

# ***La Fusion Nucléaire par Confinement Magnétique : avancées, défis et perspectives***

**Gérard Bonhomme & Roland Sabot**

[gerard.bonhomme@univ-lorraine.fr](mailto:gerard.bonhomme@univ-lorraine.fr)

# Résumé

La maîtrise de l'énergie de fusion pourrait permettre de satisfaire la demande future en énergie de l'humanité sans contribuer au réchauffement climatique et avec un impact minimum sur l'environnement. Si les avantages de la fusion en termes de combustible, radioactivité, génération de déchets et sûreté nucléaire, sont indéniables, les défis à relever sont encore nombreux. Alors que la construction du grand tokamak international ITER avance maintenant rapidement sur le site de Cadarache et que nombre de nouveaux projets ont été lancés, la fusion n'arrivera-t-elle cependant pas trop tard pour contribuer à la décarbonisation ?

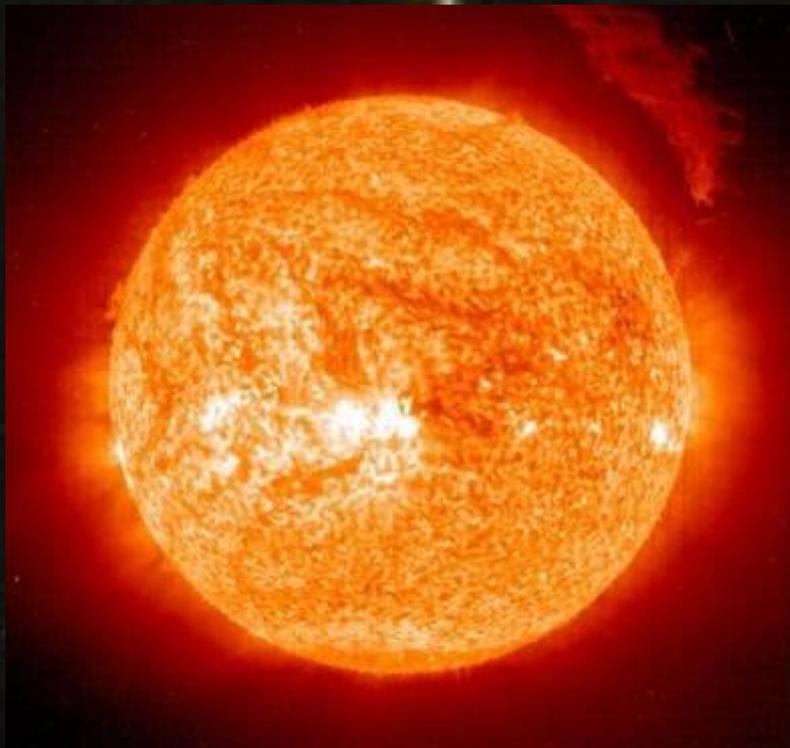
Après un rappel des principes et défis de la fusion par confinement magnétique et des étapes franchies jusqu'au projet ITER, nous ferons le point sur l'état d'avancement pour cette dernière étape décisive avant le réacteur électrogène.

Nous montrerons pourquoi l'avenir de la fusion dépend non seulement des résultats du programme expérimental prévu dans ITER, mais aussi d'autres recherches en cours.

Ces recherches 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, nous ferons le point sur les avancées et les projets dans le domaine des configurations de type stellarator, dont notamment la machine Wendelstein-7X en opération à Greifswald depuis 2015.

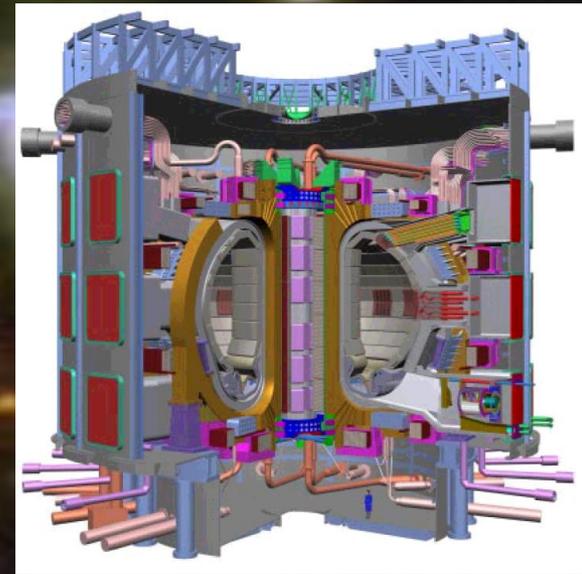
Mais quelle que soit la configuration magnétique finale, il reste de nombreux défis à relever, en particulier dans le domaine des matériaux.

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 startups.



$4 \cdot 10^{26}$  watts,  $15 \text{ W/m}^3$   
 $15 \cdot 10^6 \text{ K}$ ,  $150 \text{ tonnes/m}^3$

# *La fusion et le projet ITER :* *Contexte, progrès, et défis scientifiques*



$5 \cdot 10^8$  watts,  $5 \cdot 10^5 \text{ W/m}^3$   
 $150 \cdot 10^6 \text{ K}$ ,  $10 \text{ mg/m}^3$

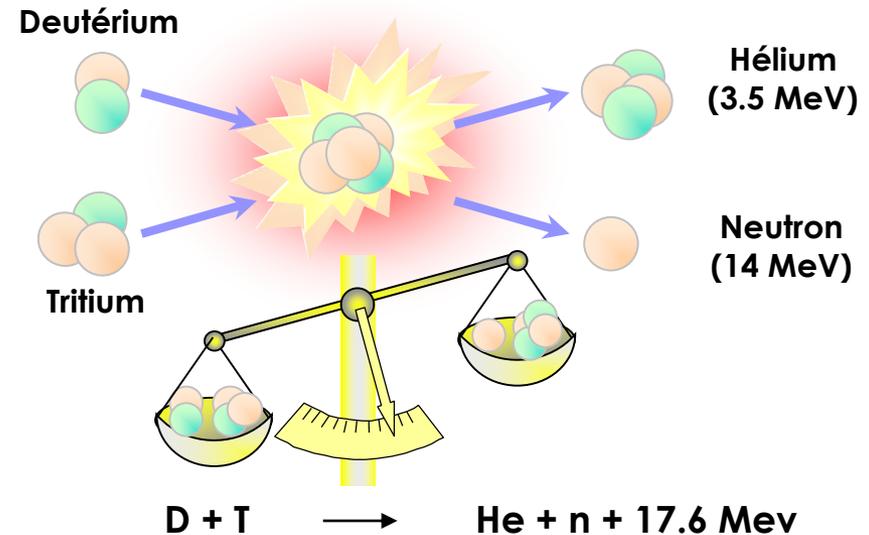
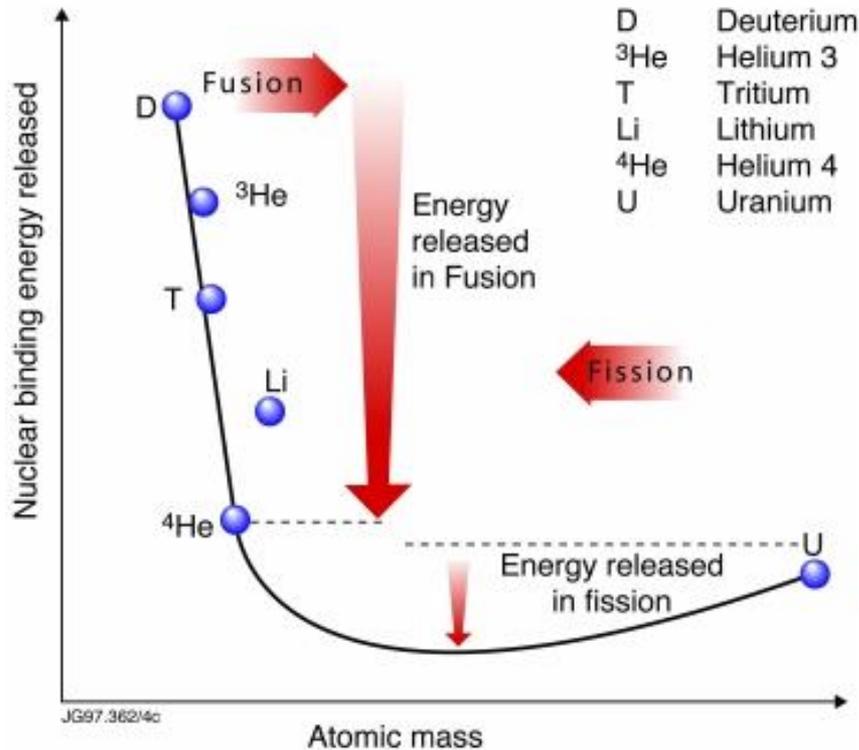
# Contenu

- **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**
- **Les autres approches pour la fusion par  
confinement magnétique:**
  - ✓ **Stellarators : Wendelstein 7-X**
  - ✓ **Les projets des start-ups**

# ***La fusion thermonucléaire : principes généraux***

# 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

$P_{\text{fus}}$  = 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 :  $n_D = n_T = n_i / 2$

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

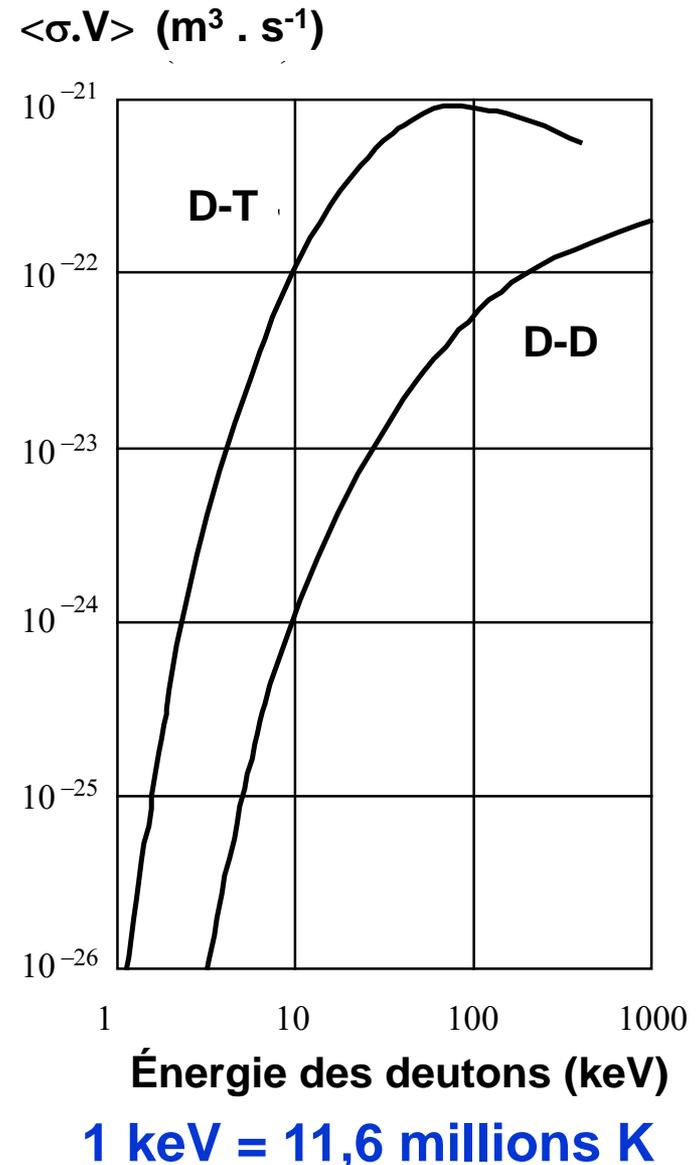
## Puissance libérée dans le plasma

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

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  $^{235}\text{U}$



# Le critère de Lawson et le facteur Q

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

**Pression** > 1 bar.s

$\tau_E$  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 »

$$Q = 1$$

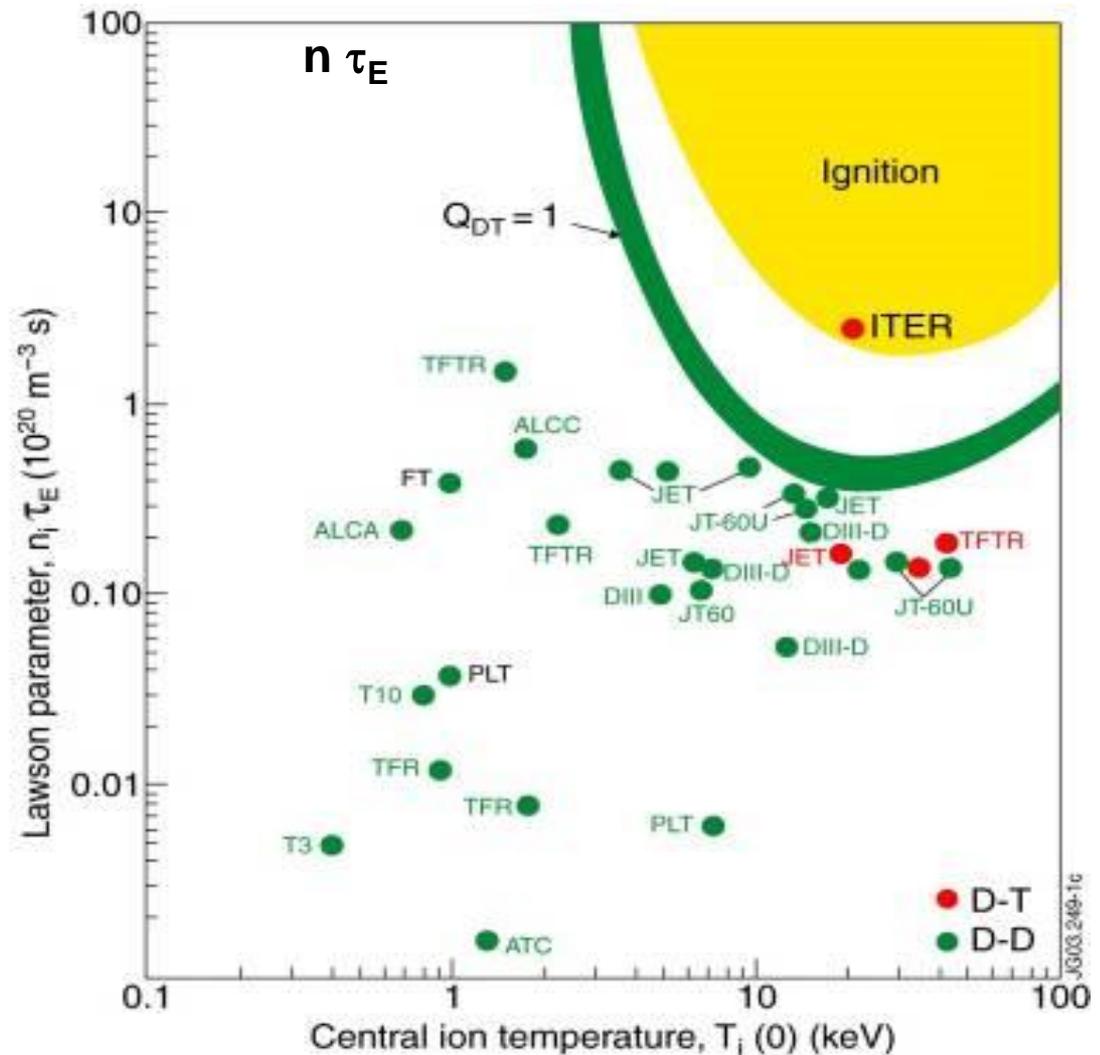
$$P_{\text{fus}} \geq P_{\text{inj}}$$

« Ignition »

$$Q = \infty$$

$$P_{\text{inj}} = 0$$

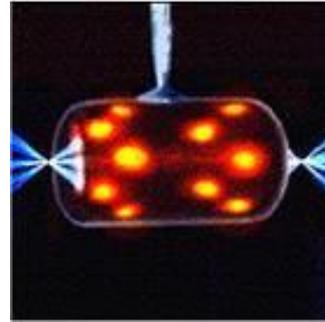
$$P_{\alpha} \geq P_{\text{pertes}}$$



# La fusion contrôlée sur Terre : 2 schémas

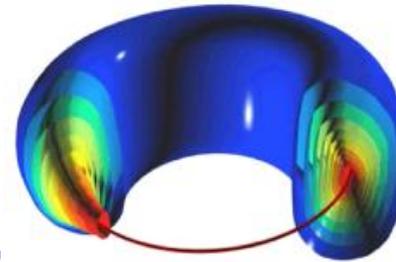
## 1 – Compression rapide d'une petite cible → confinement inertiel

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



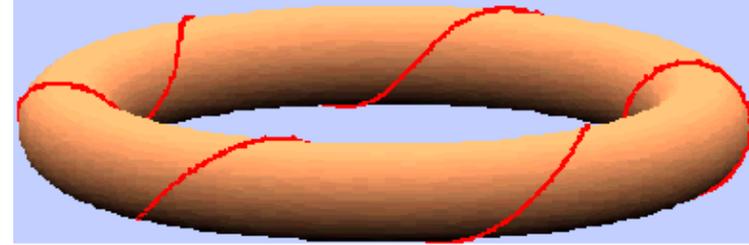
## 2 – Confinement du plasma dans une bouteille magnétique → confinement magnétique

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



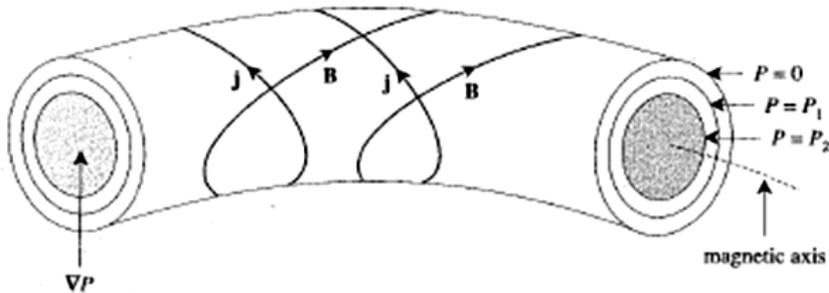
# Confinement magnétique

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 :

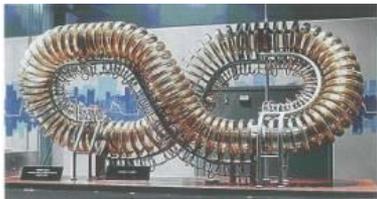
1. Champ toroïdal créé par des bobinages externes + courant toroïdal →

### Tokamaks

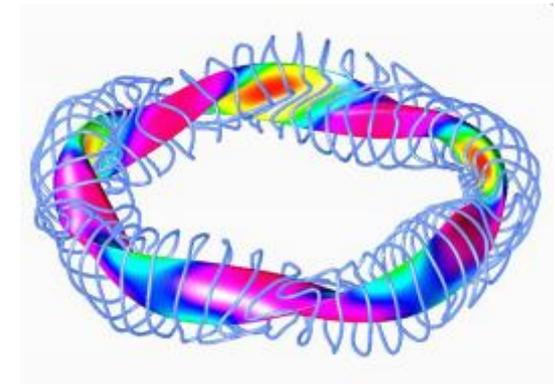
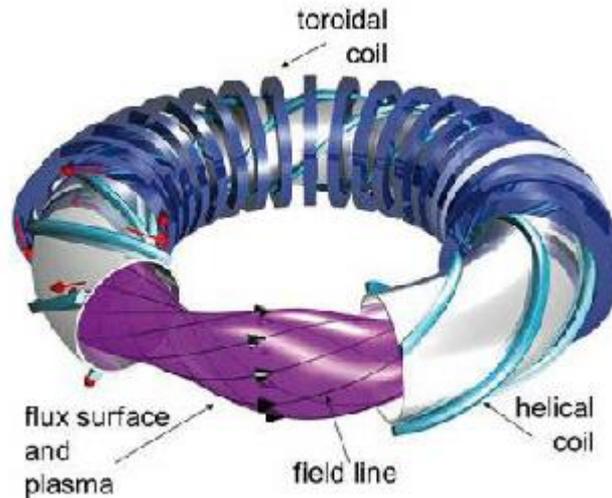
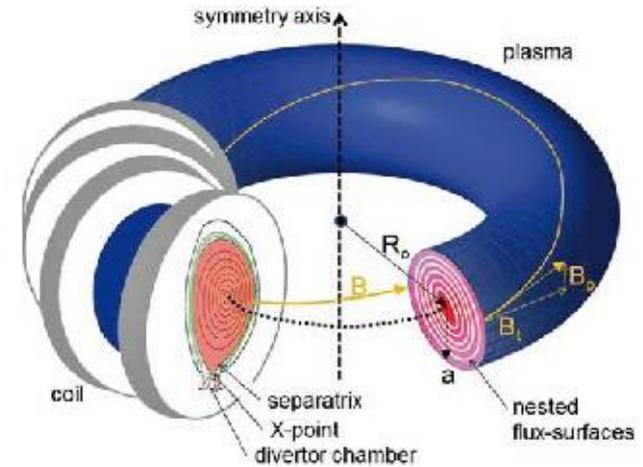
C'est actuellement la "bouteille magnétique«  
la plus efficace

2. Champ magnétique entièrement  
généré par des bobinages externes →

### Stellarators



Spitzer, Princeton,  
années 50

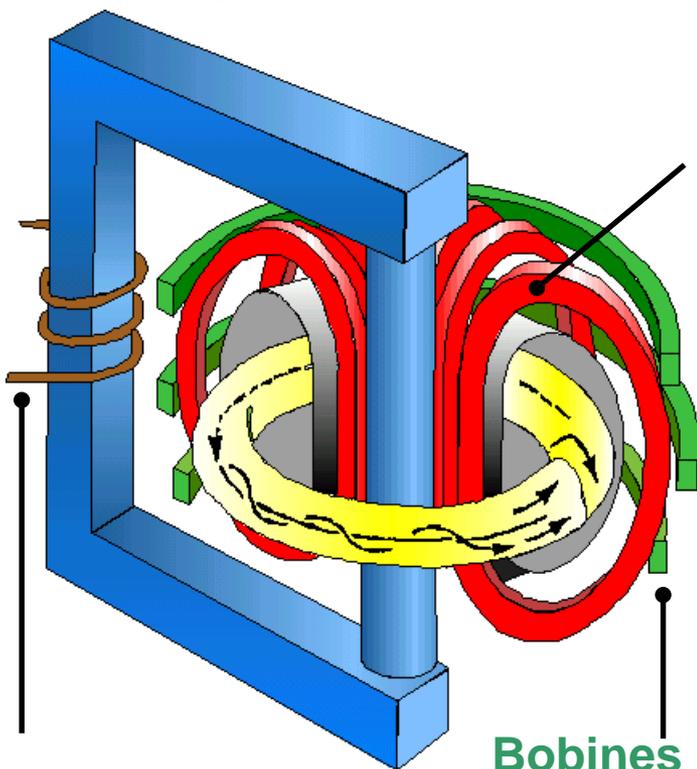


Wendelstein 7-X

# Le Tokamak : comment fonctionne-t-il ?

- Tokamak (contraction de mots russes, *toroidalnaya, kamera, magnitnaya*) :  
Transformateur dont le secondaire est le plasma

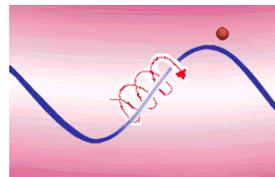
- Le confinement est obtenu par la combinaison de **deux** champs magnétiques:



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

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

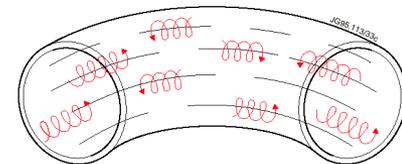
Les trajectoires des particules chargées s'enroulent autour des lignes de champ résultantes



+



=



**Bobines Poloïdales**

**Enroulement primaire**

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

# Le chauffage du plasma

## Régime ohmique

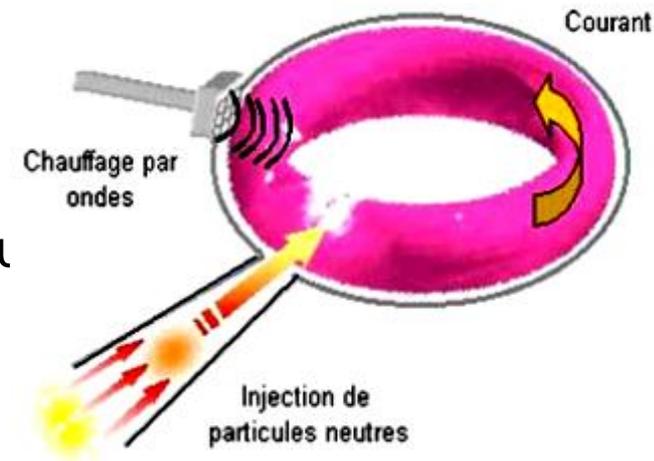
Chauffage par effet Joule naturel dû au courant intense (MA) circulant dans le plasma (et utilisé pour créer la configuration magnétique tokamak).  
Mais la résistance du plasma diminue lorsque la température augmente → la température maximale atteinte est de l'ordre de 10 millions de degrés

## Chauffage additionnel

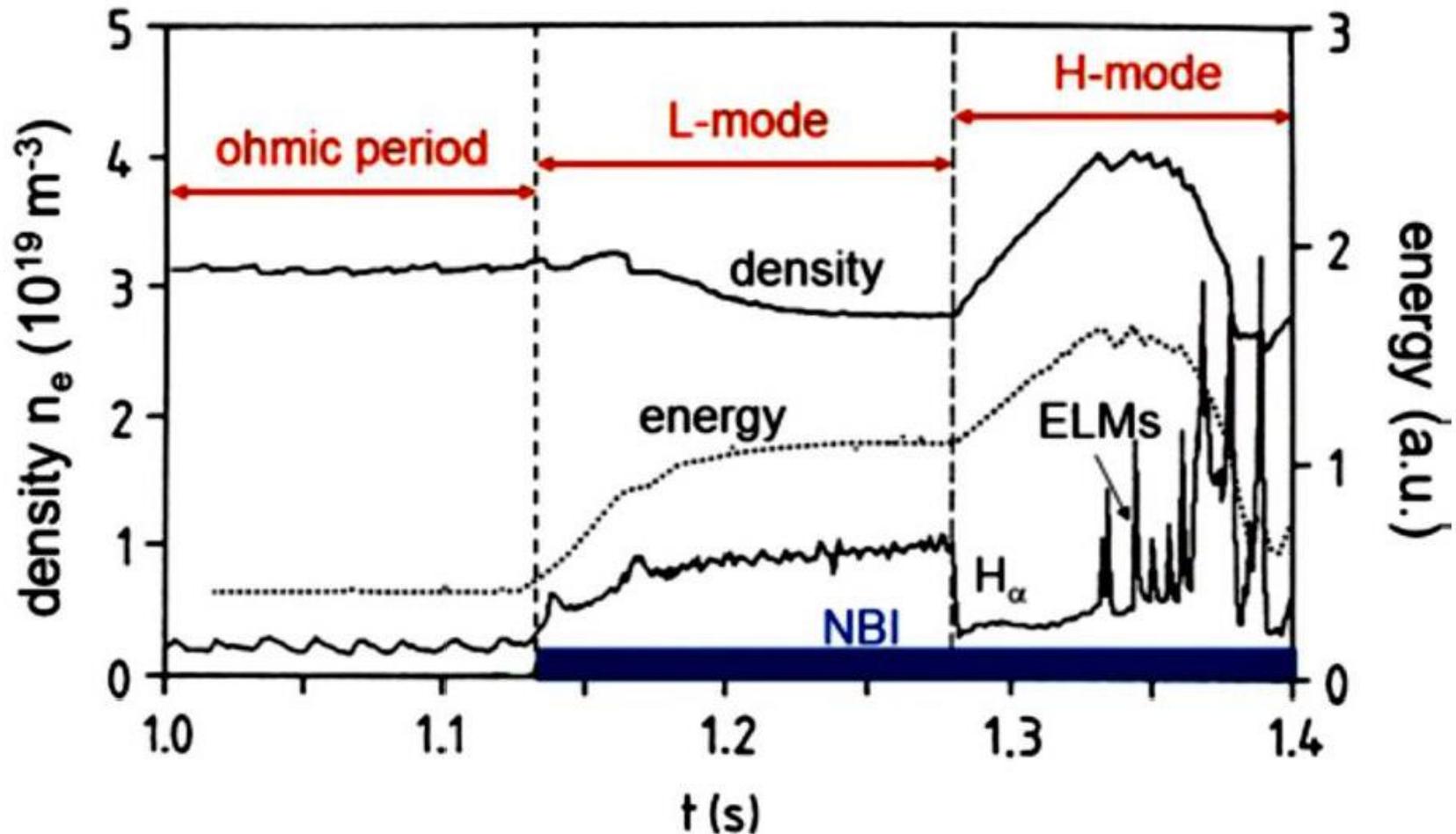
Nécessaire pour atteindre les températures requises.

→ 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 une certaine classe de particules plasma ( → LH, ICRH, ECRH), et transmettre son énergie, comme dans un four micro-onde qui chauffe un aliment en excitant les molécules d'eau.



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



Mode ohmic  $\rightarrow$  mode L  $\rightarrow$  mode H

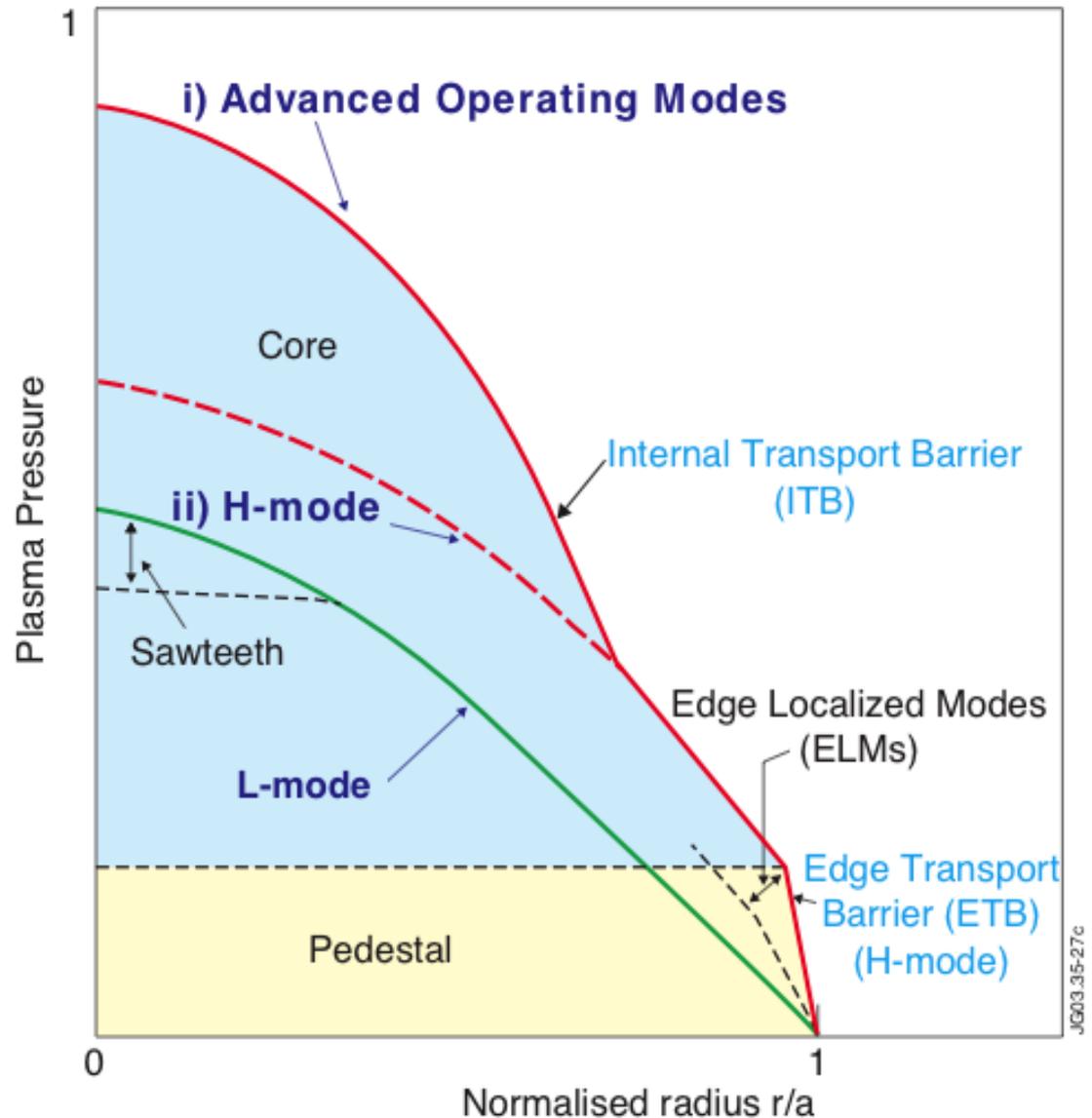
# Mode de confinement amélioré

## 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)



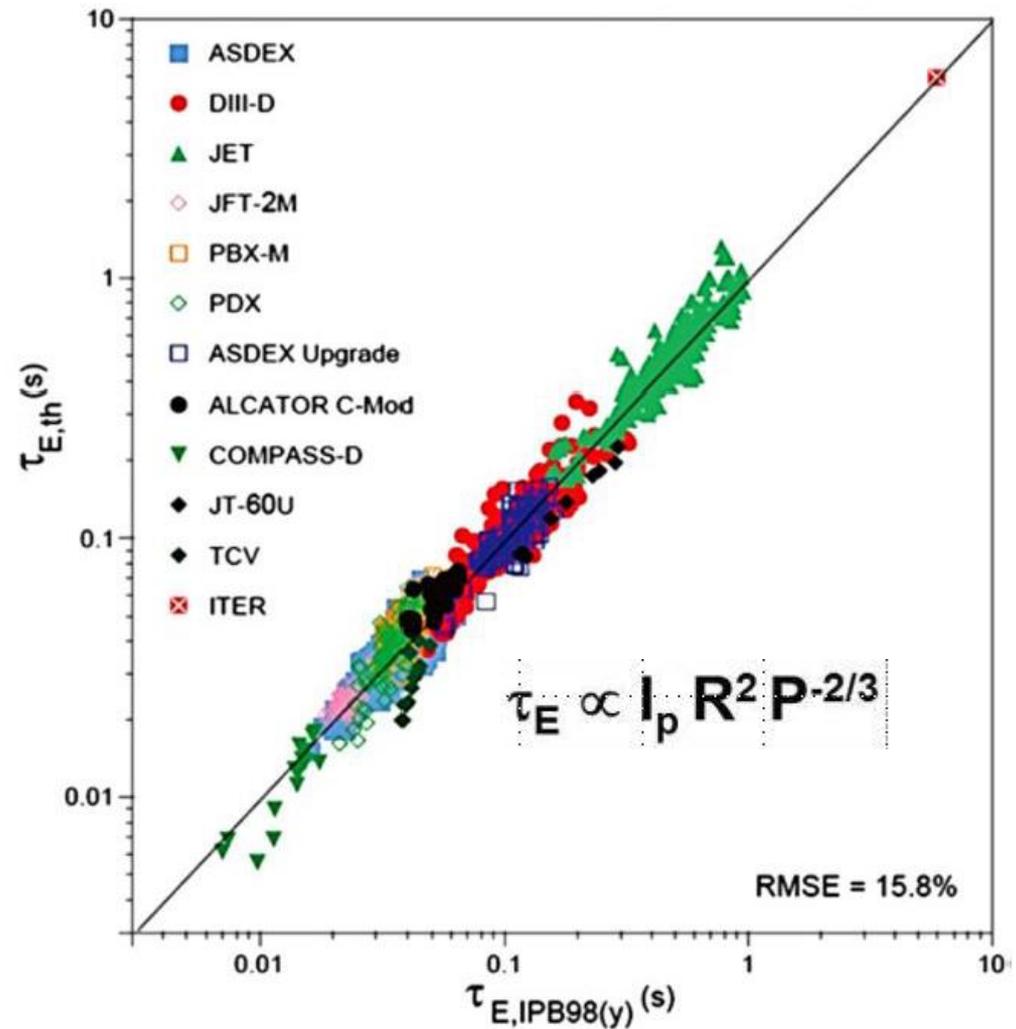
# Progrès vers ITER et le réacteur

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

Pertes en surface et génération de puissance en volume →

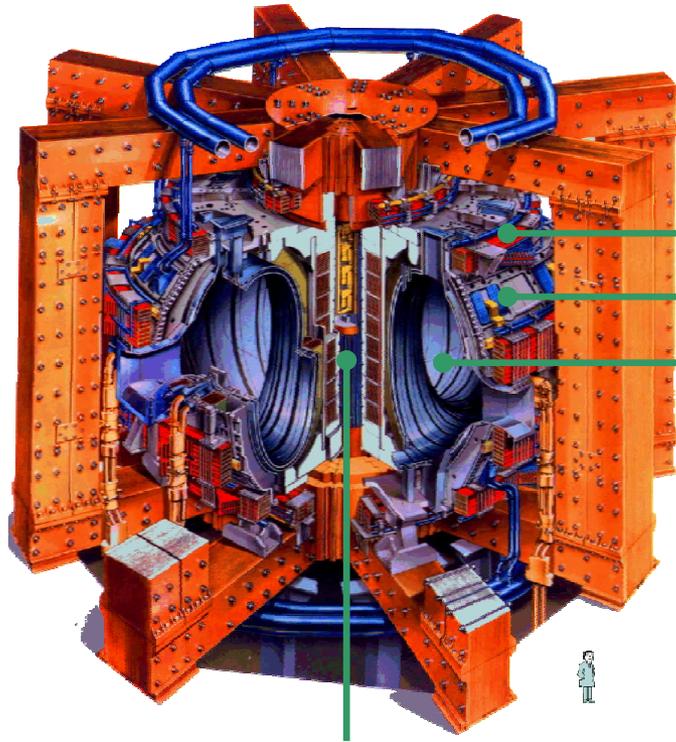
Nécessité d'augmenter le rapport V/S donc la taille

- 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*



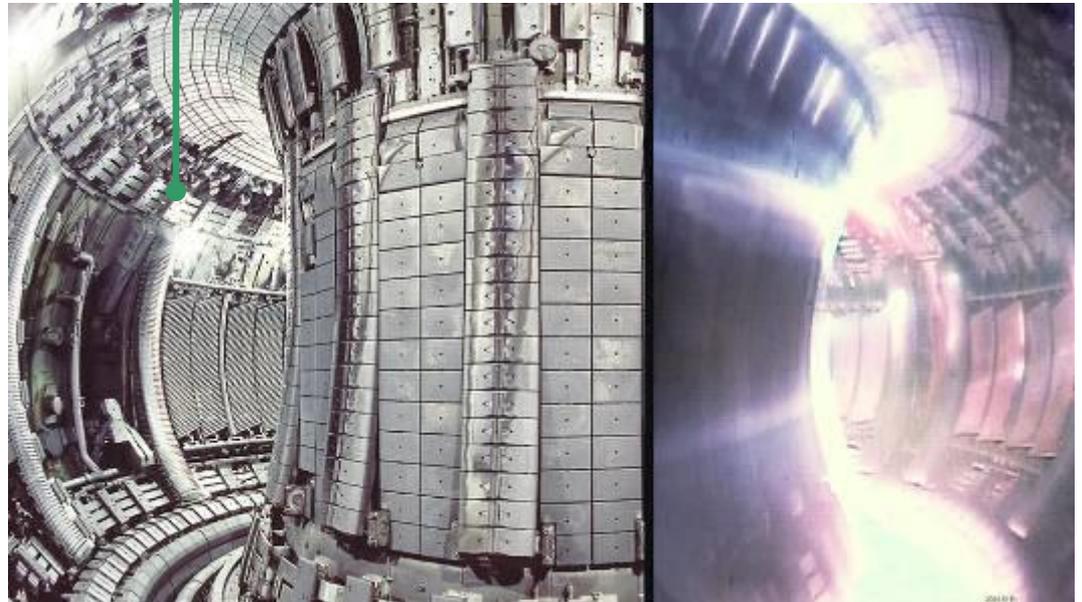
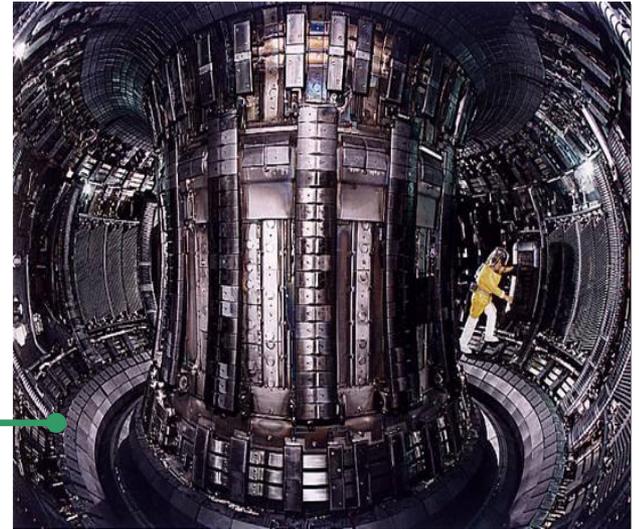
**Valeurs expérimentales de  $\tau_E$  comparées aux prédictions**

# Le Tokamak européen JET

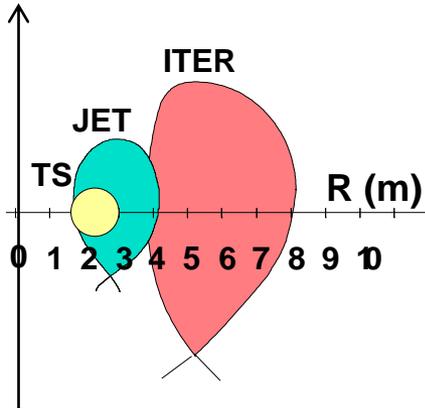


Solénoïde central

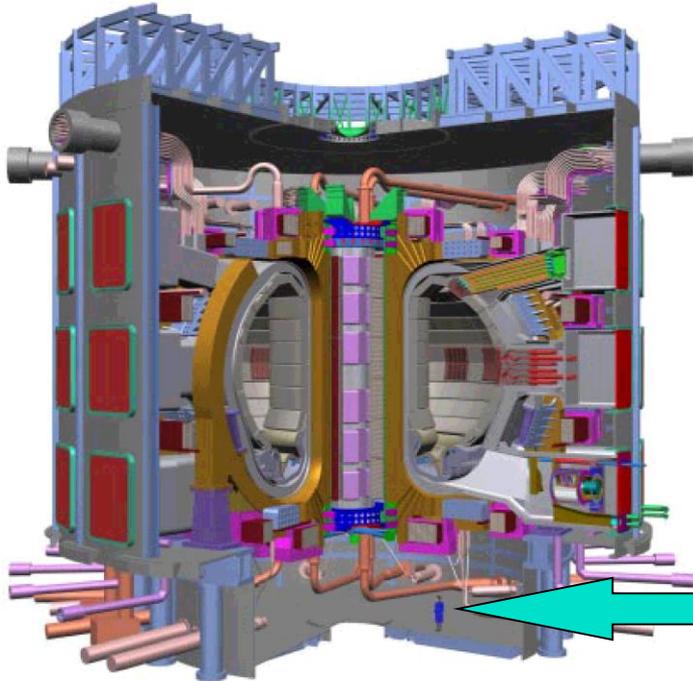
Bobine poloïdale  
Bobine toroïdale  
Enceinte à vide



# ITER → size : 2 x JET



	JET	ITER
Major Radius	3 m	6.2 m
Plasma Volume	100 m <sup>3</sup>	830 m <sup>3</sup>
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**



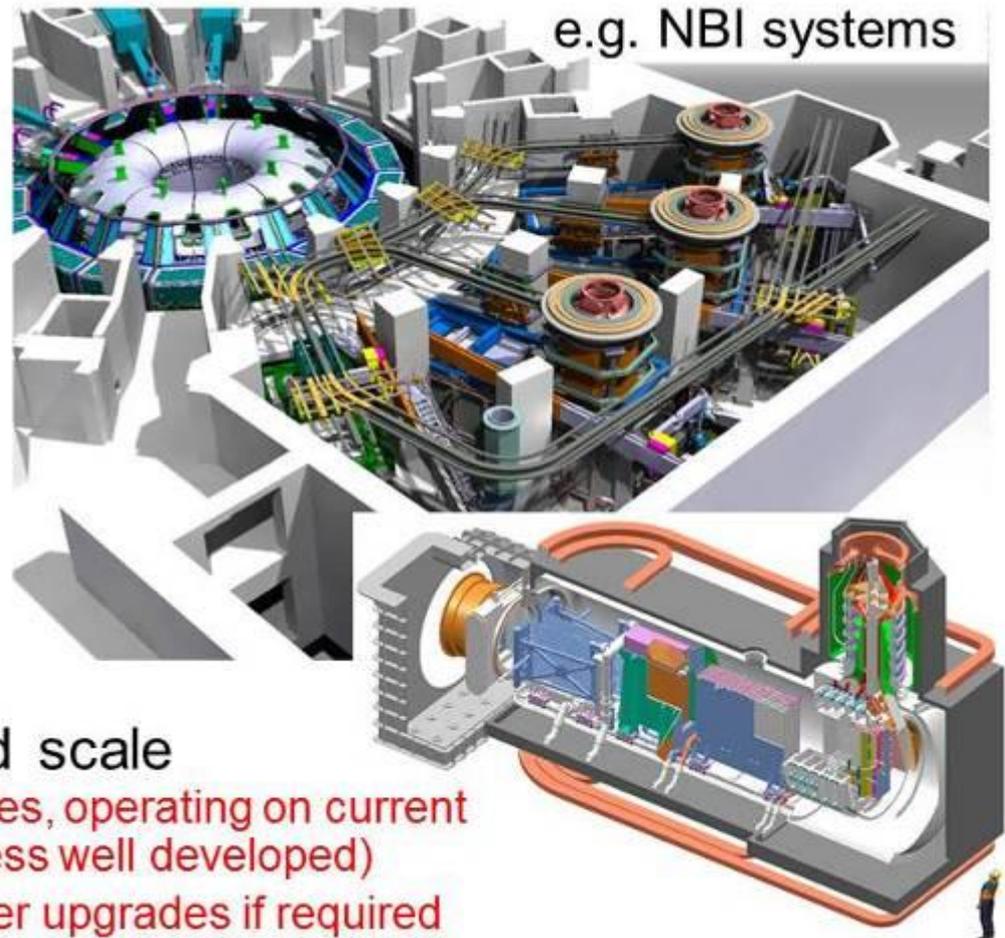
# Chauffage du plasma

System	Power
<b>NBI</b> -ve ion, 1 MeV	33 MW
<b>ECH &amp; CD</b> 170 GHz	20 MW
<b>ICRH &amp; CD</b> 40 – 55 MHz	20 MW

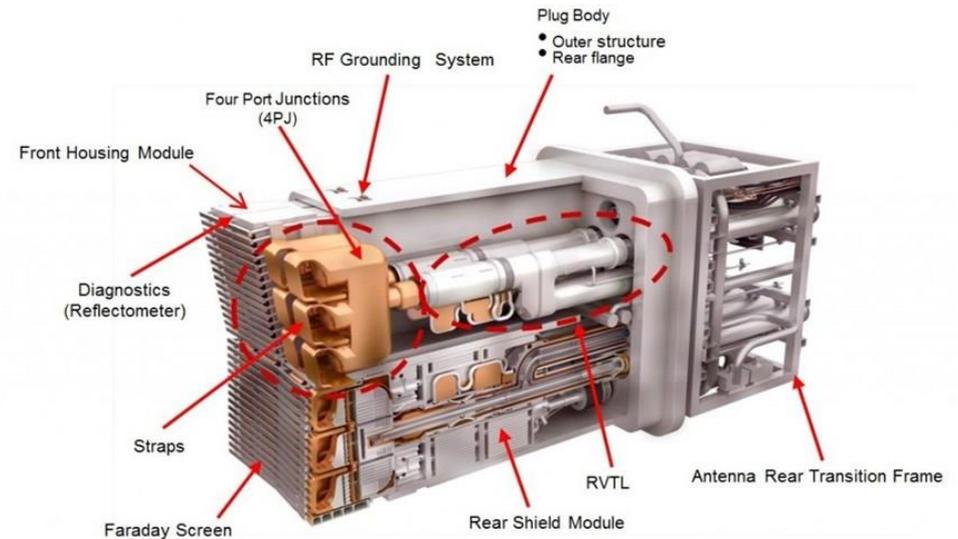
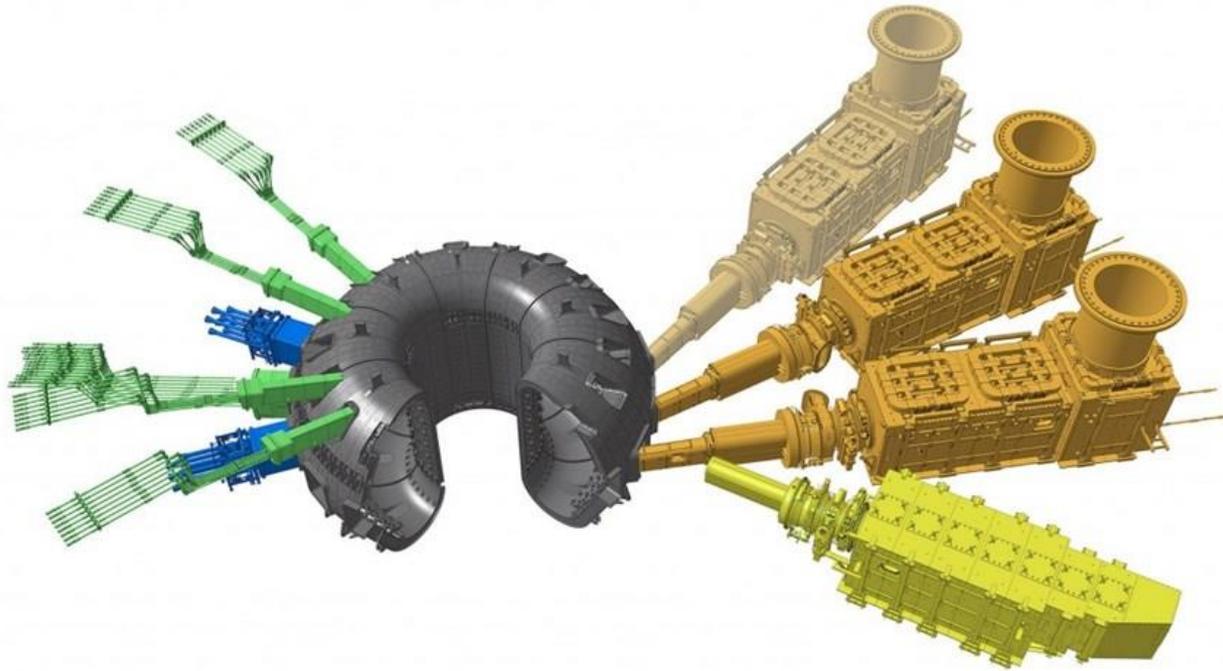
$P_{\text{aux}}$  for  $Q_{\text{DT}} = 10$  nominal  
scenario: 40 – 50 MW

All are on an unprecedented scale

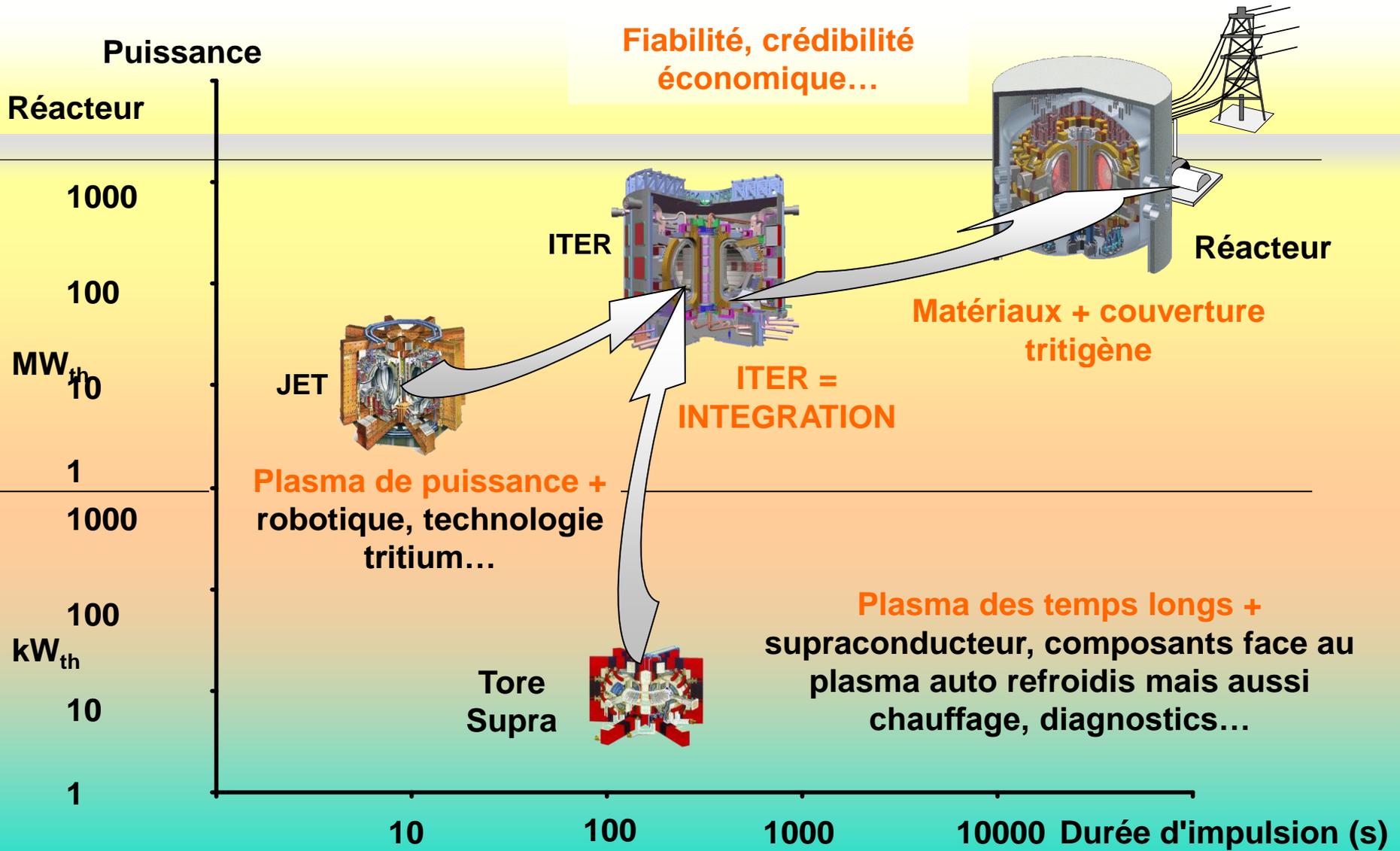
- Upscale from known technologies, operating on current tokamaks (-ve ion NBI source less well developed)
- Systems have flexibility for power upgrades if required



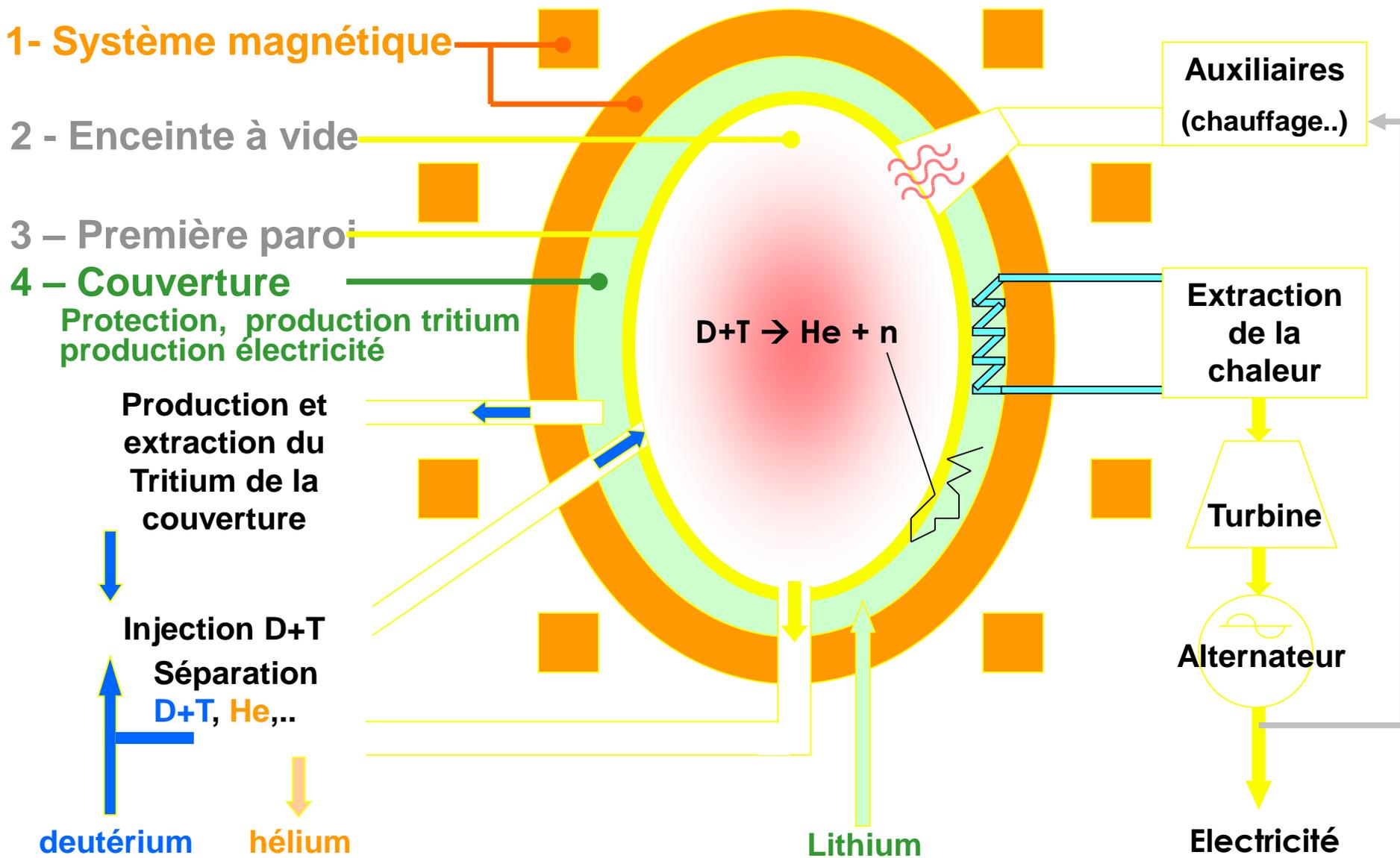
# Injecteurs de neutres et Antenne ICRH d'ITER



# La progression vers le réacteur



# Le réacteur de fusion : principe



# *D'ITER aux réacteurs: des défis scientifiques et technologiques*



## **Roland Sabot**

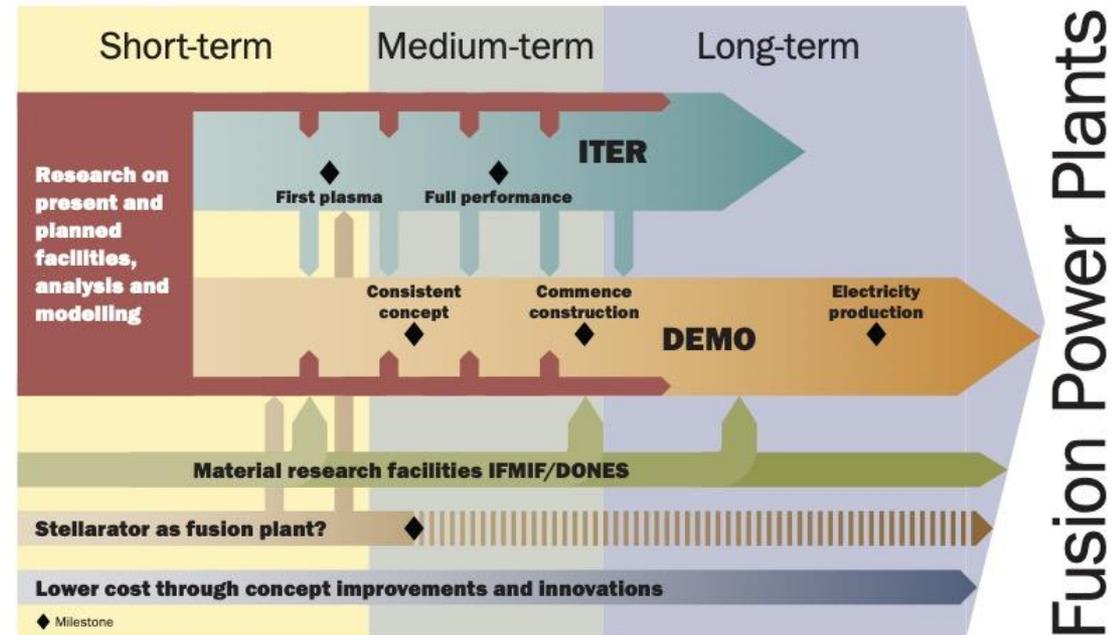
- **ITER vs le réacteur**
- **Défis scientifiques pour ITER et le réacteur**
  - *Chauffage du plasma*
  - **Interaction plasma paroi**
  - **Mesures et contrôle du plasma**
- **Défis technologiques pour ITER et le réacteur**
  - **Télémanipulation**
  - **Génération et gestion du tritium**
- **Les progrès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

# 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:**

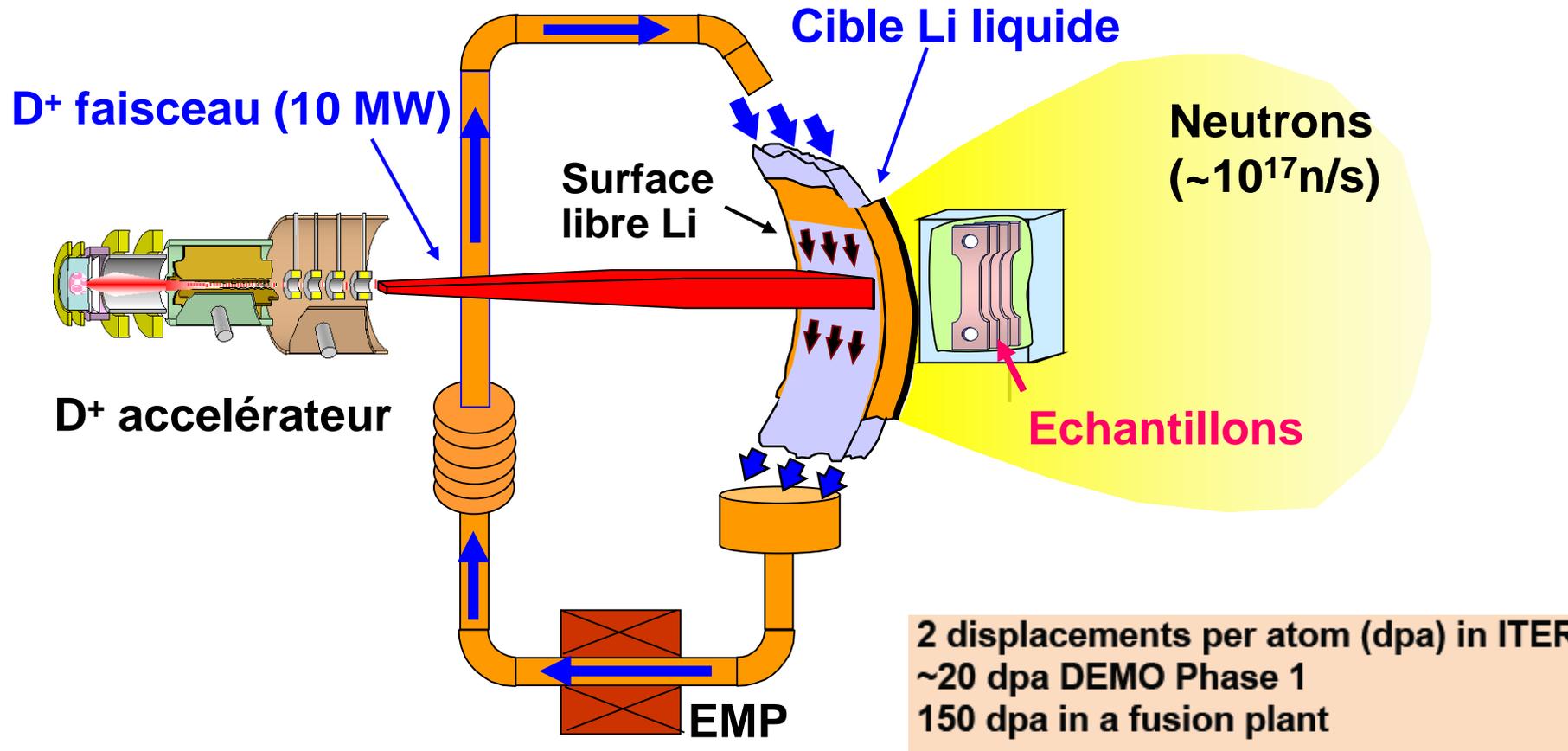
- **Aciers ferritique – Martensitique à basse activation type Eurofer et F82H (Japon)**
- **Développer et tester des nouveaux aciers renforcés par dispersion d'oxydes (ODS)**



**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**

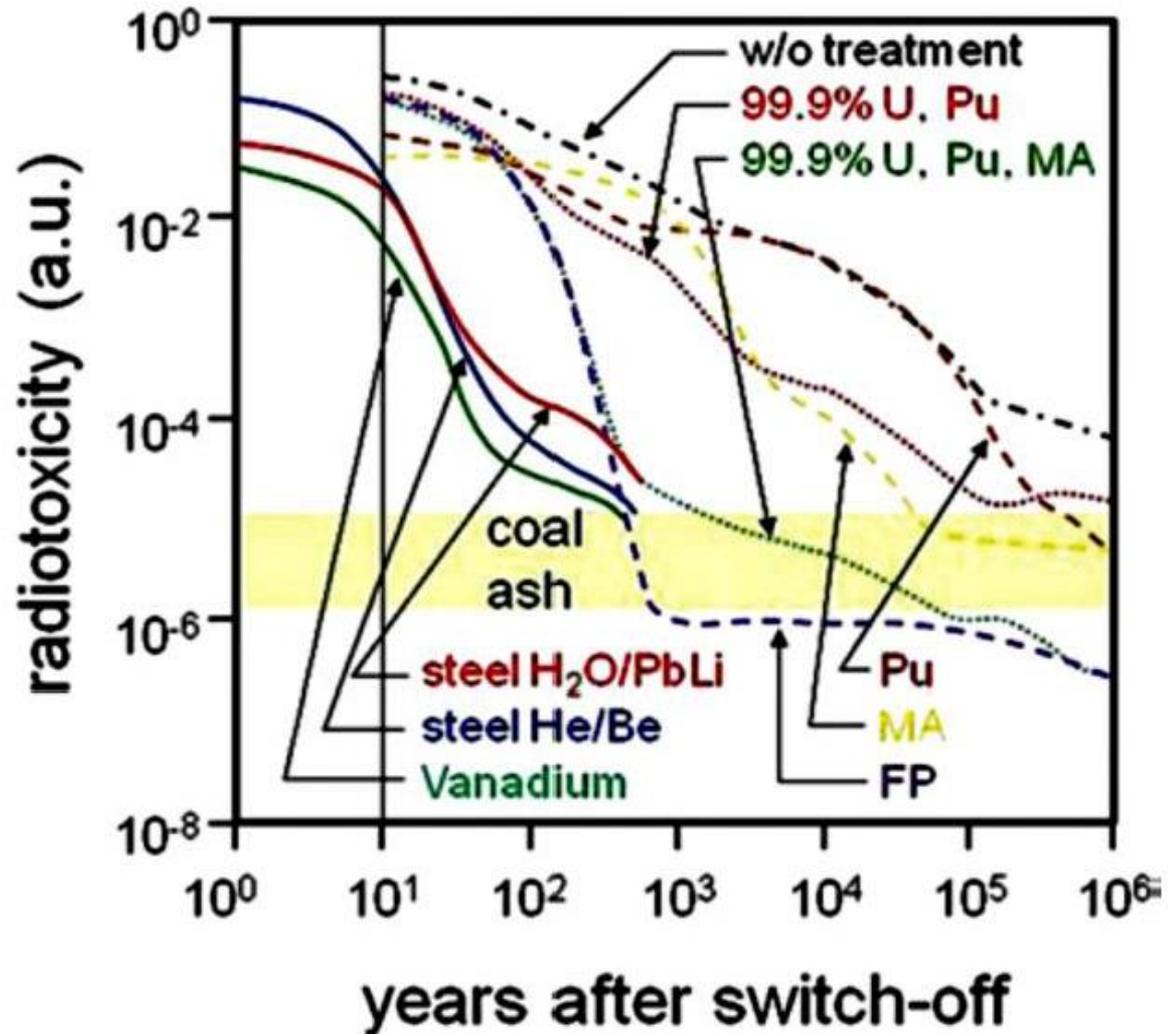
# Expérience d'irradiation IFMIF : vue schématique



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

# ***Les autres approches pour la fusion par confinement magnétique:***

- Stellarators : Wendelstein 7-X***
- Les projets des start-ups***

# Stellarators vs. Tokamaks

## Avantages and inconvénients des Stellarators :

**Inconvénient principal : bobines difficiles à construire**

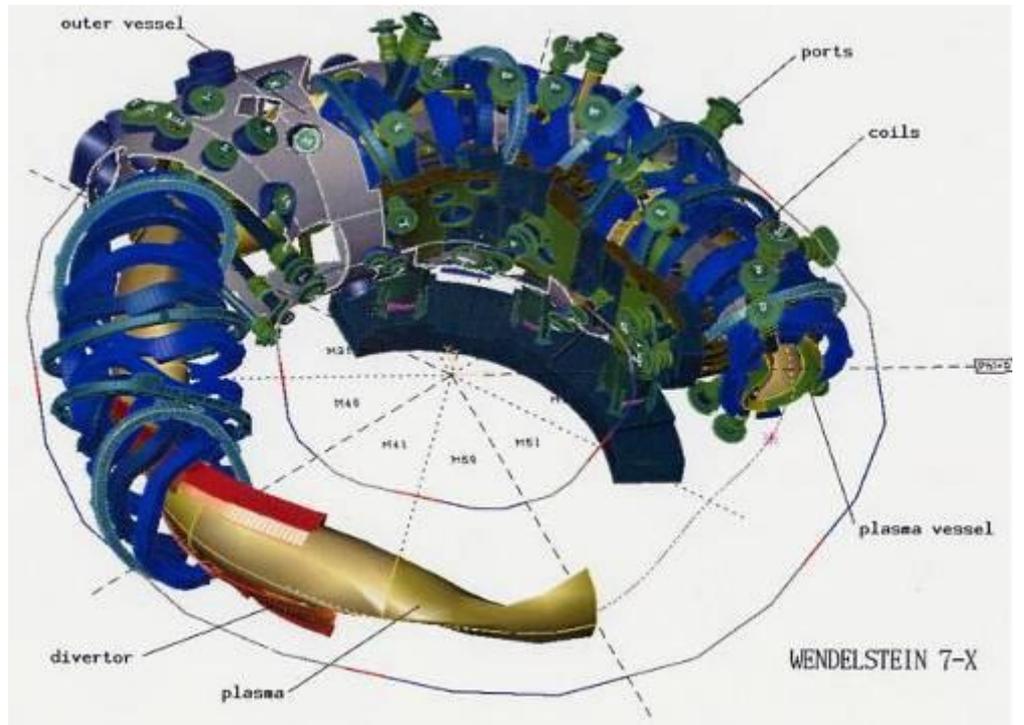
### Avantages

- 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  $\beta$  (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



Max-Planck- Institut für Plasmaphysik, Greifswald



# *Le Stellarator Wendelstein 7-X*

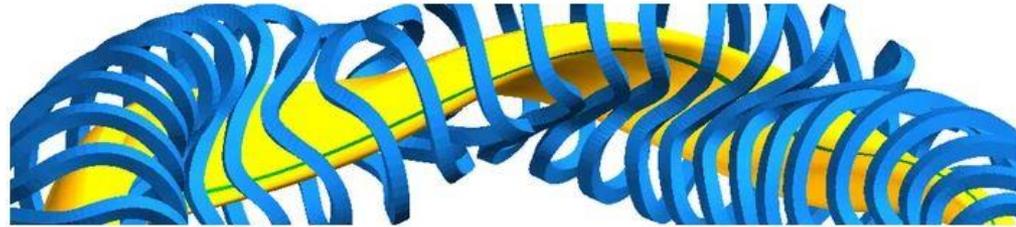
**État du Stellarator Wendelstein 7-X en octobre 2010**



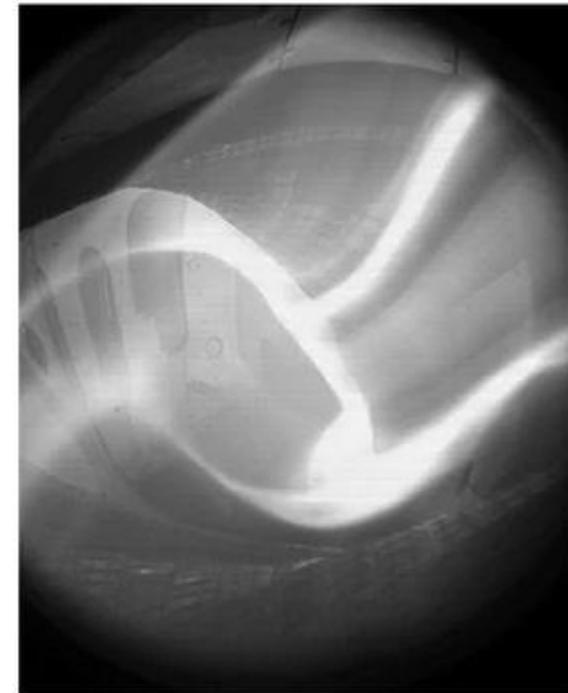
# Le Stellarator Wendelstein 7-X

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

- Stellarator optimisé, 30 m3, bobines supraconducteur
- Premier plasma décembre 2015
- 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**



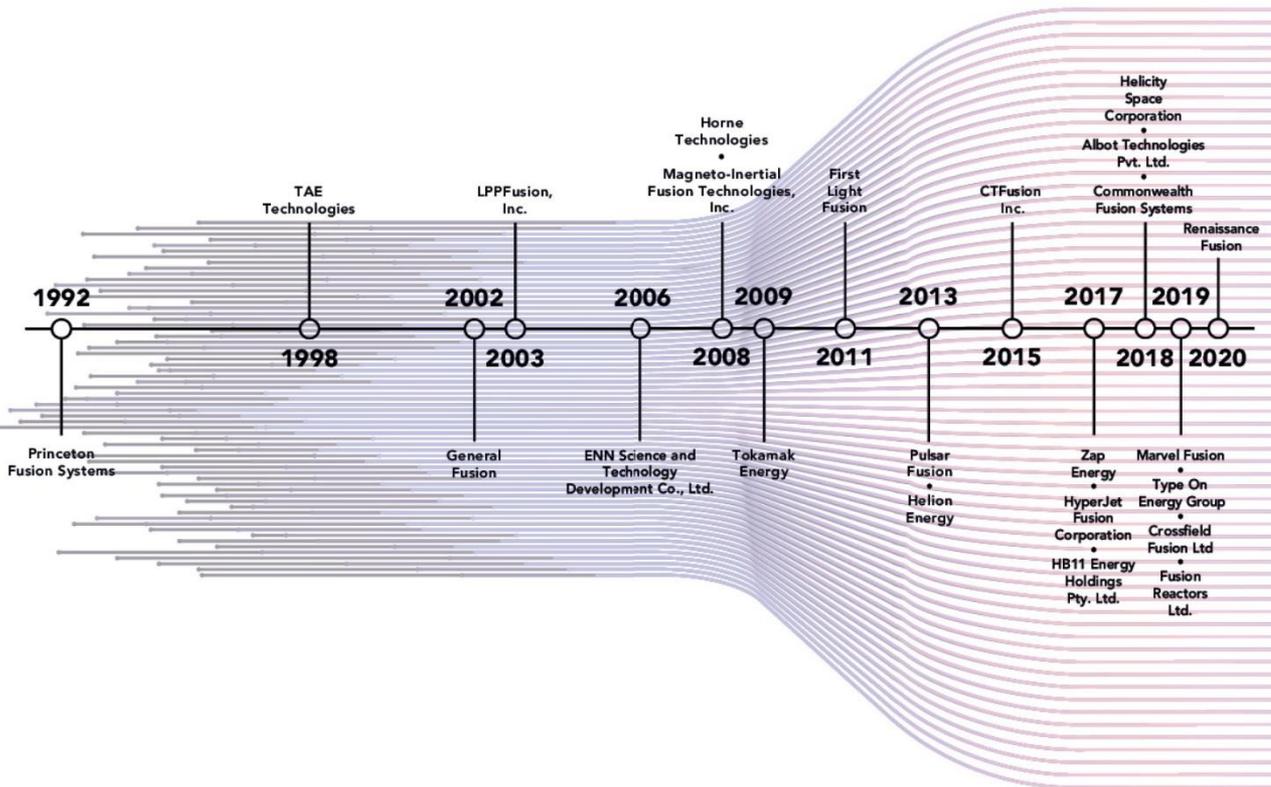
2017



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

# Une explosion de start-ups !

## An explosion of start-ups & attention from the public



# 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  $-250^\circ\text{C}$ )  
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 !*

- **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 et 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 technologie 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".

# 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

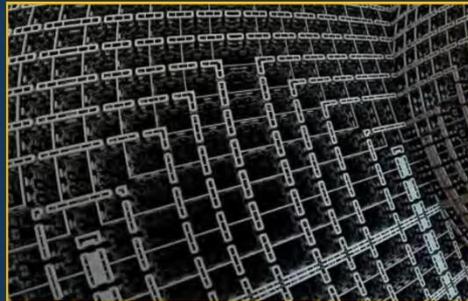


Moving upright a 440 t sector of the vacuum vessel, to bring it to the assembling tool on the left of the image (Korean sector, 11.12.2021). © ITER.



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

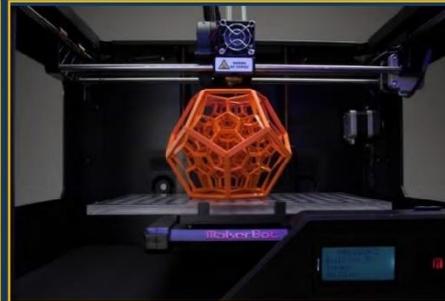
## Innovation & spin offs



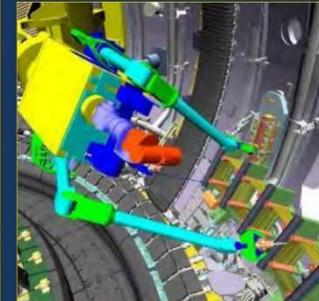
High technology filters



Medical magnetism



3D printing for complex shapes



Robotics in extreme environments

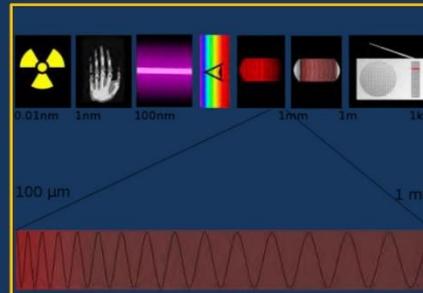
Etc.



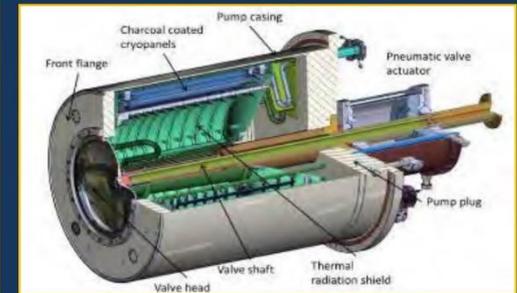
Power electronics



Explosive forming



Ultra high-speed transmission



Cryopumps – Vacuum systems

# *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 Mm<sup>3</sup> de terre enlevés, bonne assise rocheuse (100 t m<sup>-2</sup>)**