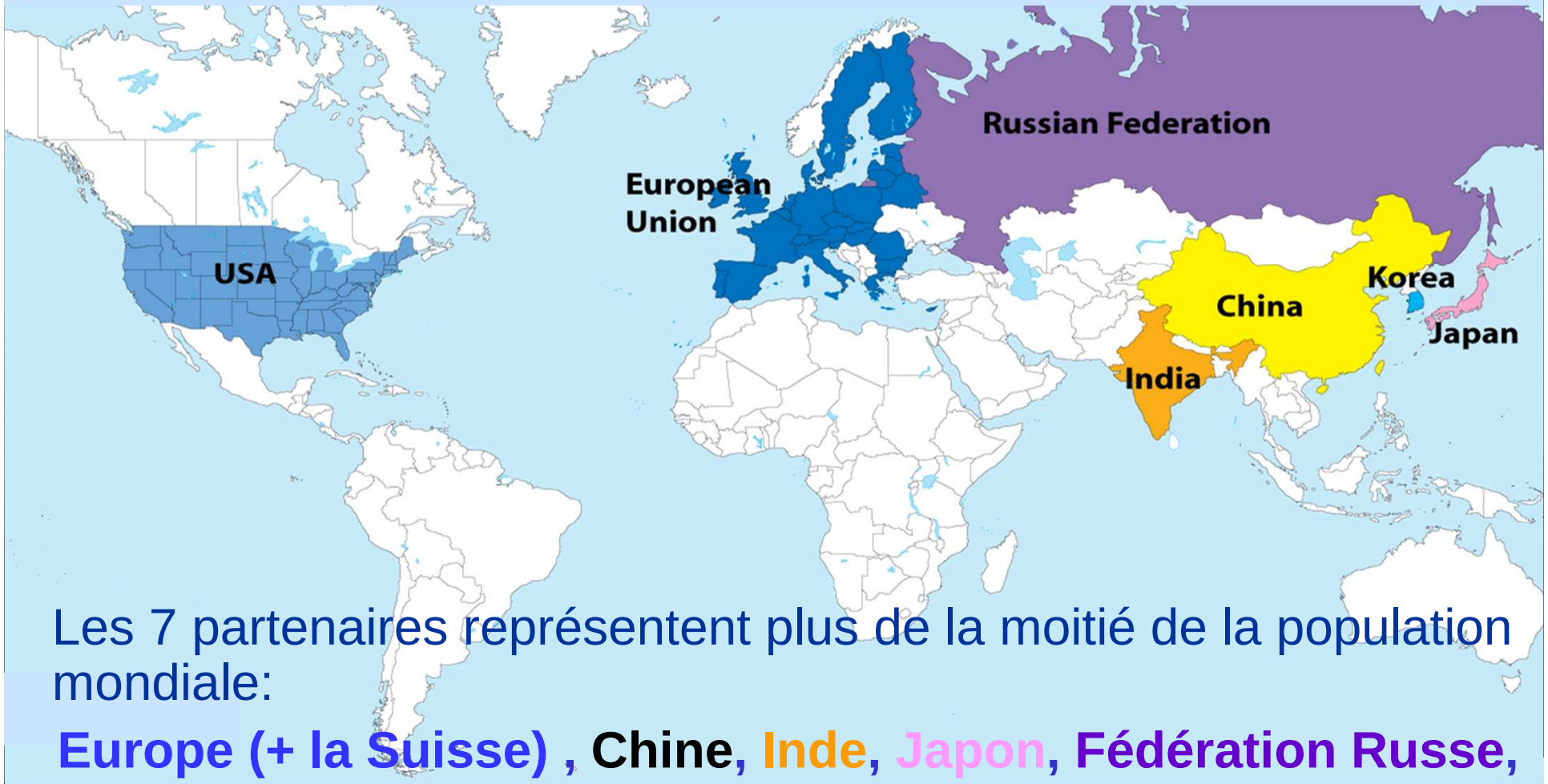
évolution : ELMs

… + des défis technologiques



1. Les plasmas de FUSION
2. Les défis scientifiques et techniques
3. Le projet ITER et l'organisation des recherches

ITER: une coopération internationale



Les 7 partenaires représentent plus de la moitié de la population mondiale:

Europe (+ la Suisse) , Chine, Inde, Japon, Fédération Russe, Corée du Sud, Etats Unis.

90% of ITER components will be supplied “in-kind” by the Members.

Le site de Cadarache

ITER: 2000 pers (construction)
1000 pers (exploitation)

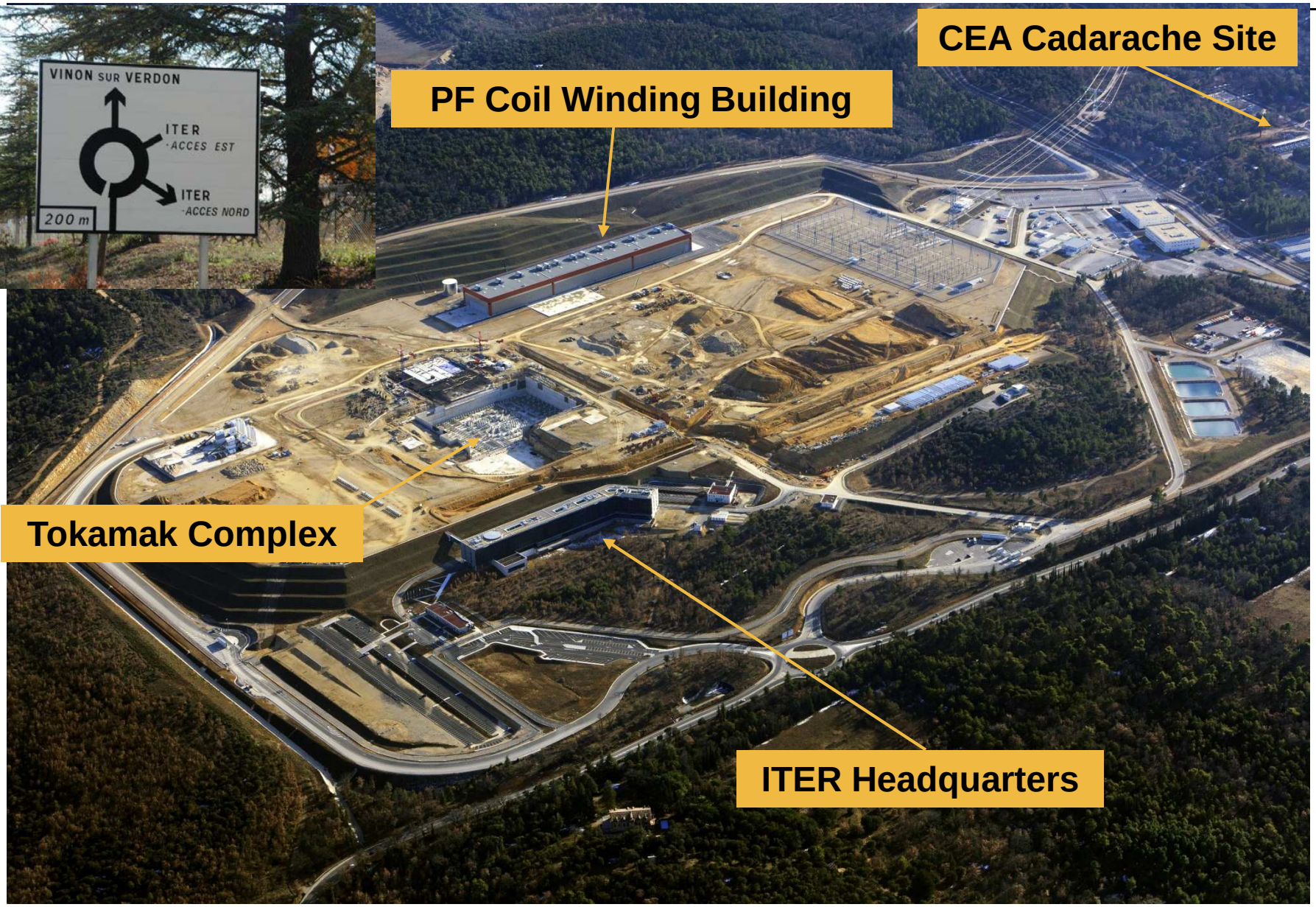
Centre CEA: 4500 pers

Clôture du centre

CEA

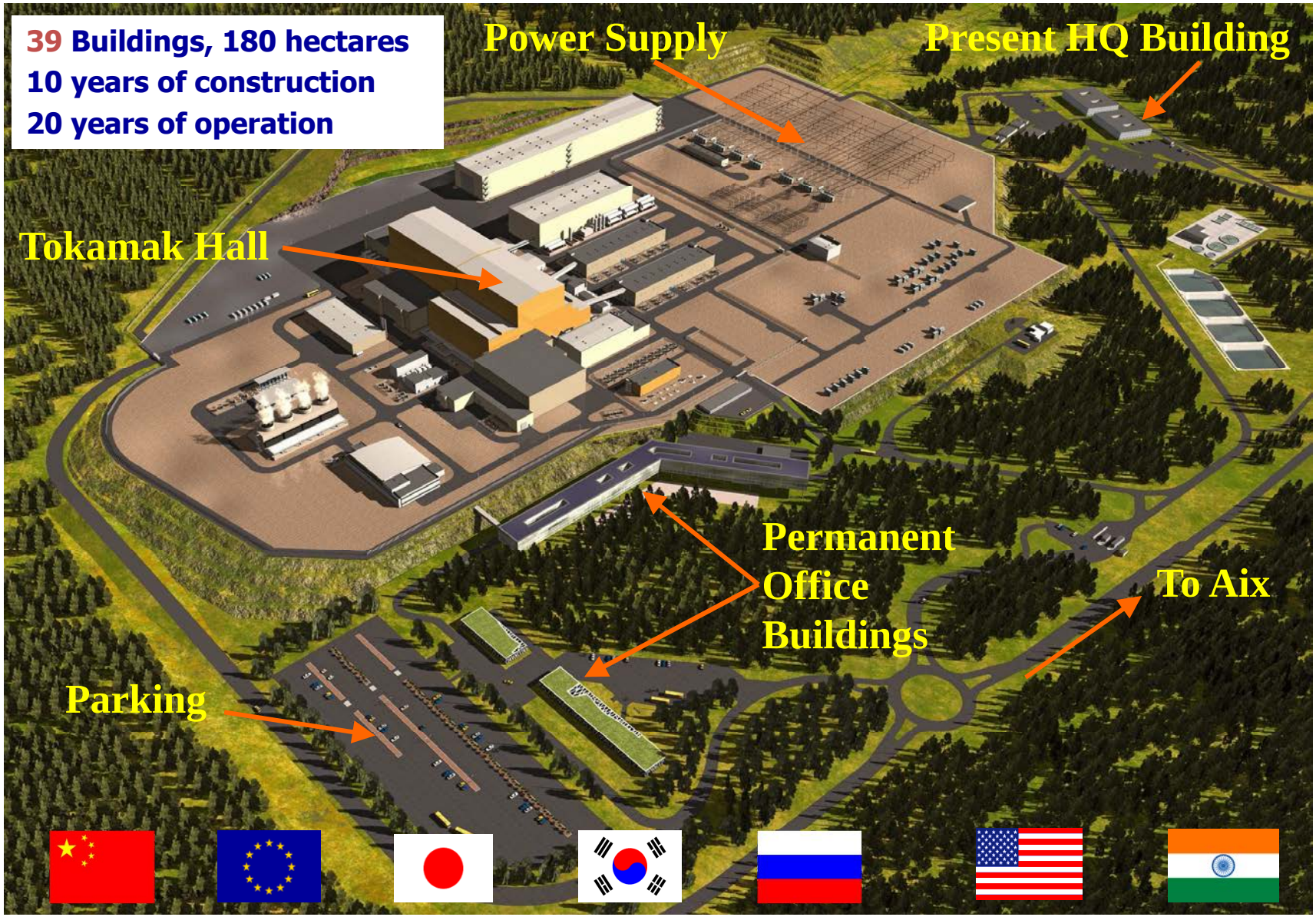
Tore Supra

ITER: avancement du chantier à Cadarache



ITER: avancement du chantier à Cadarache

Site ITER après construction



- Equipe ITER installée sur le site de Cadarache depuis ~8ans, aujourd'hui ~500 personnes.

- ITER IO établie formellement en October 2007
- Construction démarée en Juillet 2010, équipe ITER IO installée sur le site en Octobre 2012.
- 10 ans construction, 20 ans d'opération.
- Coût: 5 billion Euros pour la construction, et 5 billion pour l'opération et le démentèlement.

Organisation des recherches

International

ITER, siège Cadarache, ~ 500 personnes

Partenaires:

Une agence ITER par partenaire : fournitures en nature, pour l'Europe : F4E, siège Barcelone

Europe:

Commission européenne (Consortium EUROFUSION)

Formation: réseau FUSENET, master et doctorat

EFDA

En France:

Laboratoires: Fédération de Recherches sur la Fusion

Formation: spécialité de Master co-habilitée sur 4 sites

Agence ITER France: accueil, débat public, aménagement du site, licensing, démantèlement.

Conclusion

les plasmas de fusion = un 'milieu extrême'

Les recherches sur la fusion thermonucléaire =

un programme scientifique et technologique

dimension internationale exceptionnelle

pluridisciplinaire (physique fondamentale

+ importance croissante de la technologie)