

***Fusion Thermonucléaire, la filière par
Confinement Magnétique.
Avancées, défis et perspectives***

Gérard Bonhomme

gerard.bonhomme@univ-lorraine.fr

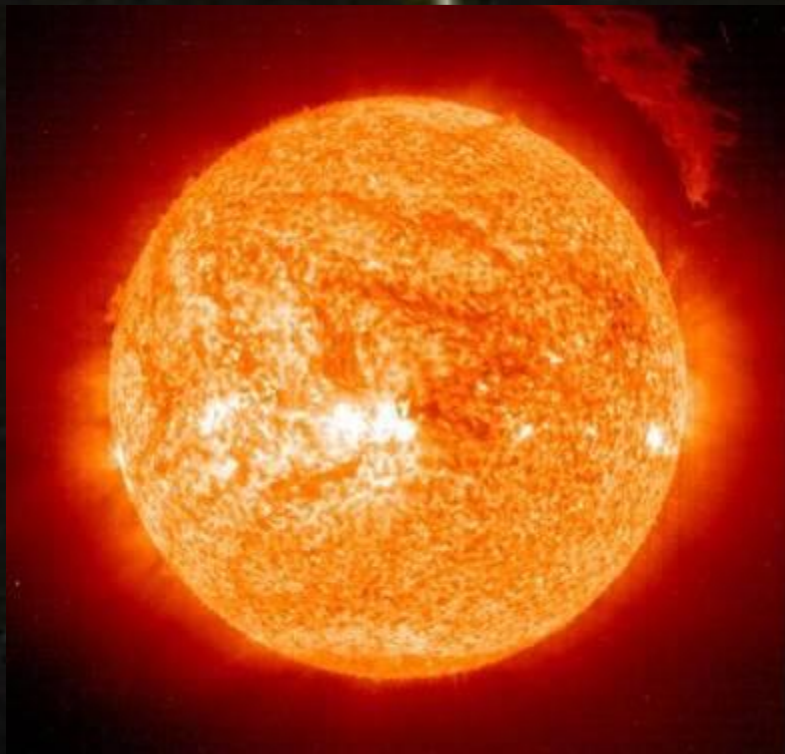
Remerciements à Jean Jacquinet, Alain Bécoulet et collègues CEA/IRFM

Résumé

La maîtrise de l'énergie de fusion, seule source d'énergie nucléaire à ressources pratiquement illimitées et faible impact environnemental, permettrait à terme de couvrir les besoins énergétiques de l'humanité et de réellement décarboniser l'économie mondiale. Mais la voie est encore longue, en dépit de progrès très significatifs, car les défis à relever sont nombreux.

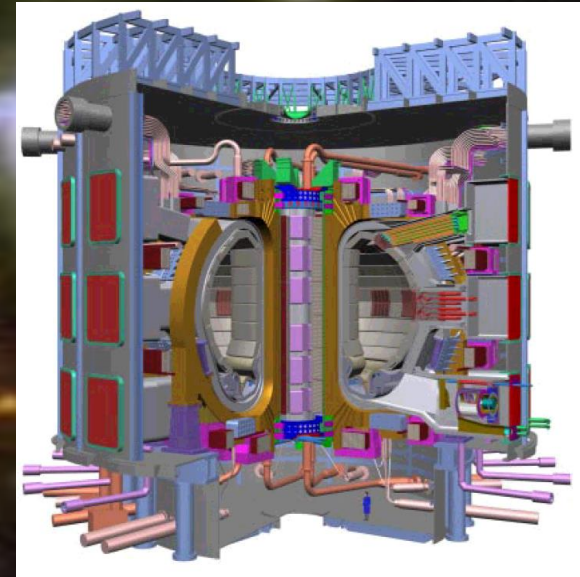
Après un rapide rappel des principes de la fusion par confinement magnétique et des étapes franchies jusqu'au projet ITER, dont la construction avance maintenant rapidement sur le site de Cadarache, les défis et enjeux de cette dernière étape indispensable avant le premier réacteur électrogène seront résumés. Les résultats du programme expérimental prévu seront en effet décisifs, mais l'avenir de la fusion dépendra aussi d'autres recherches en cours.

Ces dernières concernent en particulier le choix de la configuration magnétique optimale dans la perspective du réacteur électrogène. A côté des configurations de type tokamak, dont relève ITER, celles de type stellarator n'ont pas dit leur dernier mot. Nous ferons le point sur les avancées et les projets dans ce domaine, illustré notamment par la machine Wendelstein-7X en opération à Greifswald depuis 2015. Quelle que soit la configuration magnétique finale, de nombreux défis sont à relever, en particulier dans le domaine des matériaux. Nous montrerons comment d'éventuelles ruptures technologiques pourraient survenir au travers de projets innovants et ambitieux lancés récemment de par le monde par de nombreuses start-ups.



$4 \cdot 10^{26}$ watts \rightarrow 15 W/m³
15 · 10⁶ K, 150 tonnes/m³

La fusion par confinement magnétique : **Contexte, avancées, défis scientifiques**



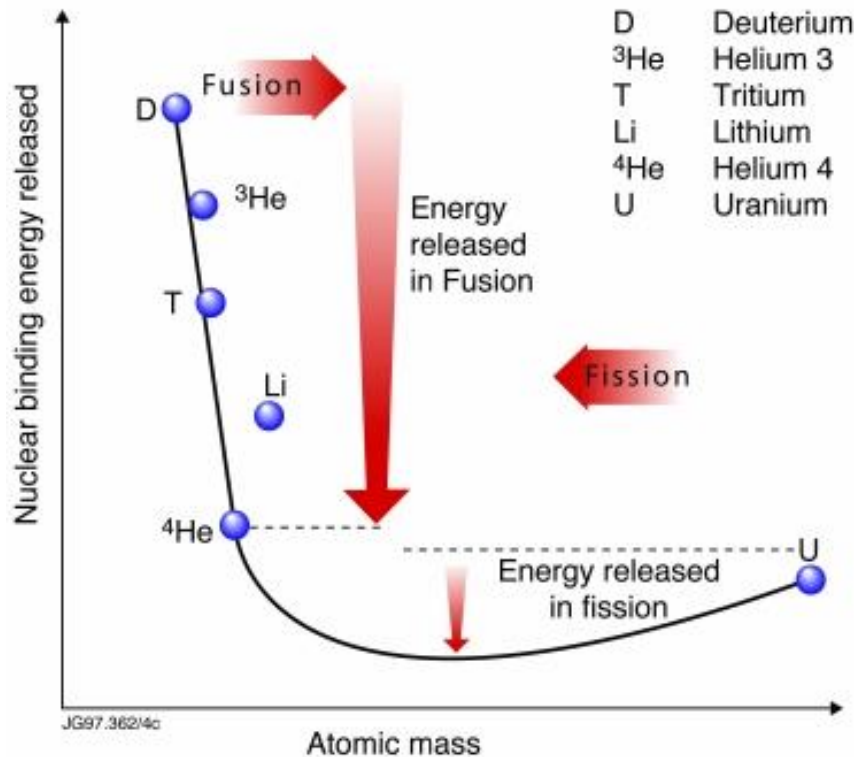
$5 \cdot 10^8$ watts \rightarrow $5 \cdot 10^5$ W/m³
150 · 10⁶ K, 10 mg/m³

Fusion Thermonucléaire, la filière par Confinement Magnétique

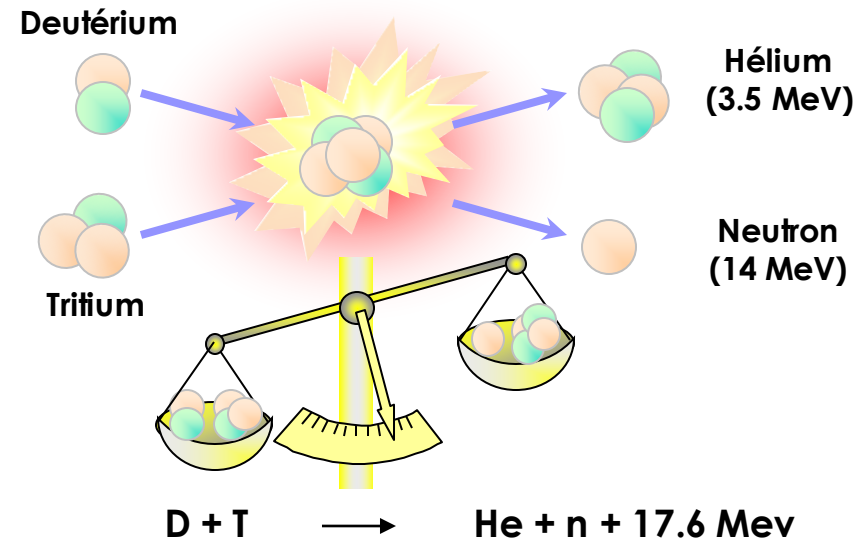
- **La fusion thermonucléaire : principes généraux**
- **La fusion par confinement magnétique :**
 - ✓ le confinement magnétique, le principe du tokamak
 - ✓ Progrès vers ITER et voie vers le réacteur
 - ✓ Les défis scientifiques et technologiques
- **Une synergie prometteuse avec :**
 - ✓ **Stellarators : Wendelstein 7-X**
 - ✓ **Projets des start-ups**

La fusion thermonucléaire : principes généraux

Fusion et fission



1 to 10 millions de fois plus d'énergie par unité de masse dans une réaction chimique de combustion.



La réaction **D + T** est la plus accessible, mais de très hautes températures sont requises (> 100 millions degrés) pour surmonter la répulsion Coulombienne entre les noyaux

Bilan de puissance

Puissance de Fusion

P_{fus} = nombre de réactions par seconde
× énergie libérée par une réaction

$$P_{\text{fus}} = n_D n_T \langle \sigma \cdot V \rangle_{DT} Q_{DT} = P_{\text{neut}} + P_{\alpha} \approx 5 P_{\alpha}$$

$$Q_{DT} = 17,6 \text{ MeV} = 2,8 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

Mélange D-T à 50/50 : $n_D = n_T = n_i / 2$

$$P_{\text{neut}} = 0,8 P_{\text{fus}} \quad P_{\alpha} = 0,2 P_{\text{fus}}$$

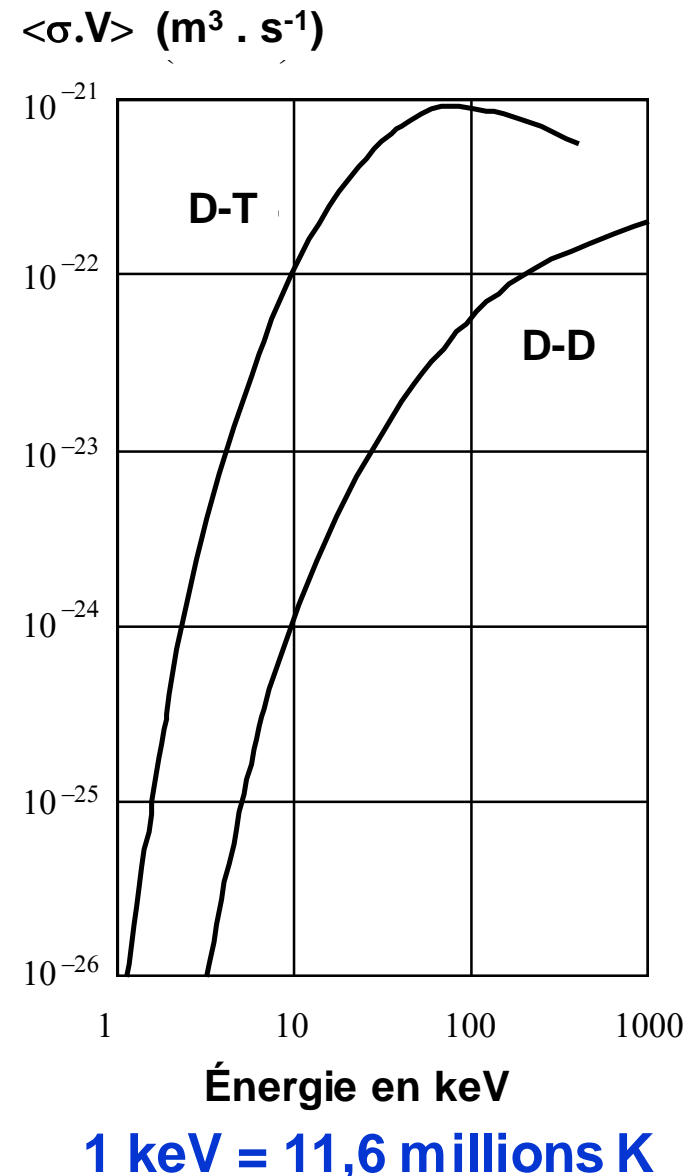
Puissance libérée dans le plasma

$$P_{\alpha} = 5.6 \times 10^{-13} n_D n_T \langle \sigma \cdot V \rangle_{DT} \text{ (W/m}^3\text{)}$$

Une centrale de puissance 1 GWe
consommerait 100 kg (D) + 150 kg (T) par
an au lieu de

~ 700 000 tonnes de pétrole ou de

~ 30 t d'uranium enrichi à 3% en ^{235}U



Le critère de Lawson et le facteur Q

$$n_i T_i \tau_E > 3.10^{+21} \text{ (keV. m}^{-3}\text{.s)}$$

Pression > 1 bar.s

τ_E temps de confinement de l'énergie

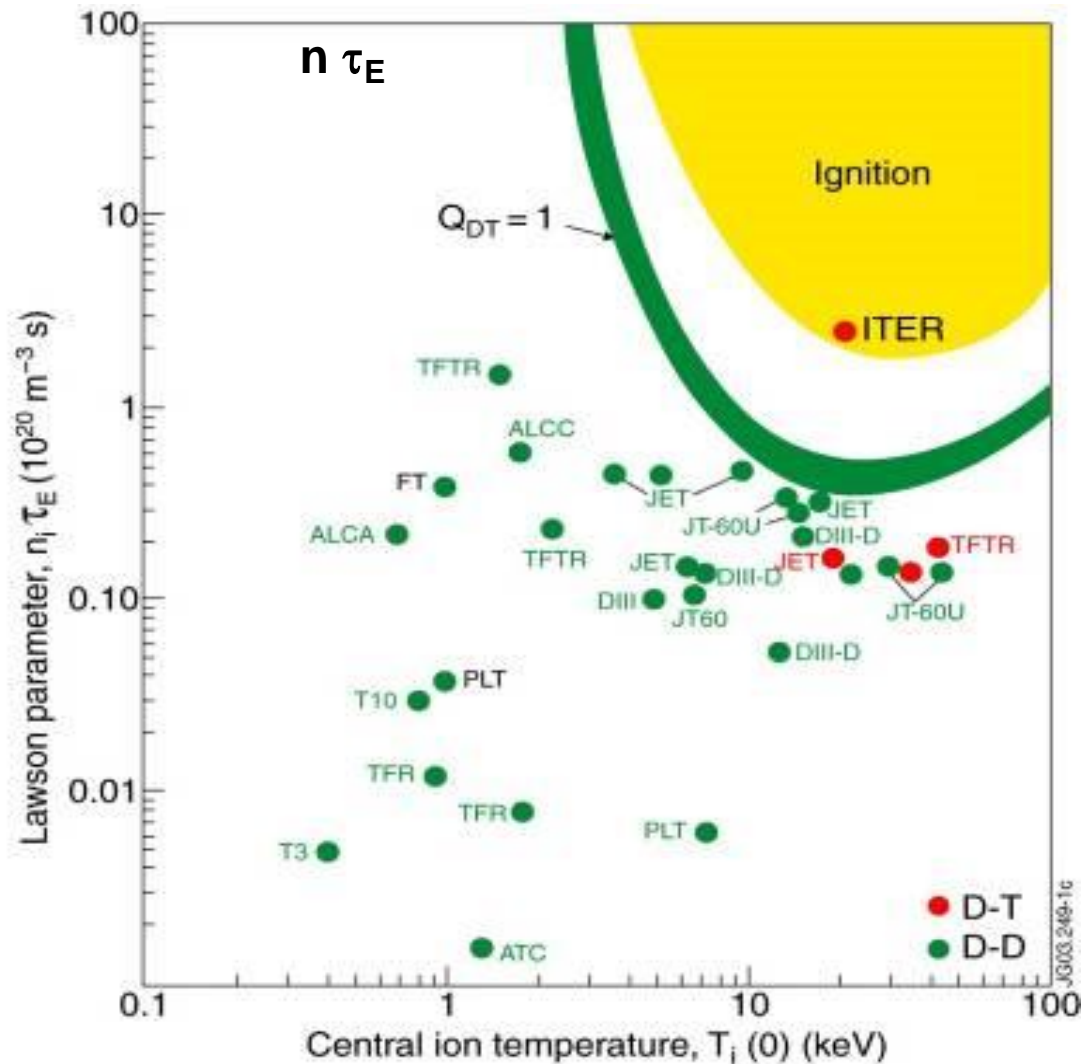
→ Temps caractéristique de refroidissement du plasma

$$P_{\text{fus}} = P_{\text{neut}} + P_{\alpha} \approx 5 P_{\alpha}$$

$Q = P_{\text{fus}} / P_{\text{inj}}$
(amplification de Puissance)

« Break-even » $Q = 1$
 $P_{\text{fus}} \geq P_{\text{inj}}$

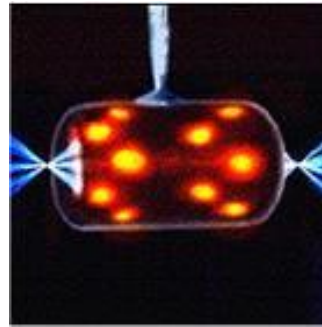
« Ignition » $Q = \infty$
 $P_{\text{inj}} = 0$
 $P_{\alpha} \geq P_{\text{pertes}}$



La fusion contrôlée sur Terre : 2 schémas

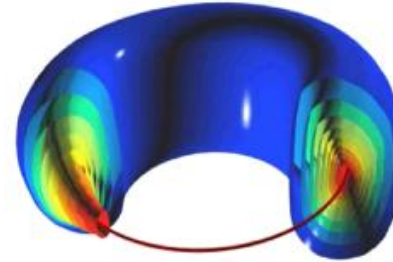
1 – Compression rapide d'une petite cible → confinement inertiel

- Petit volume (cible millimétrique)
- Haute densité (> 1000 fois la densité du solide !)
- Temps très courts (10^{-10} s)



2 – Confinement du plasma dans une bouteille magnétique → confinement magnétique

- Grand volume (1000 m^3)
- Faible densité (10^{-5} fois la densité de l'air)
- Faible pression de plasma (~ 2 atmosphères), équilibrée
par la pression magnétique (5 T \sim 100 atm.)
- Temps caractéristique de confinement de l'énergie : qqs secondes

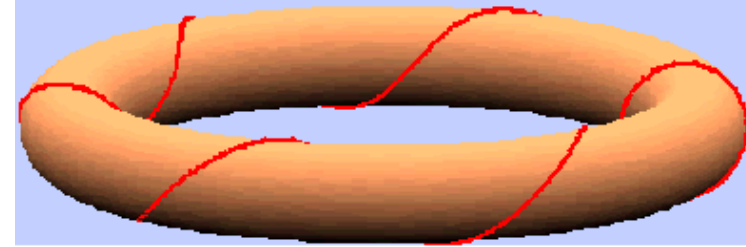


Fusion Thermonucléaire, la filière par Confinement Magnétique

- La fusion thermonucléaire : principes généraux
- **La fusion par confinement magnétique :**
 - ✓ le confinement magnétique, le principe du tokamak
 - ✓ Progrès vers ITER et voie vers le réacteur
 - ✓ Les défis scientifiques et technologiques
- **Une synergie prometteuse avec :**
 - ✓ **Stellarators : Wendelstein 7-X**
 - ✓ **Projets des start-ups**

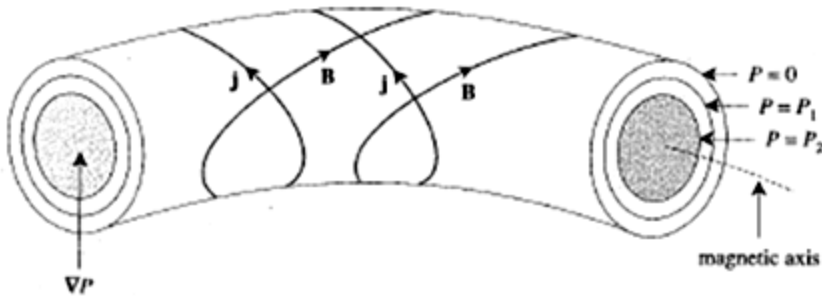
Confinement magnétique

Géométrie toroïdale → confinement obtenu en combinant deux composantes de champ magnétique, toroïdale et poloïdale



→

- Les lignes de champ magnétique s'enroulent en hélices autour de surfaces magnétiques emboîtées **isobares**



Structure en pelure d'oignons →



- Pression exercée par le champ magnétique

$$B^2 / 2 \mu_0 \sim 100 \text{ atm} \quad \text{pour } B = 5 \text{ teslas}$$

La bouteille magnétique

Tokamaks and Stellarators

Pour réaliser la configuration magnétique dans un volume toroïdal :

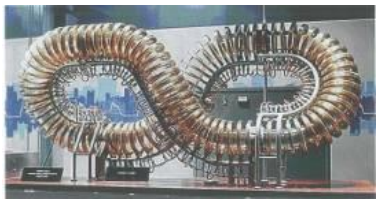
1. Champ toroïdal créé par des bobinages externes + courant toroïdal →

Tokamaks

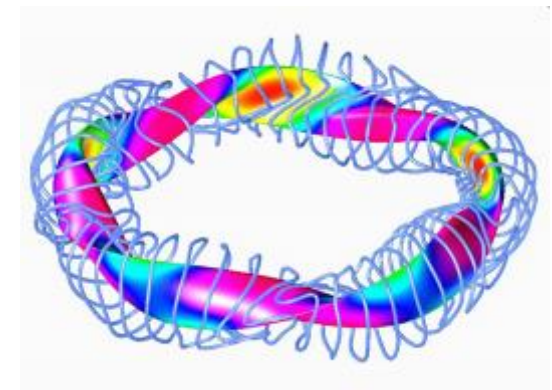
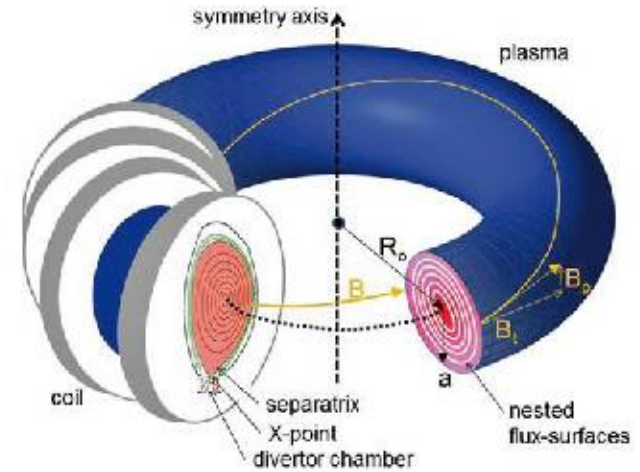
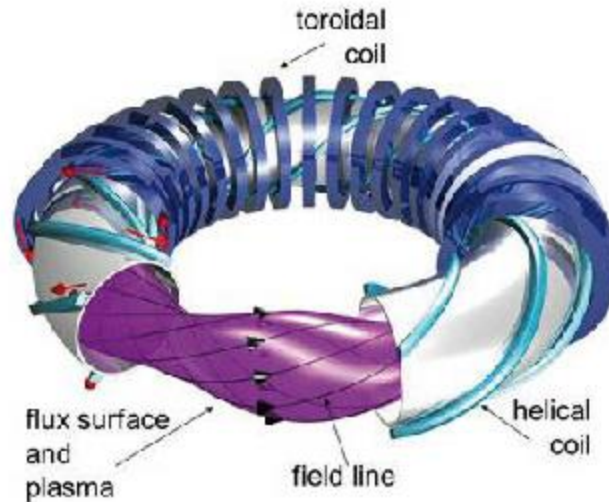
C'est actuellement la « bouteille magnétique »
la plus efficace

2. Champ magnétique entièrement
généré par des bobinages externes →

Stellarators



Spitzer, Princeton,
années 50

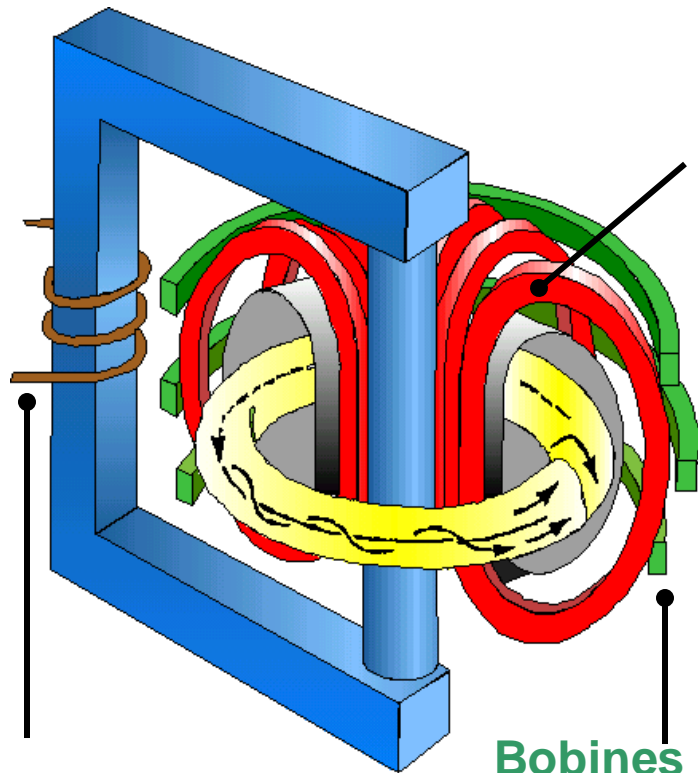


Wendelstein 7-X

Le Tokamak : comment fonctionne-t-il ?

- Tokamak (contraction de mots russes, *toroidalnaya, kamera, magnitnaya*) :
Transformateur dont le secondaire est le plasma (O. Lavrentiev, I. Tamm, A. Sakharov)

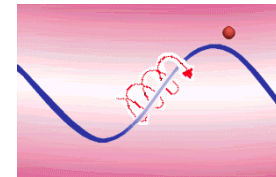
- Le confinement est obtenu par la combinaison de **deux** champs magnétiques:



① Le champ **toroïdal** généré par les bobines **toroïdales**

② Le champ **poloïdal** créé par le courant toroïdal du plasma

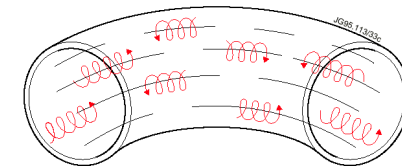
Les trajectoires des particules chargées s'enroulent autour des lignes de champ résultantes



+



=



Enroulement
primaire

Bobines Poloïdales

$$\langle \beta \rangle = \frac{\langle p \rangle}{B_0^2 / 2\mu_0} : 3 - 5\%$$

Le chauffage du plasma

Régime ohmique

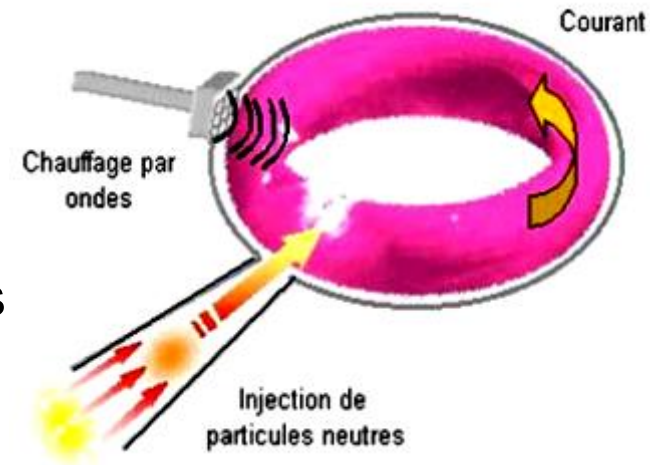
Chauffage par effet Joule naturel dû au courant intense (MA) circulant dans le plasma (et utilisé pour créer la configuration magnétique tokamak). Mais la résistance du plasma diminue lorsque la température augmente → la température maximale atteinte est de l'ordre de 10 millions de degrés

Chauffage additionnel

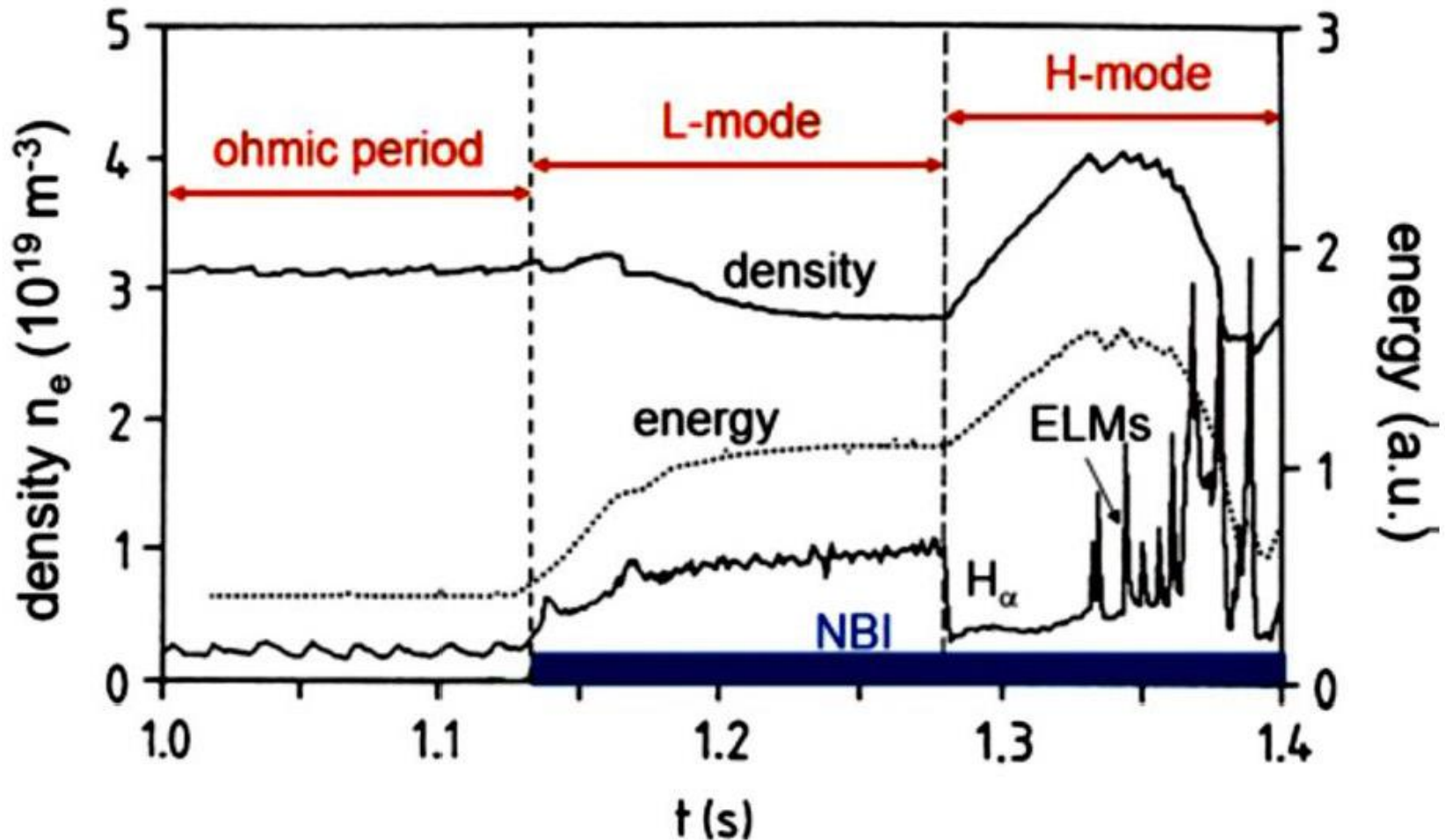
Indispensable pour atteindre les températures requises.

→ Deux grandes familles :

- le **chauffage par injection de particules neutres** de haute énergie → injecteurs de neutres
- le **chauffage RF**, par injection d'ondes fréquences choisies pour se coupler au plasma par résonance avec certaines classes de particules du plasma (→ LH, ICRH, ECRH),



La découverte du mode de confinement amélioré (F. Wagner, ASDEX, 1984)



Ohmic mode \rightarrow L-mode \rightarrow H-mode

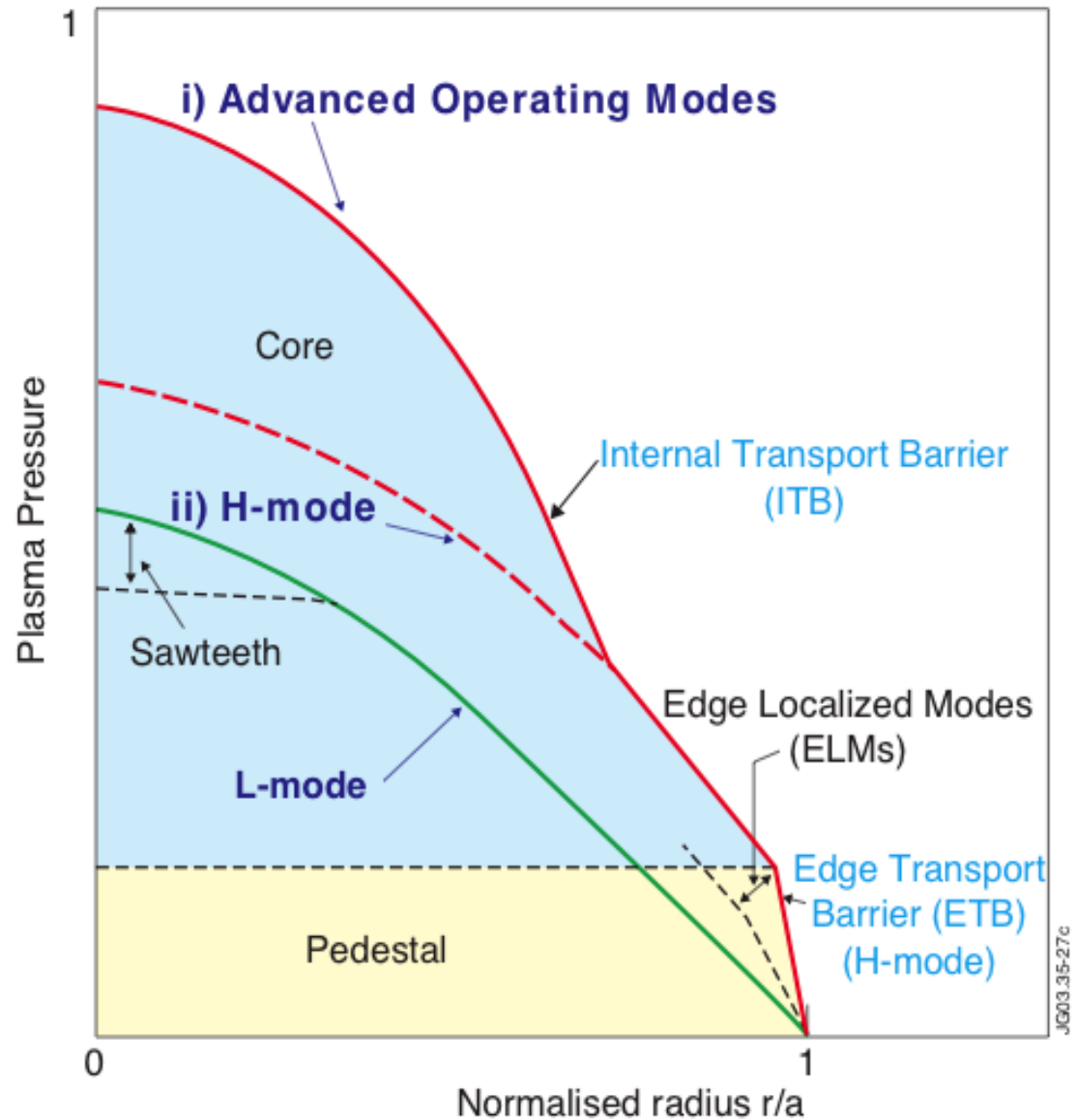
Mode de confinement amélioré

H-mode vs. L-mode

Régime de confinement par formation de **barrières de transport** interne et externe

→ raidissement des profils.

→ apparition de phénomènes de relaxation : les **ELMs** (Edge Localized Modes)



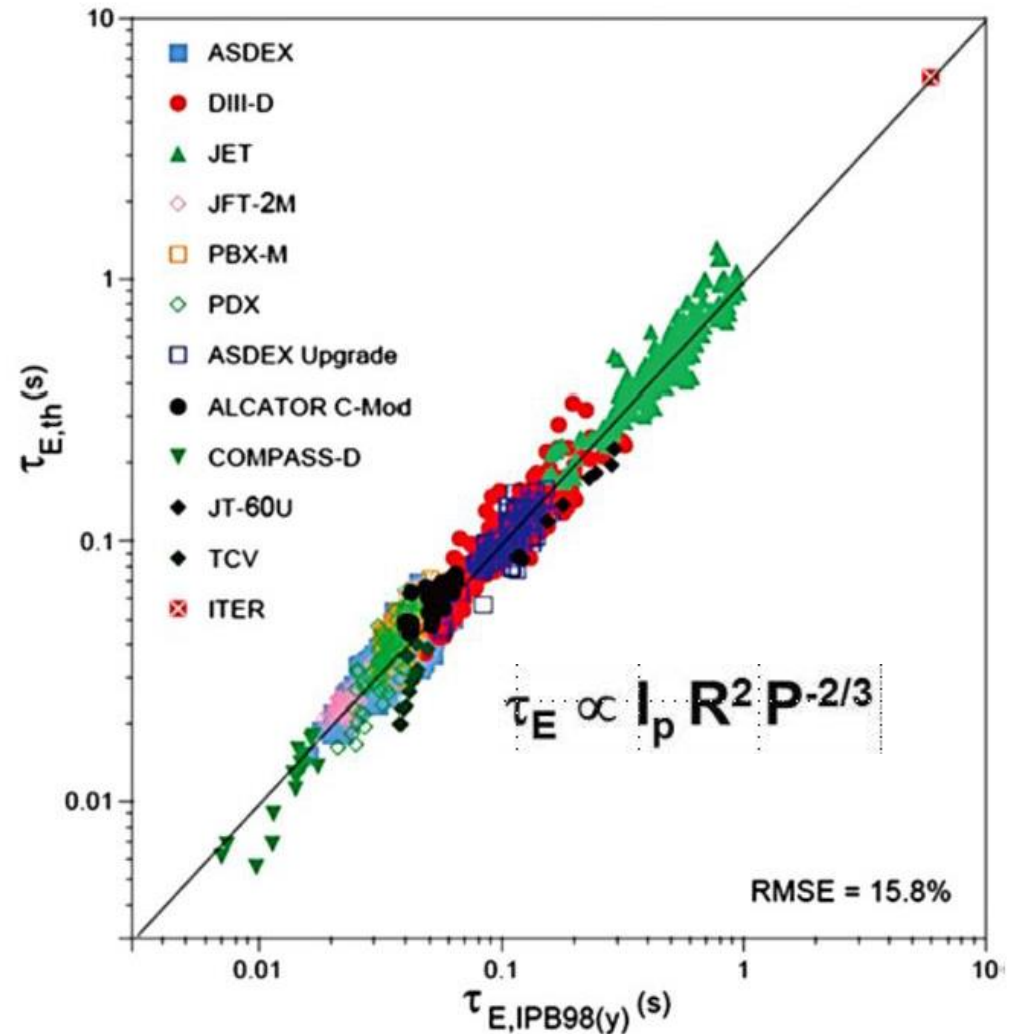
Progrès vers ITER et le réacteur

- Chaque nouvelle génération de machine a permis un saut dans les performances.

Pertes en surface et génération de puissance en volume →

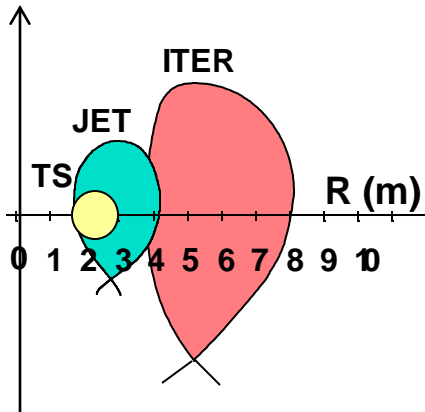
Nécessité d'augmenter le rapport V/S donc la taille

- JET a déjà atteint $Q = 0.67$ en 1997 (DT, 16,1 MW de fusion), et **de nouveau en 2021 !**
- Un progrès d'un facteur 6 dans le produit $nT\tau$ est encore requis
- *Ceci sera possible avec ITER*

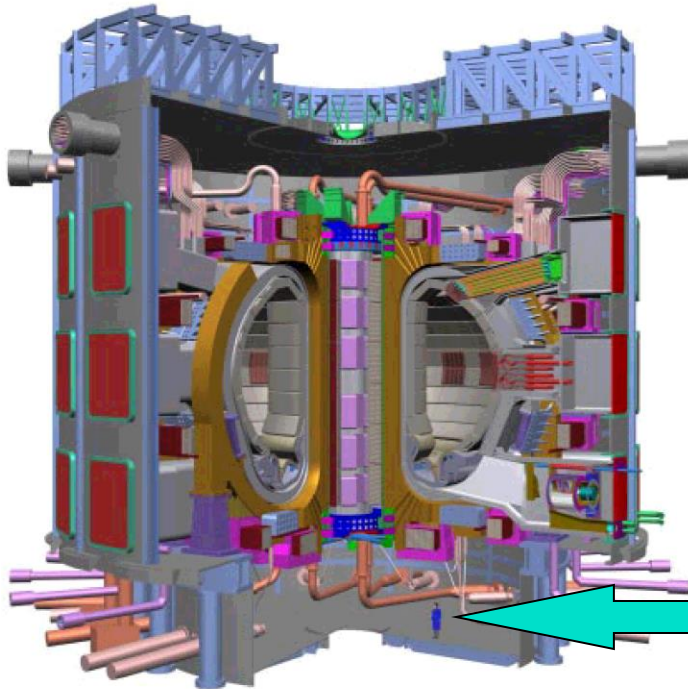


Valeurs expérimentales de τ_E comparées aux prédictions

ITER → size : 2 x JET



	JET	ITER
Major Radius	3 m	6.2 m
Plasma Volume	100 m ³	830 m ³
Magnetic Field	3.4 T	5.3 T
Plasma Current	5 MA	17 MA
Coil System	copper	SC / cryostat
Auxiliary Heating	38 MW	50 MW
Fusion Power	16 MW	500 MW



Fusion Power: 500 MW

Power Gain : Q = 10

- demonstrate D+T burning
- Tritium breeding blanket
- Flexibility → optimize DEMO parameters

Homo sapiens sapiens



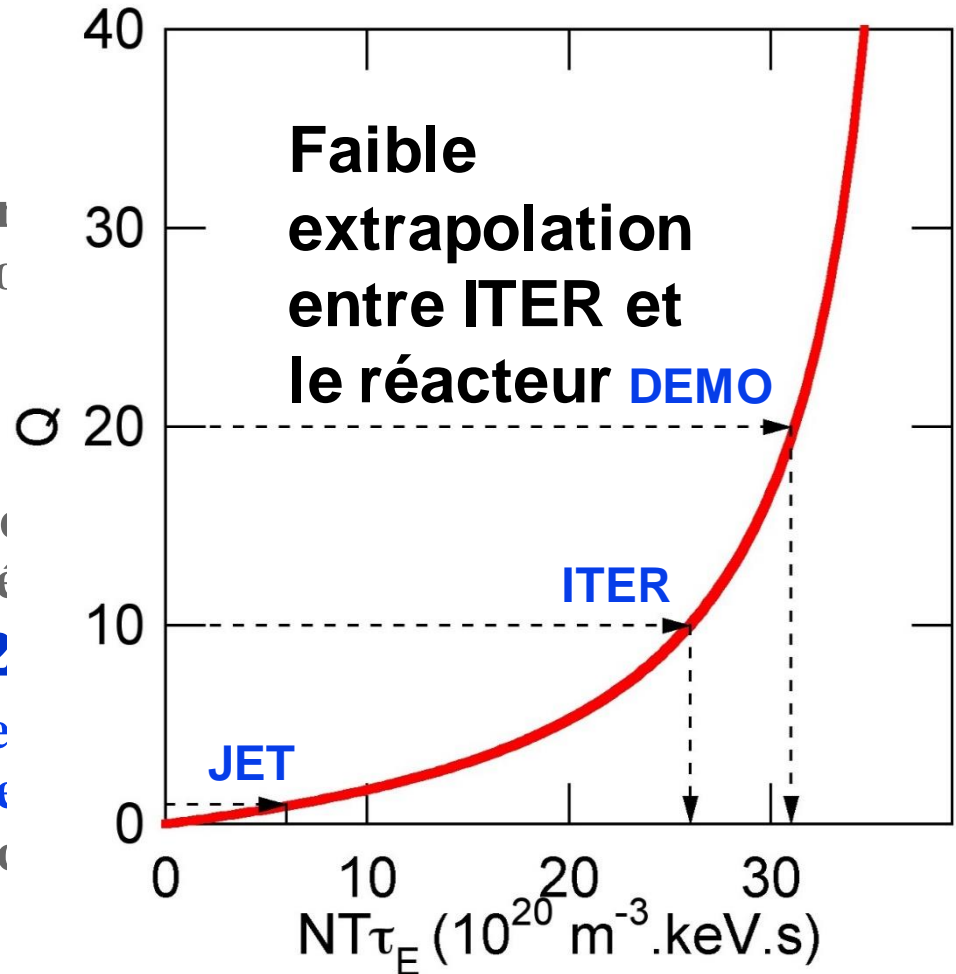
ITER: les objectifs

Performance

- $Q \geq 10$ pendant ~ 400 s
- Explorer le régime stationnaire
- Flux neutronique (14 MeV) mc a/m^2

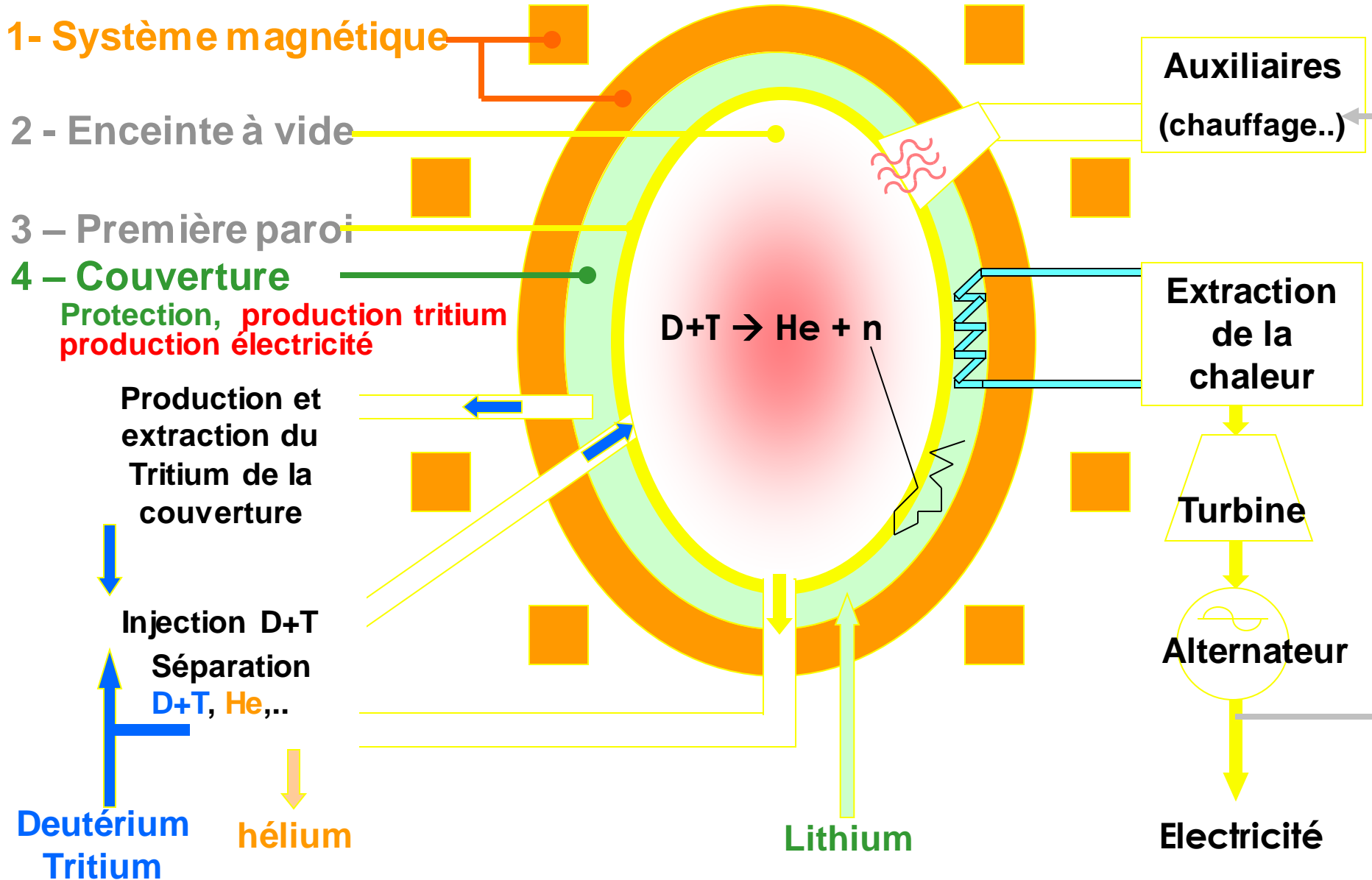
Fonctionnement

- **Plasma en combustion:** confinement plasma \rightarrow équilibre, instabilité
 $Q = 10 \Rightarrow P_\alpha = 2$
- Test de modules de couverture
- Disponibilité des technologies supraconducteurs, maintenant
- Démonstration de la **sûreté de l'environnement**



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

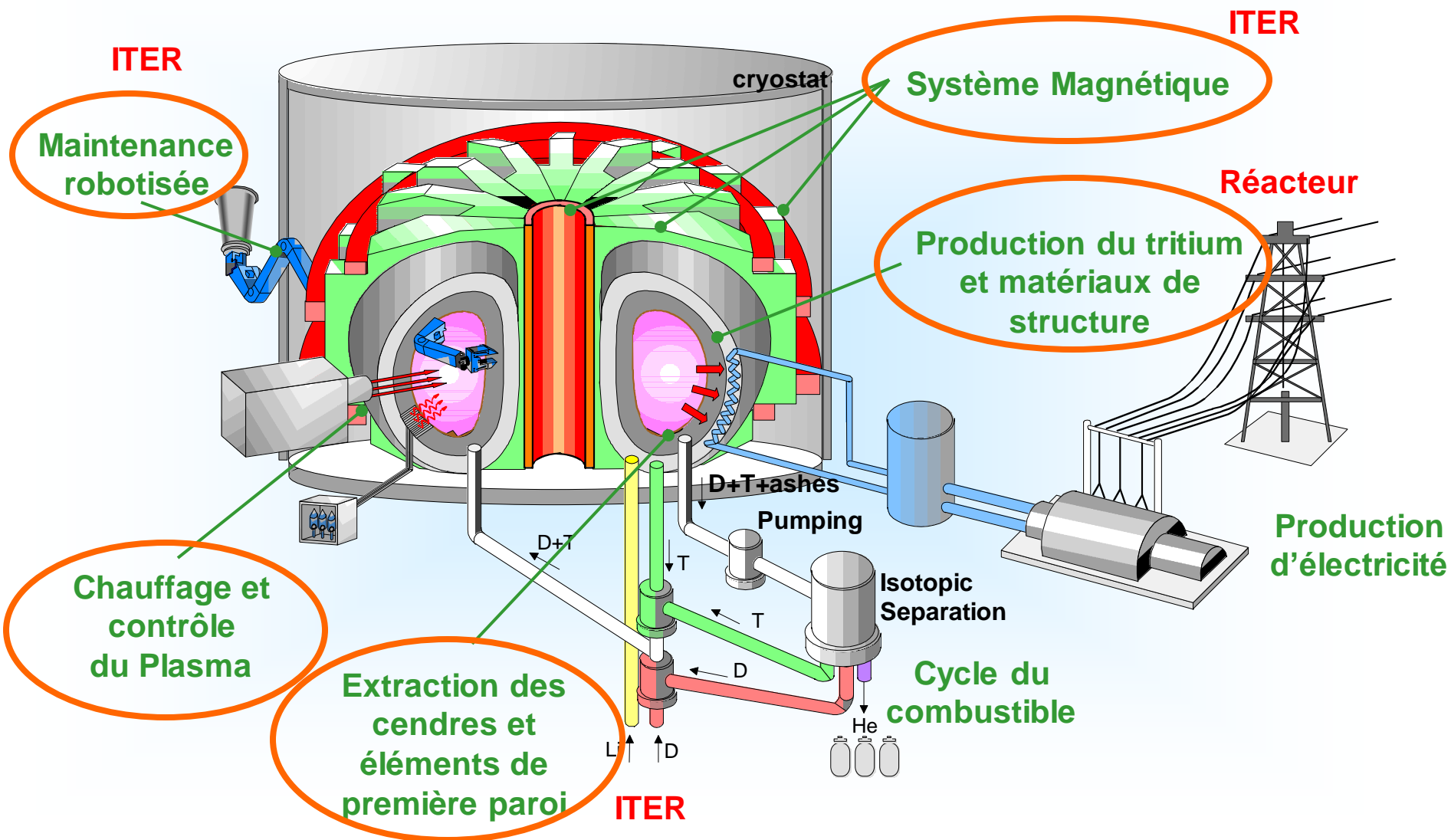
Le réacteur de fusion : principe



Les défis scientifiques et technologiques

- **ITER vs. réacteur**
- **Défis scientifiques**
 - *Chauffage du plasma*
 - *Interaction plasma paroi*
 - *Mesures et contrôle du plasma*
- **Défis technologiques pour ITER et le réacteur**
 - *Télémanipulation*
 - *Génération et gestion du tritium*
 - *Au-delà d'ITER: les matériaux pour le réacteur*

Défis technologiques pour la fusion



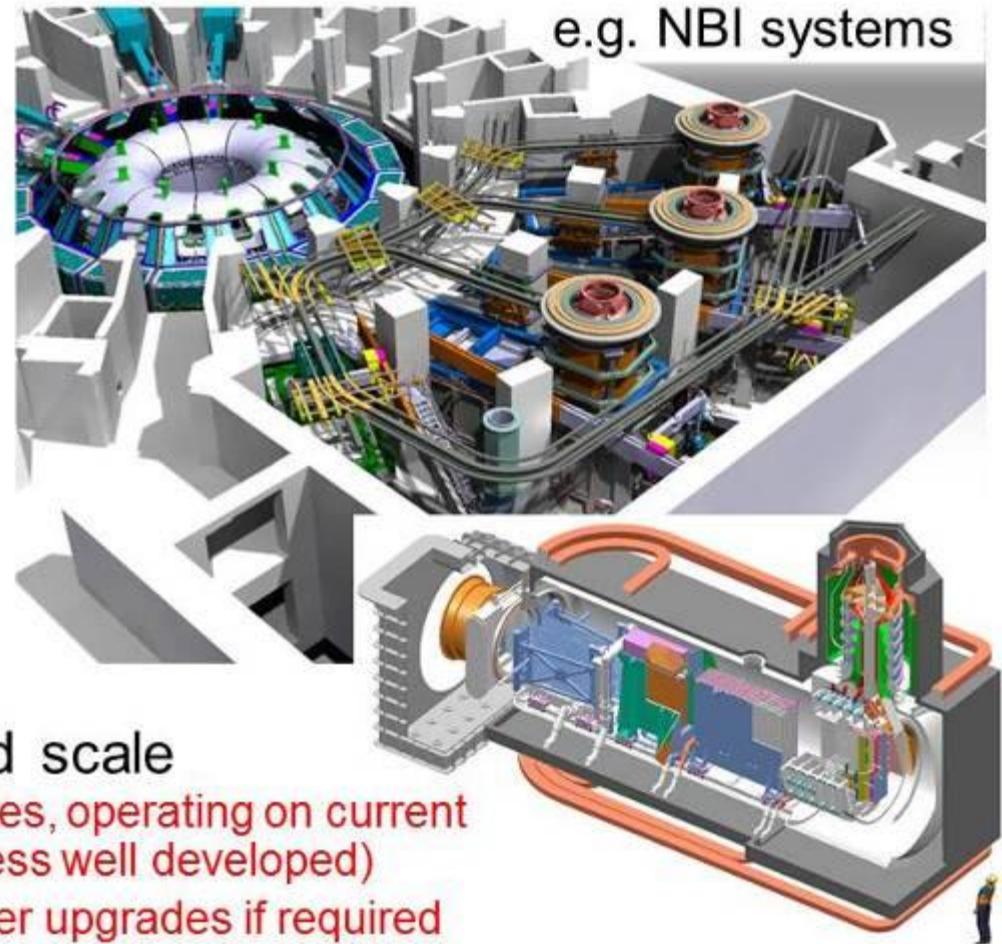
Chauffage du plasma

System	Power
NBI -ve ion, 1 MeV	33 MW
ECH & CD 170 GHz	20 MW
ICRH & CD 40 – 55 MHz	20 MW

P_{aux} for $Q_{\text{DT}} = 10$ nominal
scenario: 40 – 50 MW

All are on an unprecedented scale

- Upscale from known technologies, operating on current tokamaks (-ve ion NBI source less well developed)
- Systems have flexibility for power upgrades if required



Composants face aux plasmas

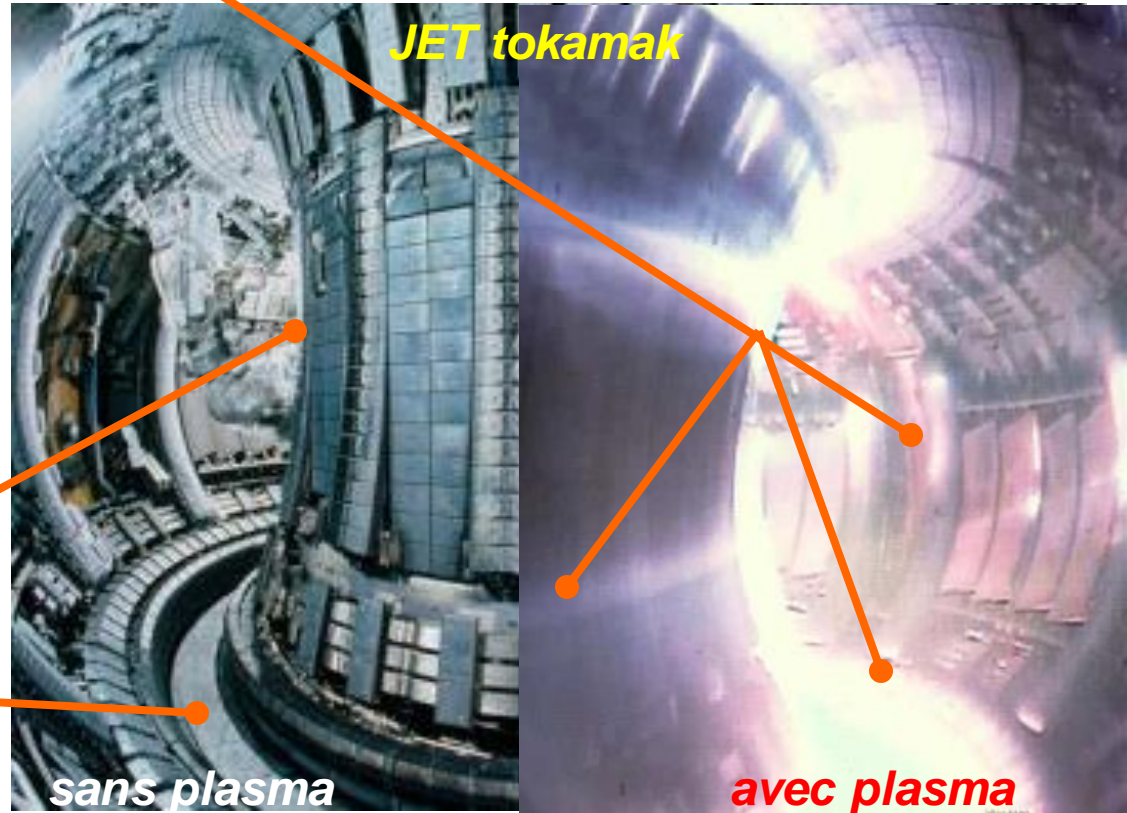
C'est la **première surface matérielle** vue par le plasma. Elle est exposée à de nombreuses contraintes : thermique (plusieurs MW/m^2), neutronique, érosion...

Choix des matériaux très important

- T fusion élevée
- Faible activation
- Coût

Candidats:

Carbone,
Béryllium (Be)
Tungstène (W)

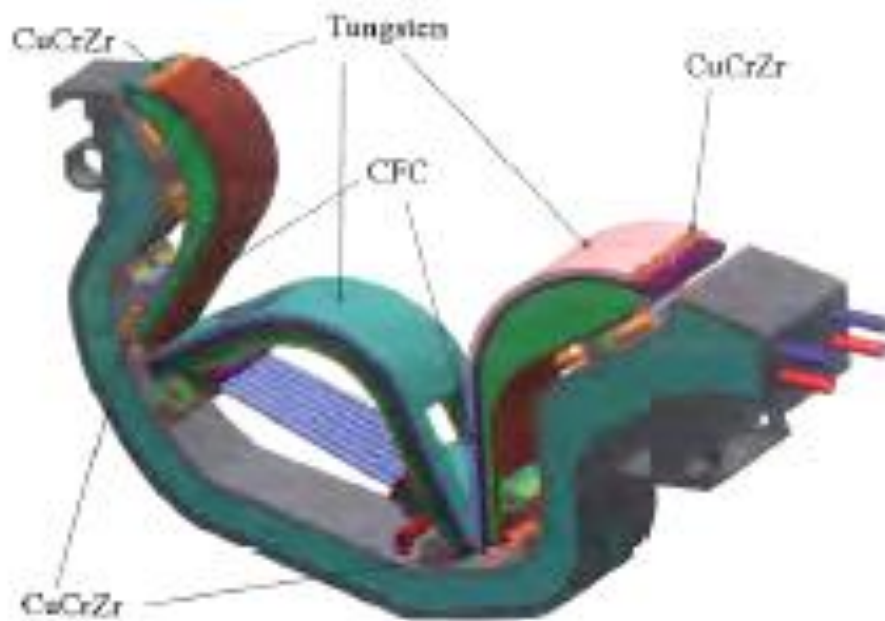
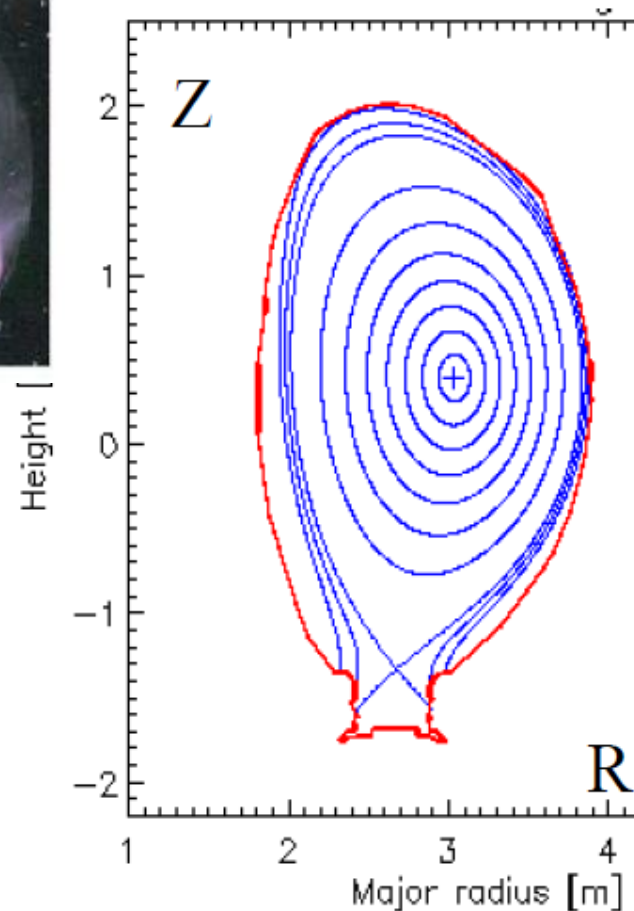
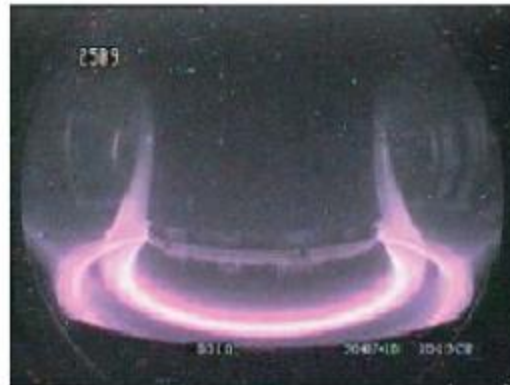


Impuretés dégradent les performances plasma:

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

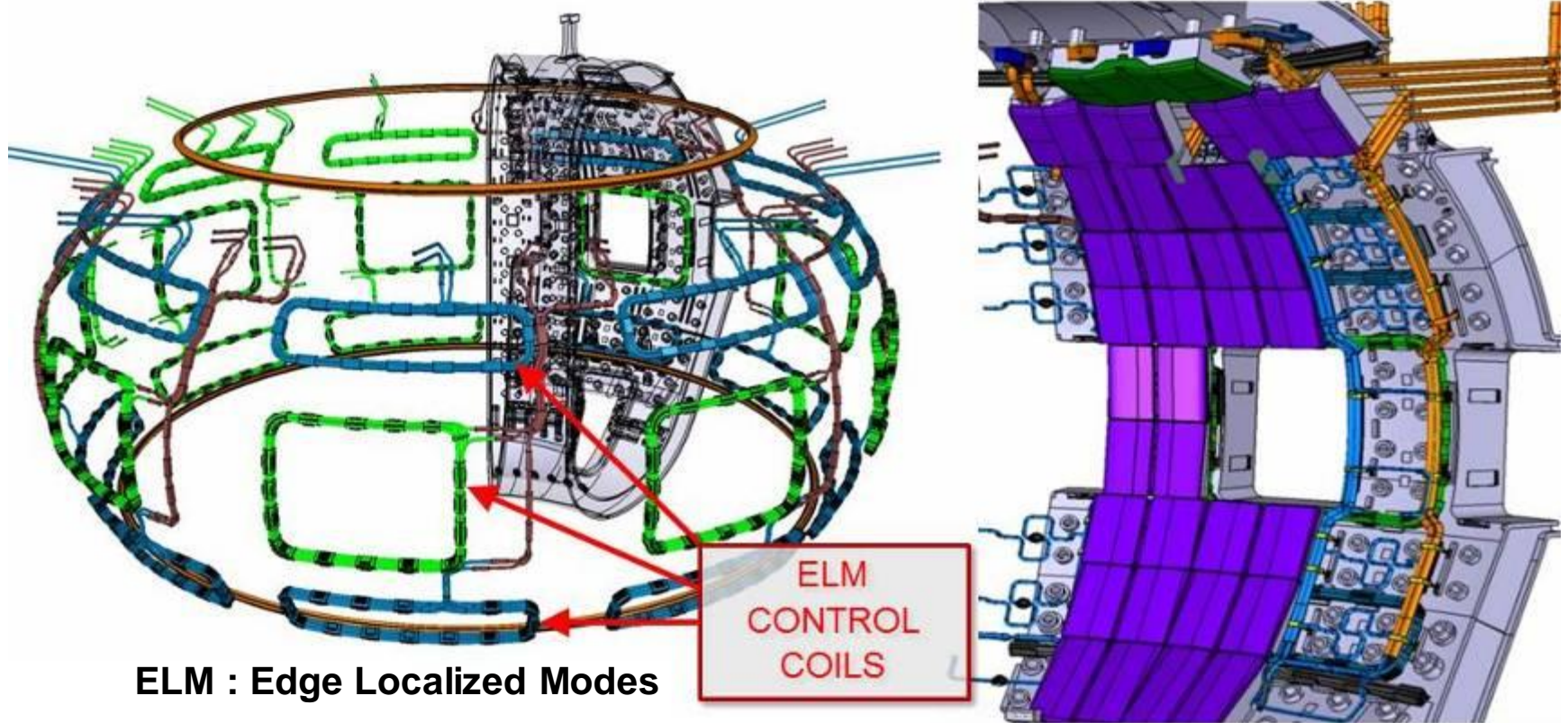
Le défi de l'évacuation de la chaleur: « Scrape-off layer » et « divertor »

- ITER : 120 MW à extraire pour les composants face au plasma → $\sim 10 \text{ MW/m}^2$



Bobines de contrôle des ELMs

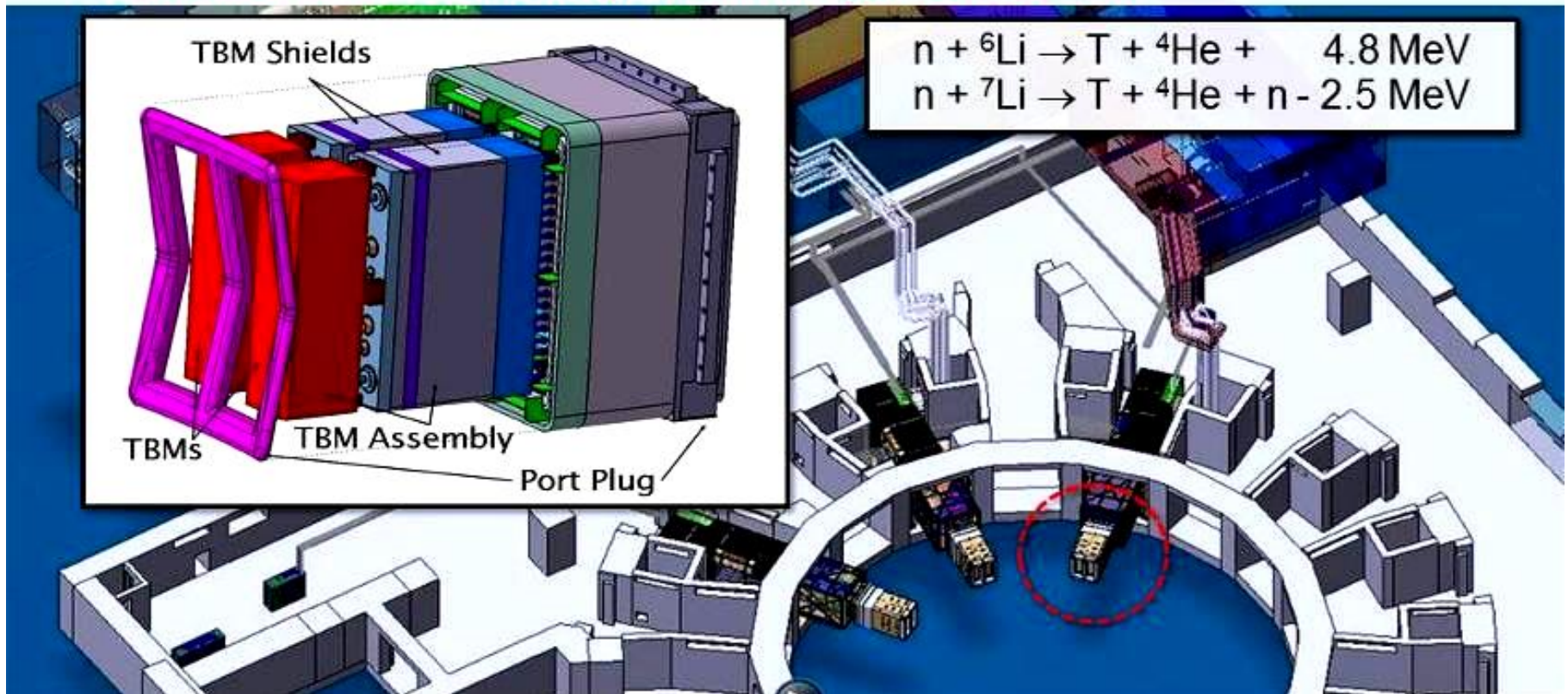
Design activity underway with good progress → integration challenge



Modules de régénération du tritium (TBMs)

Tritium fuel cycle is a major challenge for all DT fusion devices → ITER will test concepts

– 6 modules with different designs, all ITER parties involved



Les couvertures tritigènes

■ 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

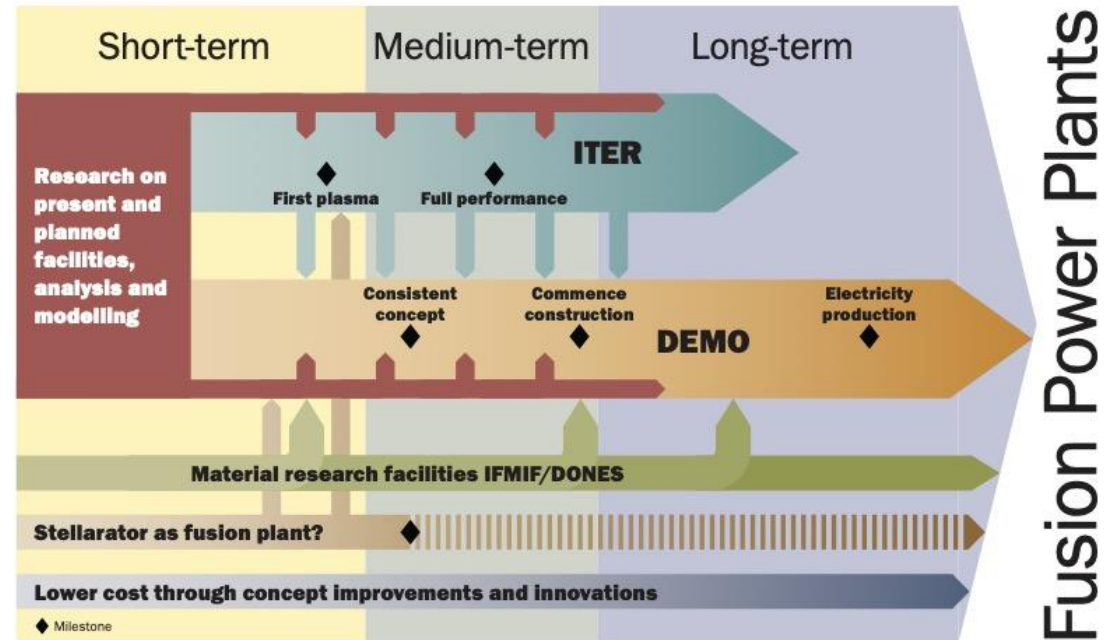
→ Différentes combinaisons menant à différents concepts

Le défi des matériaux de structure : développer des matériaux résistants aux neutrons de 14 MeV

Effets des neutrons :
Gonflement (bulles d'hélium et d'hydrogène)
et Fragilisation

Candidats à tester:

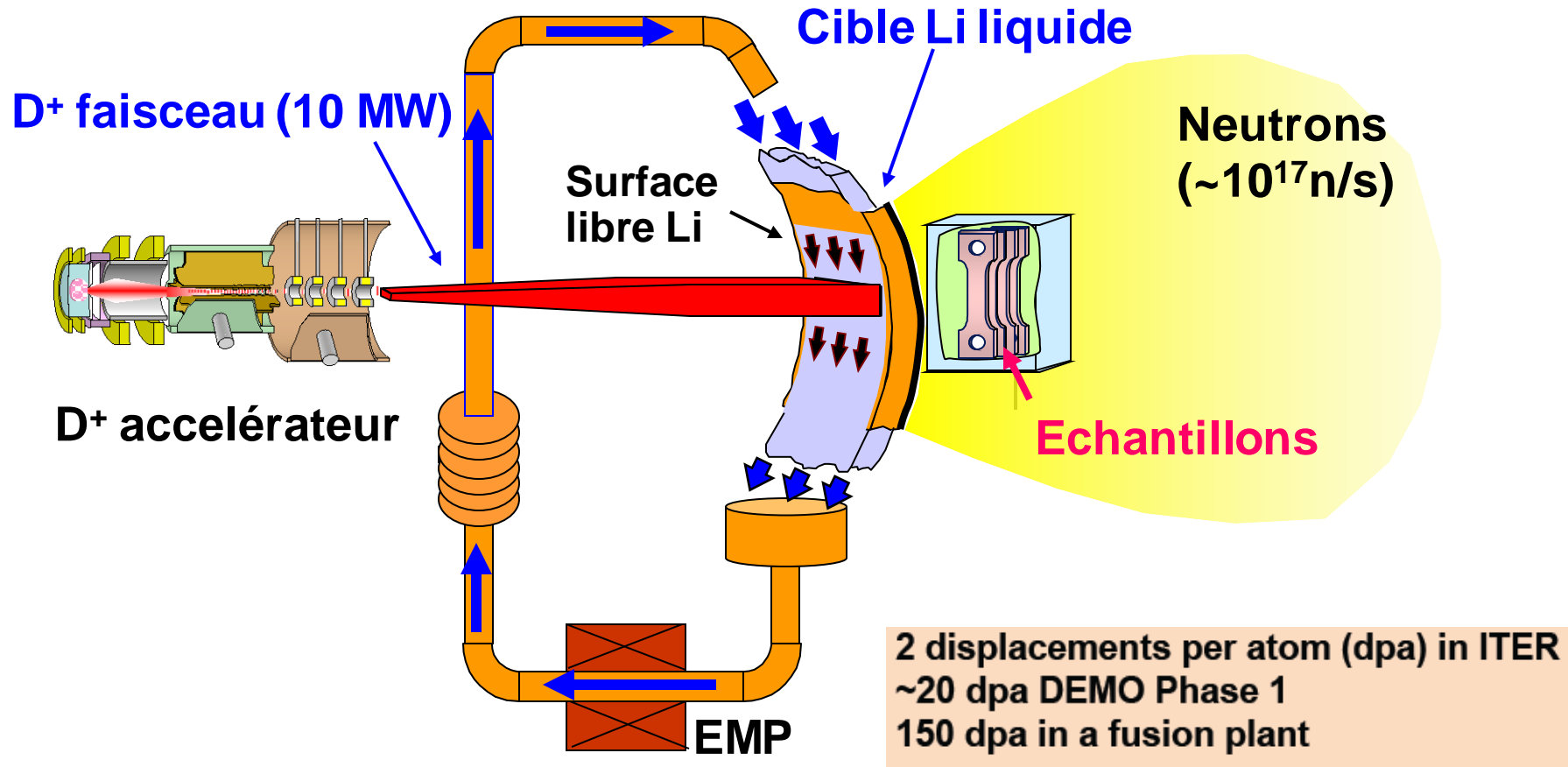
- **Aciers ferritique – Martensitique à basse activation type Eurofer et F82H (Japon)**
- **Développer et tester des nouveaux aciers renforcés par dispersion d'oxydes (ODS)**



2 displacements per atom (dpa) in ITER
~20 dpa DEMO Phase 1
150 dpa in a fusion plant

IFMIF - DONES
International Fusion Materials Irradiation Facility – Demo Oriented NEutron Source

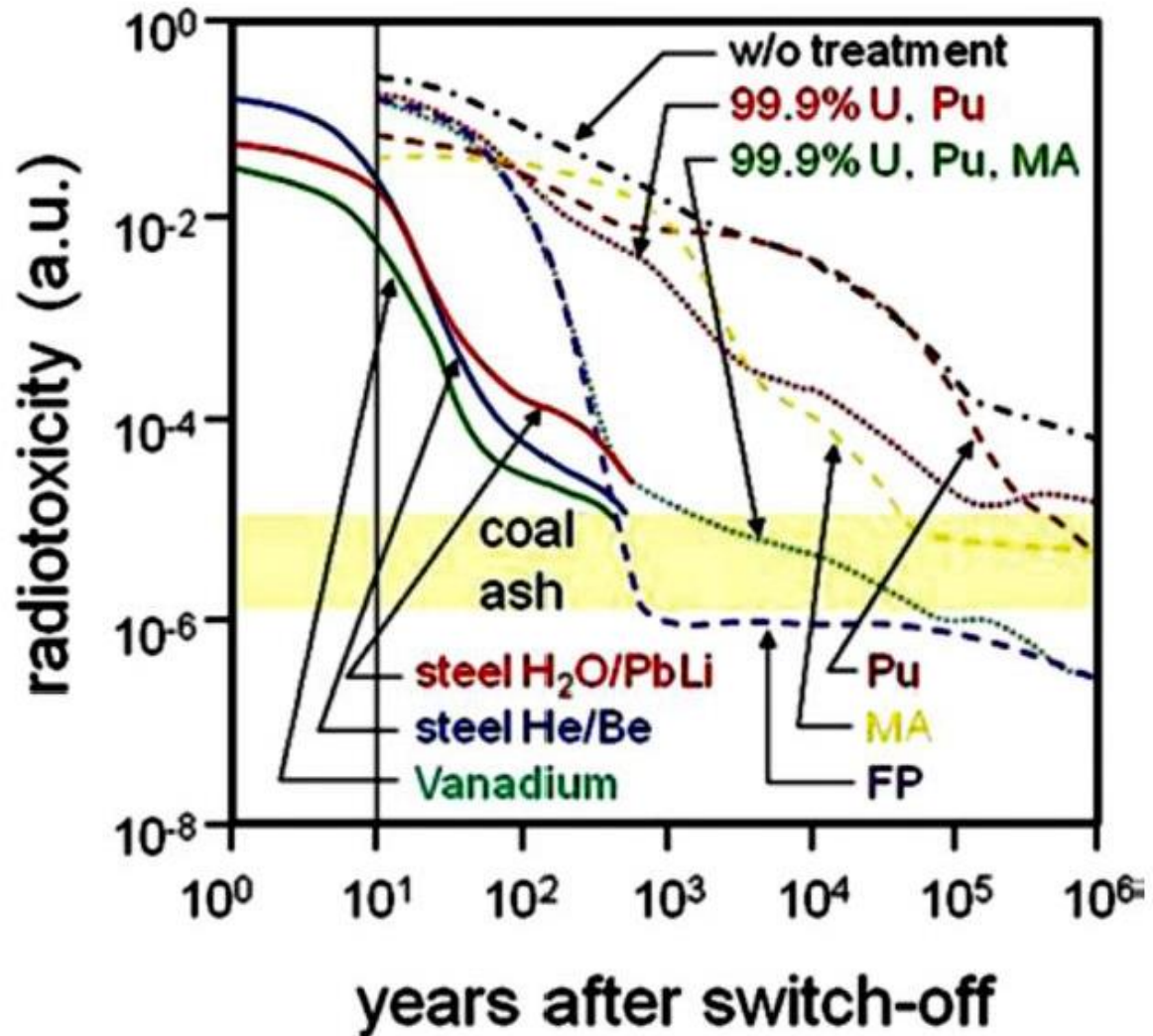
Expérience d'irradiation IFMIF : vue schématique



Phase EVEDA en cours à Rokkasho – Aomori (dans le cadre de l'approche élargie EU / Japon). **Projet de construction d'IFMIF à Grenade (Espagne)**

Les déchets radioactifs : fusion vs. fission

Un réacteur à fusion ne produit pas de produits de fusion radioactifs, mais les neutrons rapides activent les matériaux de structure



Décroissance de la radiotoxicité des déchets des réacteurs à fusion et fission

Fusion Thermonucléaire, la filière par Confinement Magnétique

- La fusion thermonucléaire : principes généraux
- Le confinement magnétique
- Le principe du tokamak
- Progrès vers ITER et voie vers le réacteur
- D'ITER aux réacteurs:
des défis scientifiques et technologiques
- **Une synergie prometteuse avec :**
 - ✓ **Stellarators : Wendelstein 7-X**
 - ✓ **Projets des start-ups**

Stellarators vs. Tokamaks

Avantages and inconvénients des Stellarators :

Inconvénient principal : bobines difficiles à construire

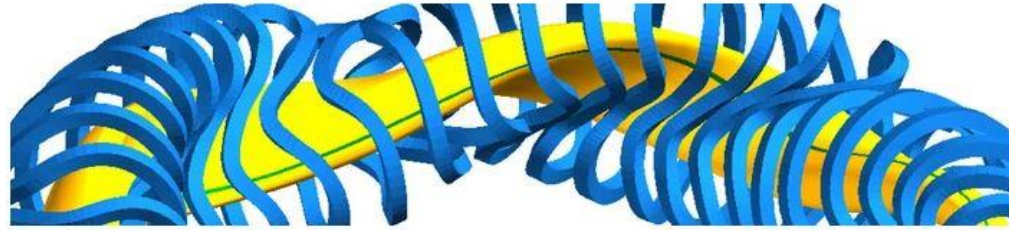
Avantages

- Pas de courant pouvant exciter des instabilités MHD qui limitent les performances
- Pas de disruptions
- Pas de limite de Greenwald pour la densité
- Plus haute limite en β (pression) que pour les tokamaks
- Opération en régime stationnaire intrinsèque → pas de système de génération de courant par ondes (CD) (pour opérer en régime stationnaire un réacteur de type tokamak demandera environ 200 MW de puissance)

Le Stellarator Wendelstein 7-X

(<https://www.ipp.mpg.de/w7x>)

- Stellarator optimisé, 30 m³, bobines supraconducteur



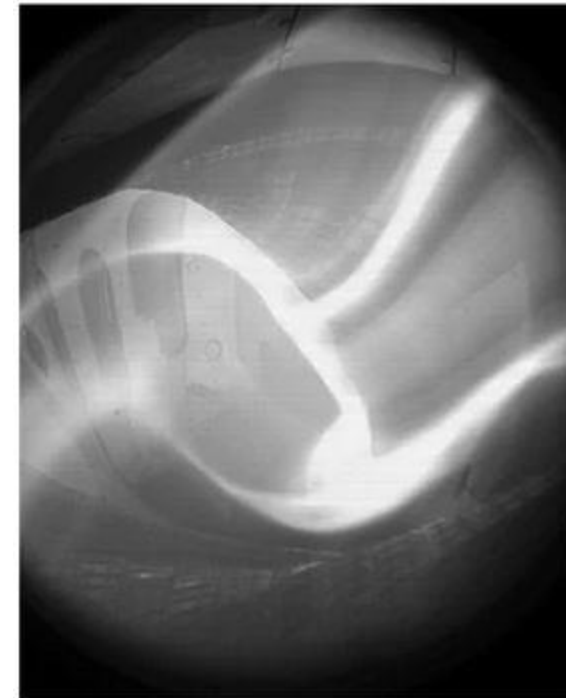
- Premier plasma décembre 2015

2017

- Décembre 2021 : achèvement de la transformation de la machine avec divertor à refroidissement actif

- Objectifs :

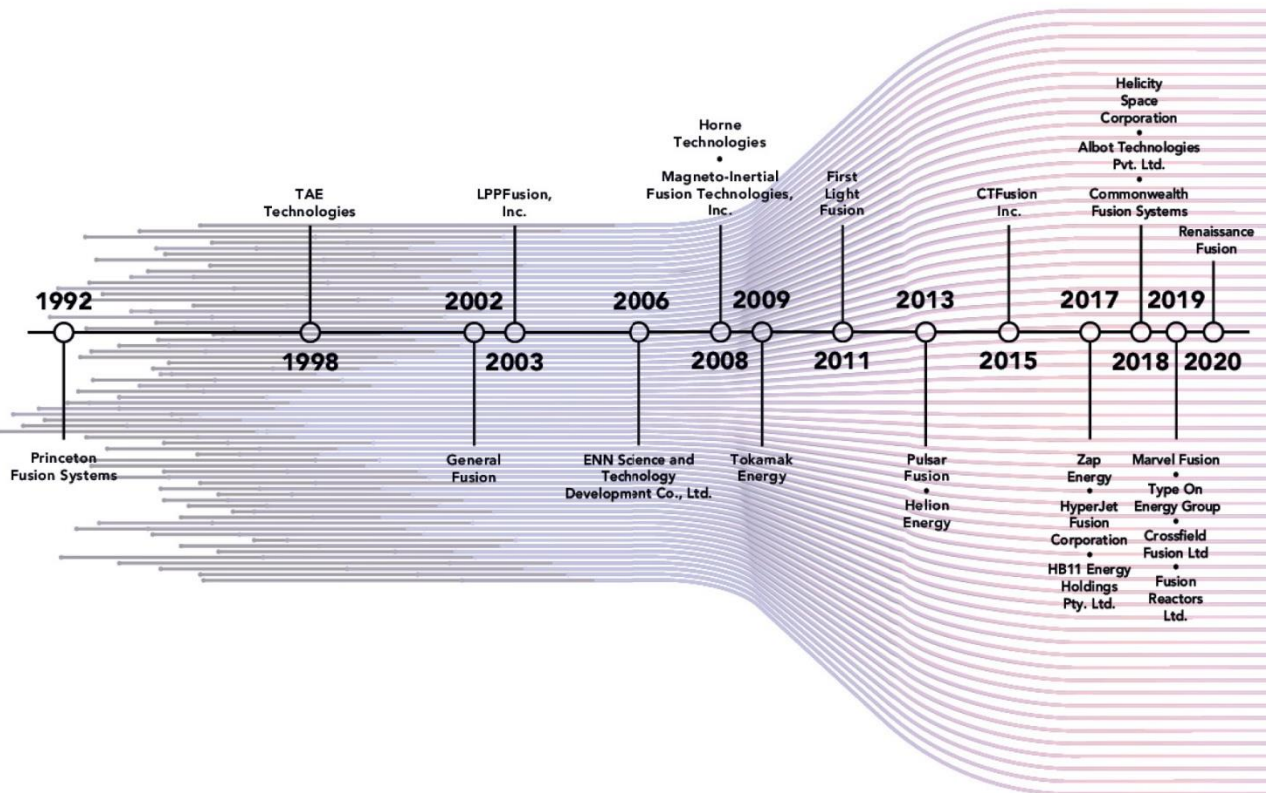
- Atteindre les conditions de densité et de température d'un plasma de fusion en régime stationnaire.
- Démontrer que le stellarator constitue une alternative viable au tokamak → **HELIAS**



The record plasma with an energy content of over one megajoule
Photo: IPP, Wigner RCP

Dans les start-ups ... ça fuse !

An explosion of start-ups & attention from the public



Plusieurs centaines de millions de \$!



Une explosion de start-ups !

- Commonwealth Fusion Systems (CFS) (<https://cfs.energy/>)
spin-off of MIT
projet de tokamak SPARC, compact ($R_0 = 1,85$ m, très fort champ magnétique ($B_0 = 12.2$ T) → supraconducteur HTS
Q=11 ... en 2025 !
- Tokamak Energy (<https://www.tokamakenergy.co.uk/>)
projet de tokamak ST40, sphérique compact → supraconducteur HTS (refroidissement azote liquide à -250°C)
objectif → atteindre les conditions du réacteur ... en 2030 !
- TAE Technologies Inc. (<https://tae.com/>) Californie
FRC (Field Reversed Configuration) piloté par faisceau ST40, et le plus original, projette d'utiliser la réaction proton – boron → pas de neutrons rapides et possibilité de conversion directe en électricité !
$${}^1_0\text{p} + {}^{11}_5\text{B} \rightarrow 3\,{}^4_2\text{He} + 8.7\text{ MeV}$$

mais requiert $\times 10$ sur la température et $\times 50$ sur la pression ...

Une explosion de start-ups !

- Helion Energy (<https://www.helionenergy.com/fusion-energy/>)
Trenta, puis Polaris → 2 FRC, pulsé (1 Hz), (D-³He), conversion directe
- General Fusion (<https://generalfusion.com/>) : Magnetized target reactor, liquid metal wall

En France :

- **Renaissance Fusion (CFS)** (<https://stellarator.energy/>) Grenoble
Stellarator + technologies de rupture

Objectifs:

- Démontrer la faisabilité d'une nouvelle technologie de fabrication des bobines en supraconducteurs à haute température (HTS) sans rubans ni câbles → applications médicales et simplification de la construction des stellarators
- Construction du premier stellarator à fort champ (10 T) → plus petit + mur de métal liquide en écoulement → absorption des neutrons
- Alimenter le réseau en électricité de fusion dans ...13 ans

Conclusions ...

- Des progrès considérables !
- La machine ITER dont l'assemblage est en cours permettra d'étudier les conditions où le plasma est dominé par la puissance des réactions de fusion.
- ITER est indispensable pour démontrer la faisabilité d'un réacteur à fusion et mettre au point les technologies clefs.
- Les investissements privés dans les projets innovants des startups laissent espérer des avancées sur les technologies de rupture.
- "DEMO sera la dernière étape avant le réacteur commercial, qui avec 1 GWe permettra de produire 8 TWh d'électricité par an en consommant 100 kg de deutérium et 300 kg de lithium → **250 kg d'hydrogène permettant de produire par électrolyse ... 160 000 tonnes d'hydrogène !**
- Lev Artsimovitch, grand-père du Tokamak déclarait en 1972 - "Fusion will be there when society needs it".

Le 21 novembre 2006, une date historique



L'Accord ITER a été officiellement signé le 21 novembre 2006 par les ministres des sept Membres d'ITER réunis au palais de l'Élysée, à Paris, en présence du Président français Jacques Chirac et du Président de la Commission européenne José Manuel Durao Barroso

Plateforme du site d'ITER en 2009



Plateforme de 40 ha, 2.5 Mm³ de terre enlevés, bonne assise rocheuse (100 t m⁻²)

Visite du site d'ITER en construction par une délégation de l'EPS – 23 nov. 2021



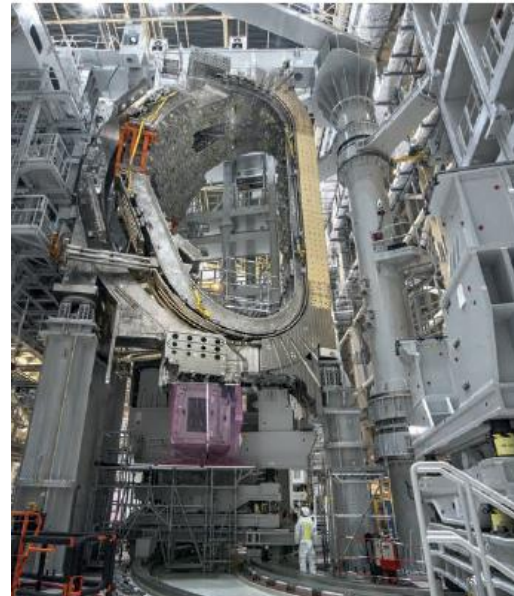
Our group in front of a sector mounted on the assembling tool. One can see a D-shaped TF coil surrounding the vacuum vessel sector. © ITER



Inside the tokamak pit, assembling the tokamak components. © AP

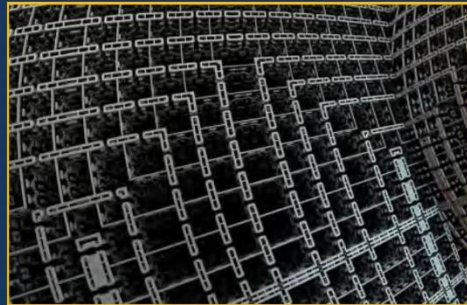


Moving upright a 440 t sector of the vacuum vessel, to bring it to the assembling tool on the left of the image (Korean sector, 11.12.2021). © ITER.



The first sector of the vacuum vessel (out of 9, 440 t) mounted on the assembly tool, surrounded by its 2 TF coils (2 x 320 t). © ITER

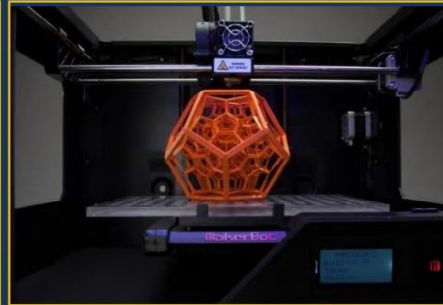
Innovation & spin offs



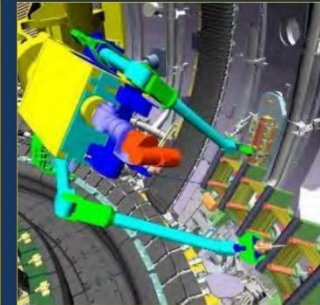
High technology filters



Medical magnetism



3D printing for complex shapes



Robotics in extreme environments

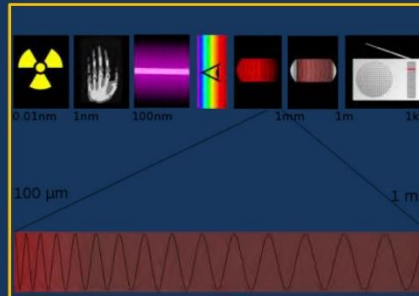
Etc.



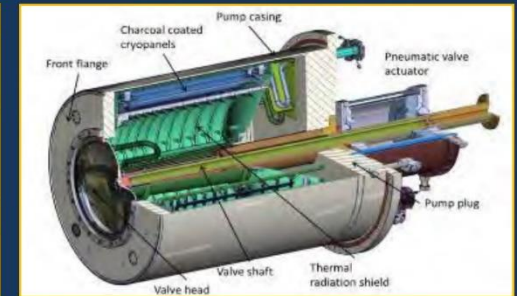
Power electronics



Explosive forming

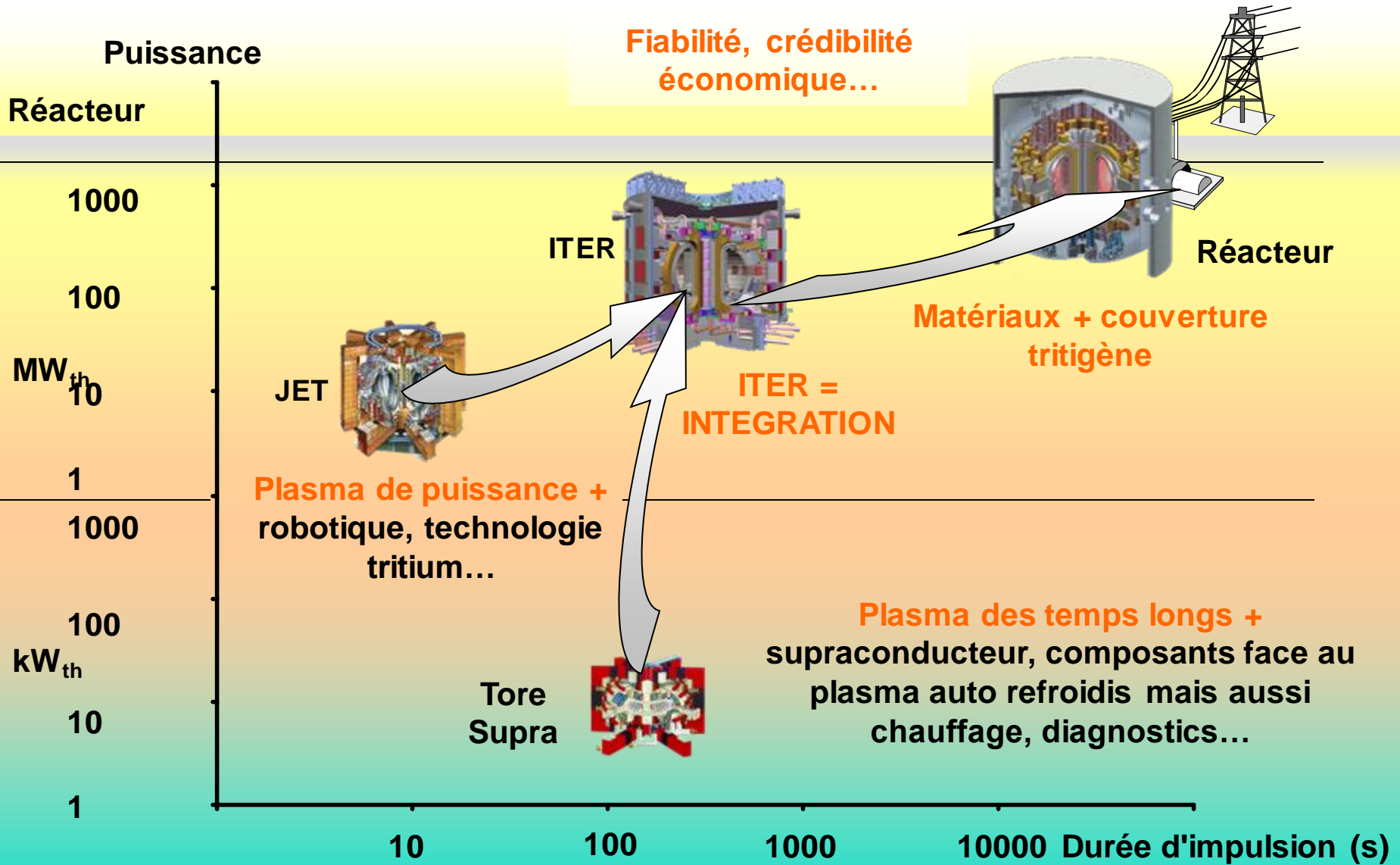


Ultra high-speed transmission



Cryopumps – Vacuum systems

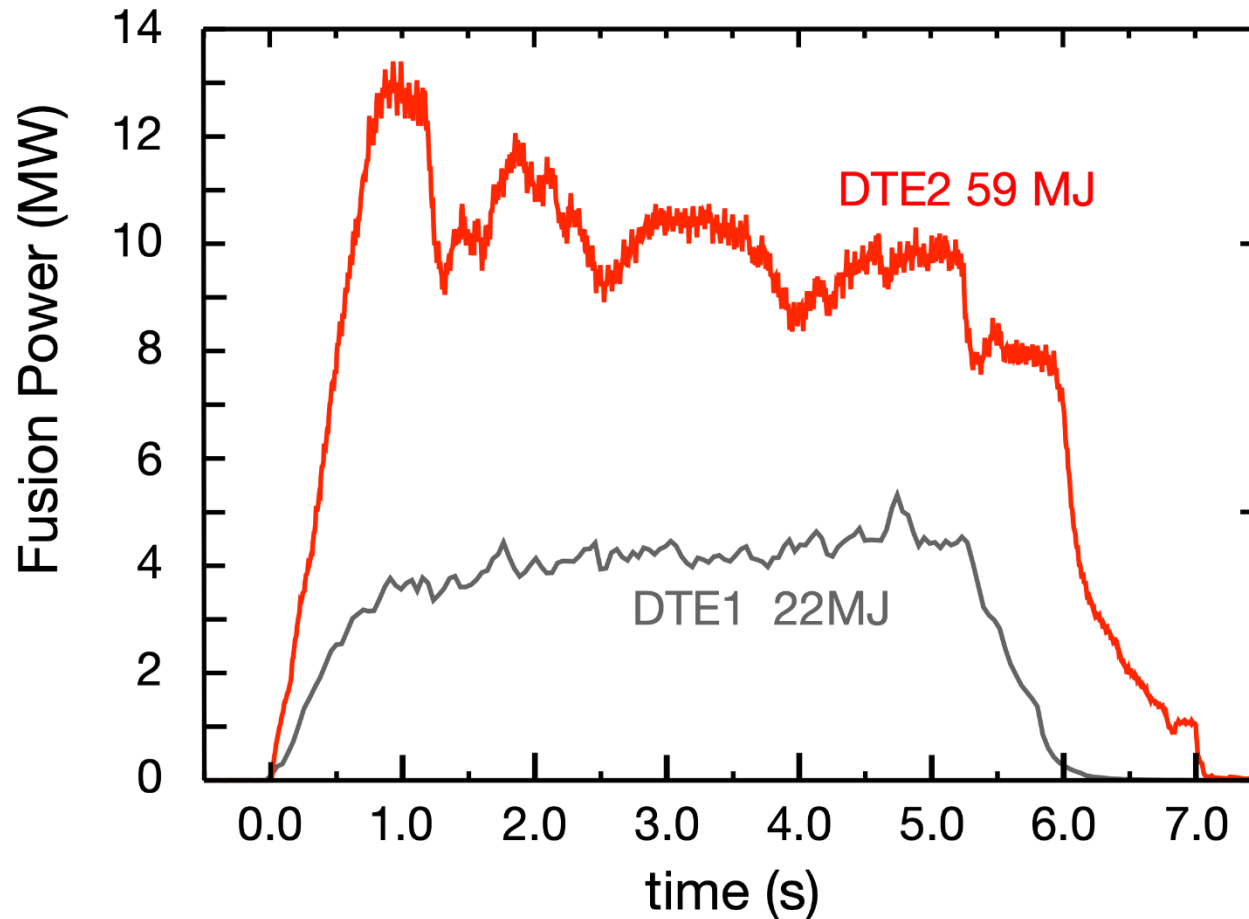
La progression vers le réacteur



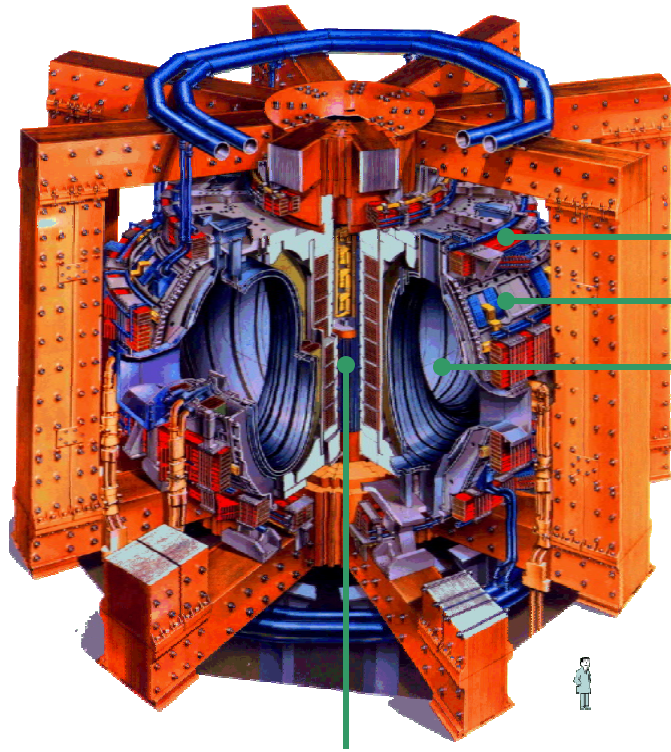
Record d'énergie de Fusion battu sur JET

En décembre 2021, le JET, le tokamak européen (Oxford) a produit 59 MJ d'énergie de fusion.

C'est plus du double du précédent record de 1997.

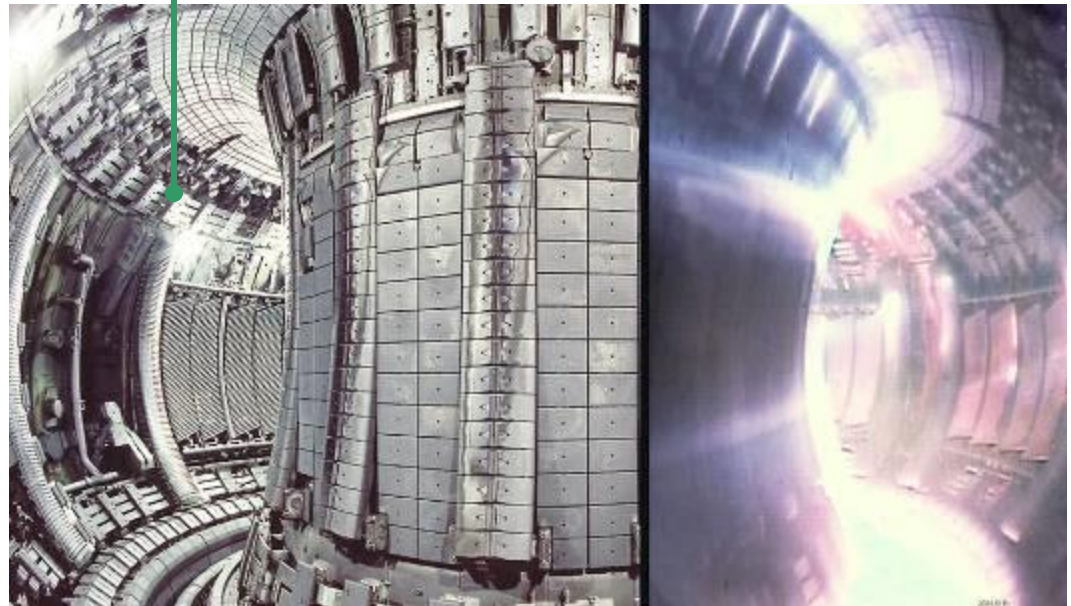
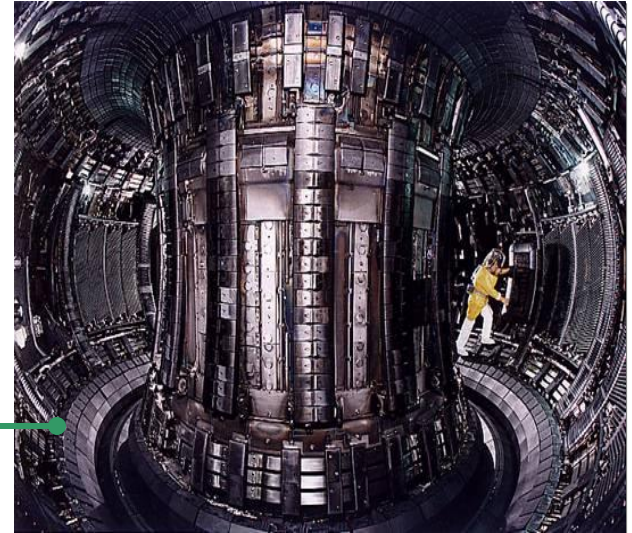


Le Tokamak européen JET



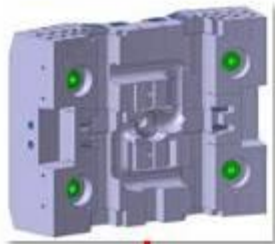
Solénoïde central

Bobine poloïdale
Bobine toroïdale
Enceinte à vide



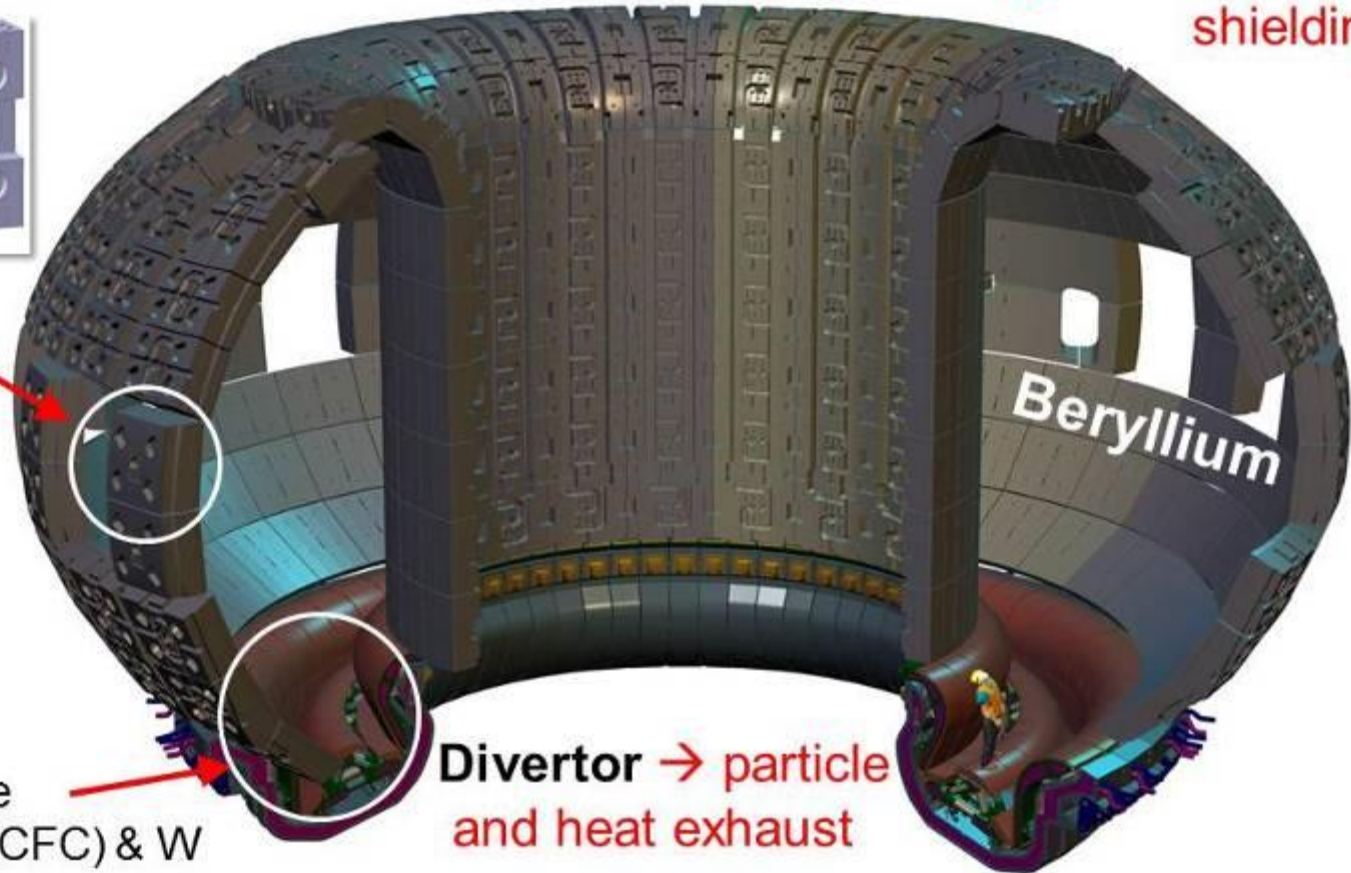
Principaux Composants face au plasma (PFC)

First wall/blanket → heat exhaust, impurity management, nuclear shielding



SS shield block
~3.5 t
(1800 t in total)

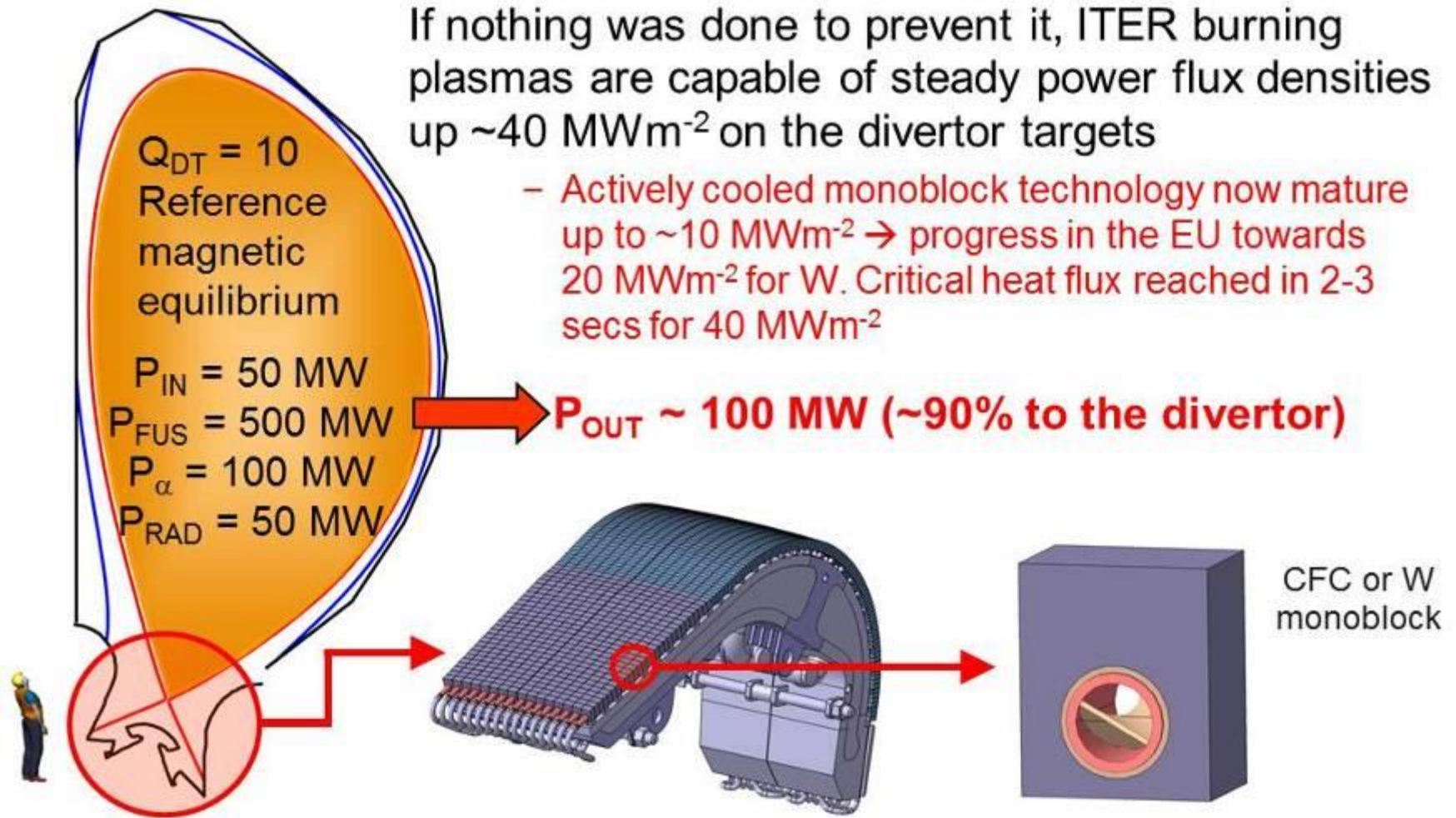
Carbon fibre composite (CFC) & W



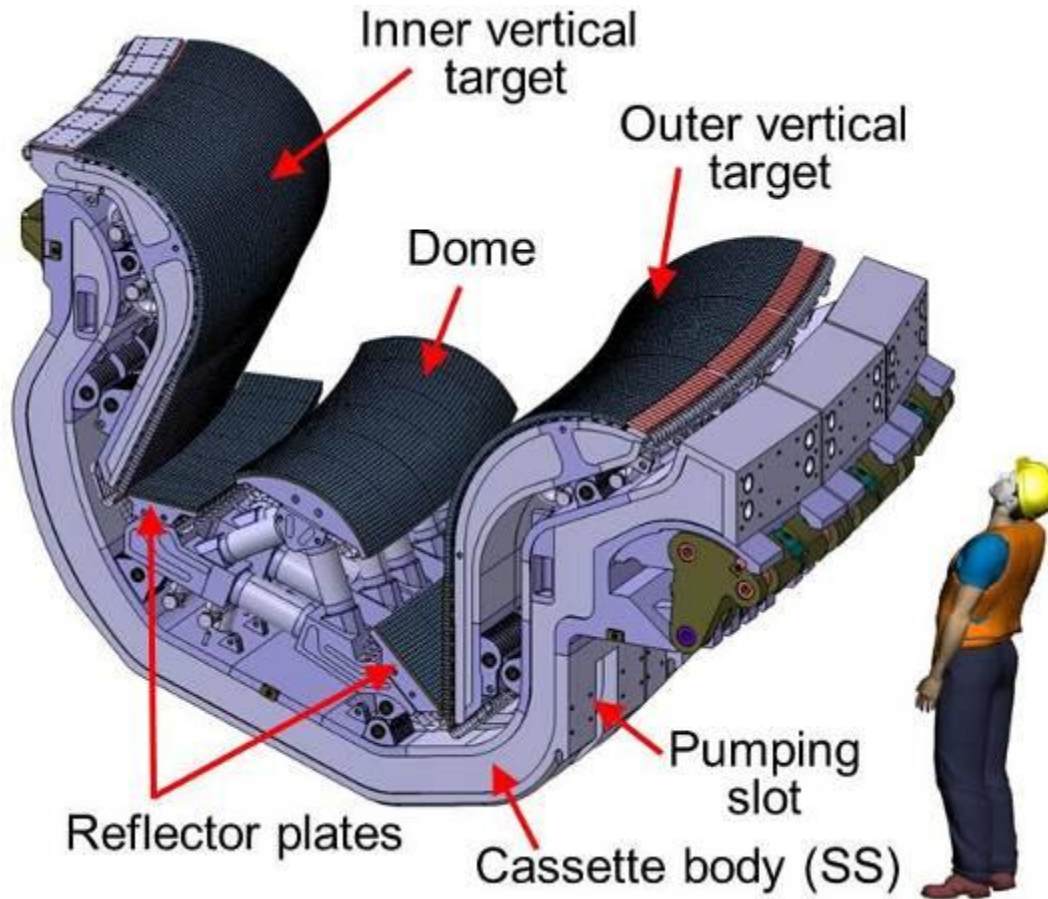
Divertor → particle and heat exhaust

Beryllium

Evacuation d'énergie : flux d'énergie stationnaire



Divertors



54 divertor assemblies
(~8.7 tonnes each)

4320 actively cooled
heat flux elements

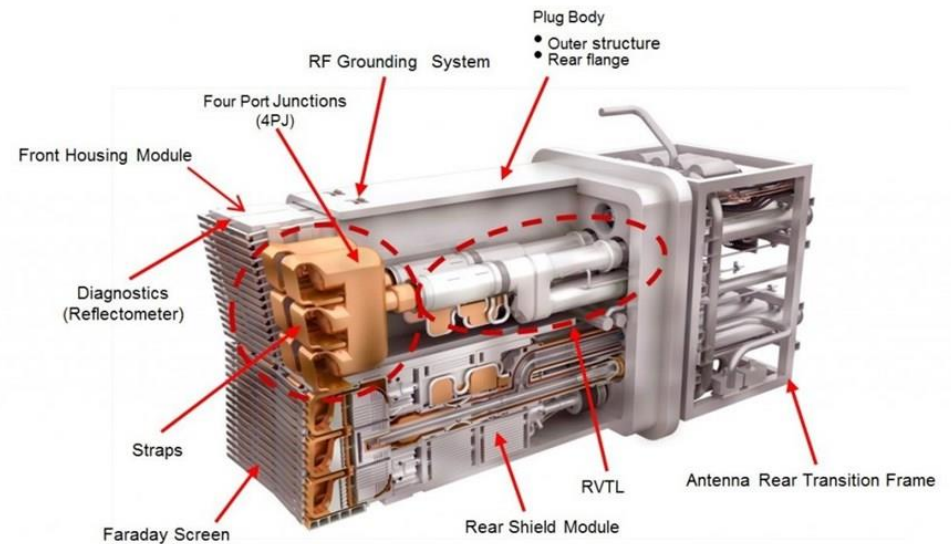
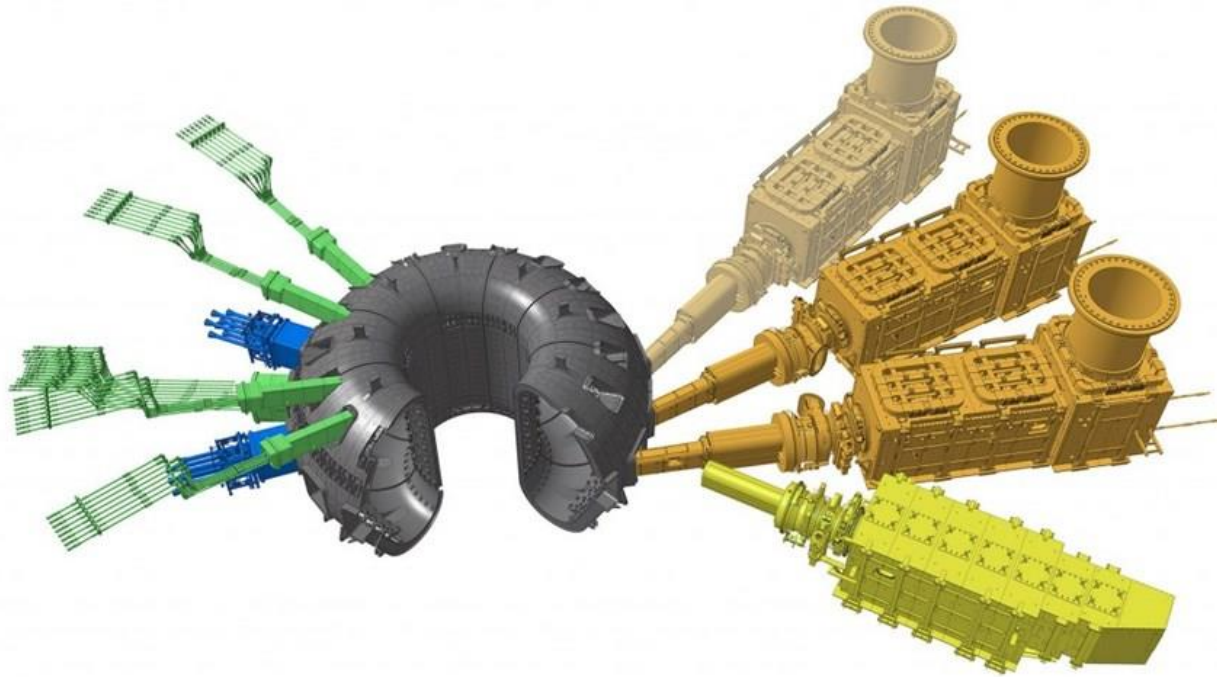
Bakeable to 350°C

All plasma-facing
components will be
in tungsten for the
nuclear phase and
possibly now right
from the start of
operations

Le projet « Divertor Tokamak Test » DTT

ENEA site in Frascati. DTT will be a high field superconducting toroidal device (6 T) carrying plasma current up to 5.5 MA in pulses with length up to about 100s, with a D-shape cross section defined by major radius $R=2.19$ m, minor radius $a=0.70$ m and average triangularity 0.4. The auxiliary heating power will be 45 MW.

Injecteurs de neutres et Antenne ICRH d'ITER



UN REACTEUR

1 - Système magnétique

2 - Enceinte à vide

3 - Première paroi

4 - Couverture

Protection, production tritium
production électricité



Auxiliaires
(chauffage..)

Extraction
de la
chaleur

Turbine

Alternateur

Electricité

Production et
extraction du
Tritium de la
couverture

Injection D&T

Séparation
D&T, He,..

Deutérium Hélium

Lithium

ITER vs REACTEUR

1 - Système magnétique

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

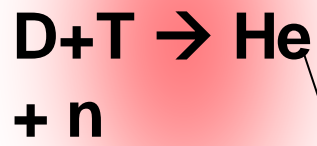
2 - Enceinte à vide

3 - Première paroi

4 - Couverture

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

Auxiliaires
(chauffage..)



Extraction
de la
chaleur

6 modules
de
génération
de tritium



Injection D&T

Séparation
D&T, He, ...

~~Lithium~~

Deutérium Tritium
Hélium