

Pourquoi le projet ITER ?

Quelle source d'énergie pour demain ?

Bilan et futur

Qu'est ce que la fusion ?

Quelles sont les techniques pour ITER ?

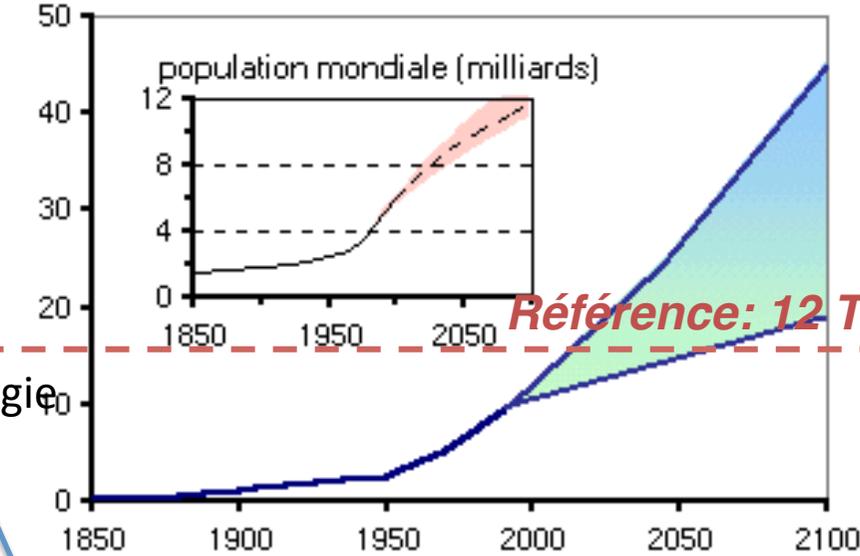
S. Heuraux

Université de Lorraine, Institut Jean Lamour, UMR CNRS 7198

Quelle est la consommation d'énergie et son évolution ?



Consommation d'énergie primaire (Gt équivalent pétrole)



20 TW



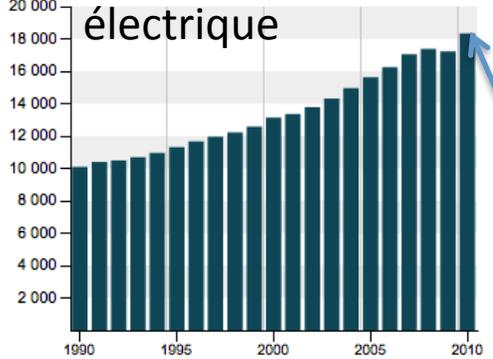
15 TW (2010)

10 TW (2000)

6 TW

0.5 TW

Consommation d'énergie électrique



2 TW (2010)

... TW

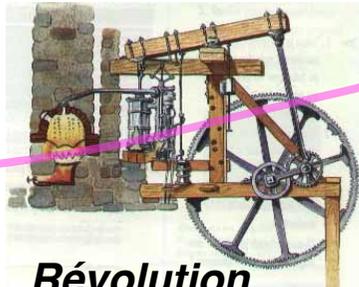


Préhistoire

... TW



Moyen-âge



Révolution industrielle



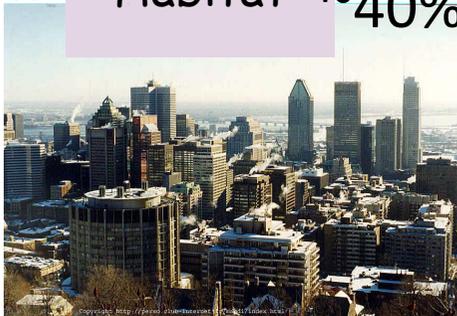
Homme moderne (1975)

Homme de demain (2020)

A quoi sert l'énergie ?



Habitat ~40%

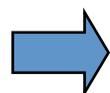


Industrie ~30%

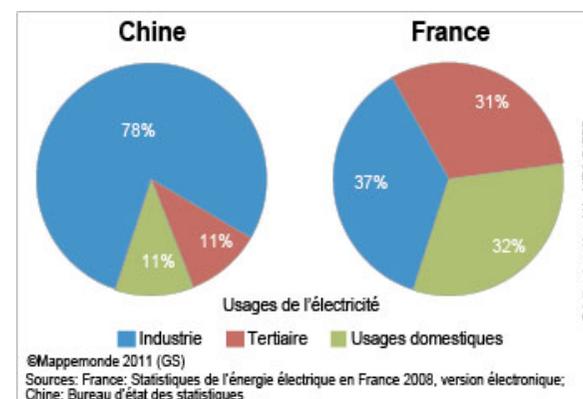
Répartition de la consommation d'énergie en France



Transports ~30%



*La répartition entre industrie-transport-habitat est très différente suivant les pays:
en moyenne mondiale
50% industrie
et 25 % pour les autres*

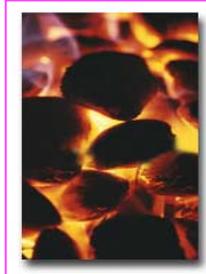


Quelles sont les sources d'énergie ?

- Energies non renouvelables (combustible fossile)



Nucléaire (Uranium)



Charbon

Gaz

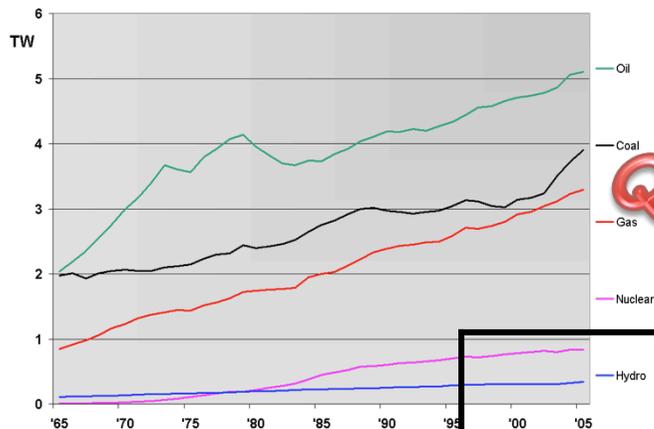


Pétrole

- Sources d'énergie "renouvelables" !

- Rayonnement Solaire
- Biomasse (bois, etc)
- Éolienne (vent)
- Hydraulique (chute d'eau)
- Marée (gravitation)
- Géothermie (radioactivité)



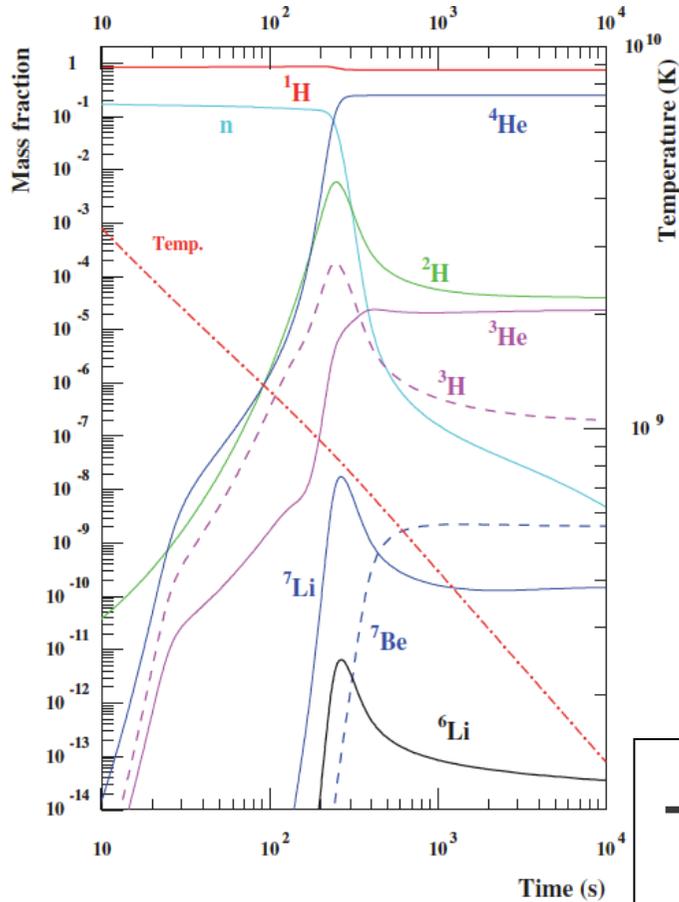


Quelles sont les ressources en énergie ?

| Energies fossiles | Réserve(x10⁺²² Joules) | Ressources (an) |
|------------------------------|------------------------------------------|----------------------------|
| Pétrole/Gaz | 3.5 | ≤ 50/70 |
| Charbon | 20 | ≤ 160 |
| Fission REP | 10 (250) | ≤ 50 (5.000) |
| Surgénérateur | 200 (5.000) | ≤ 1.000 (100.000) |
| Fusion D-T (*) Li | 60 (1.000.000) | ≤ 2000 (20.000.000) |
| Fusion D-D | (1.500.000.000) | (10.000.000.000) |

Quelle est l'origine des sources d'énergie ?

La nucléosynthèse primordiale =>
H, D, T, He, Li, Be

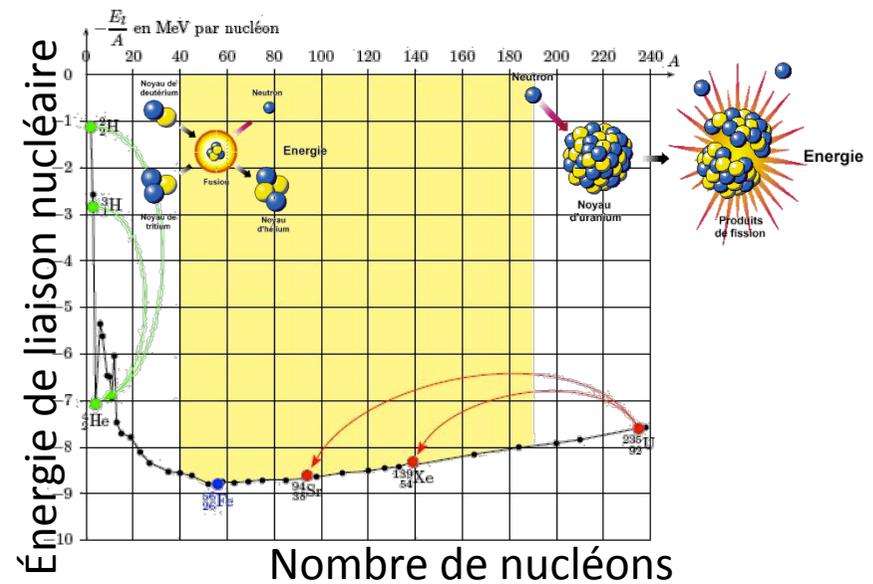


Gravitation +

1^{ère} génération d'étoiles et
générations suivantes



Synthèse d'éléments lourds lors
des fins de vie des étoiles



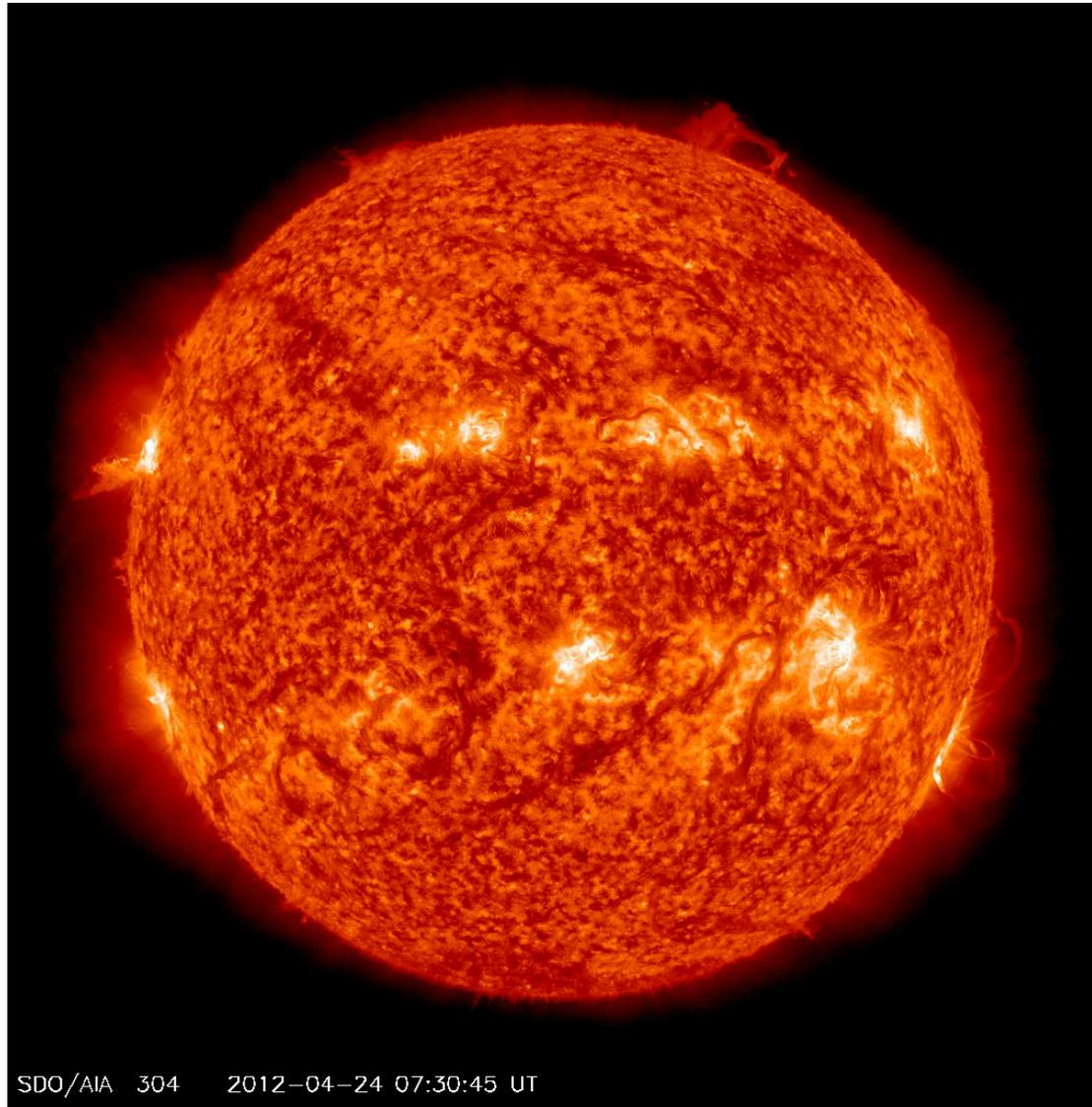
→ 2 possibilités de récupérer cette
énergie issue de la fusion :

- la **fusion** de deux noyaux légers
- la **fission** d'un noyau lourd

Relation d'Einstein

$\Delta m \Rightarrow$ chaleur

Le soleil: un exemple de réacteur à fusion auto-confiné en activité permanente sans maintenance



SDO/AIA 304 2012-04-24 07:30:45 UT

<http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>

Qu'est ce que la fusion ? Pourquoi ITER ?

C'est l'assemblage de deux éléments légers qui en donne un plus lourd tout en convertissant une partie de la masse des éléments légers en énergie.

La réaction de fusion la plus facile à réaliser est la fusion du deutérium D et du tritium T qui sont tous deux des isotopes de l'Hydrogène. Toutefois il faut vaincre la répulsion Coulombienne équivalente à une énergie thermique de **200 millions °C**.



Un utilitaire contenant 0.5 t de DT



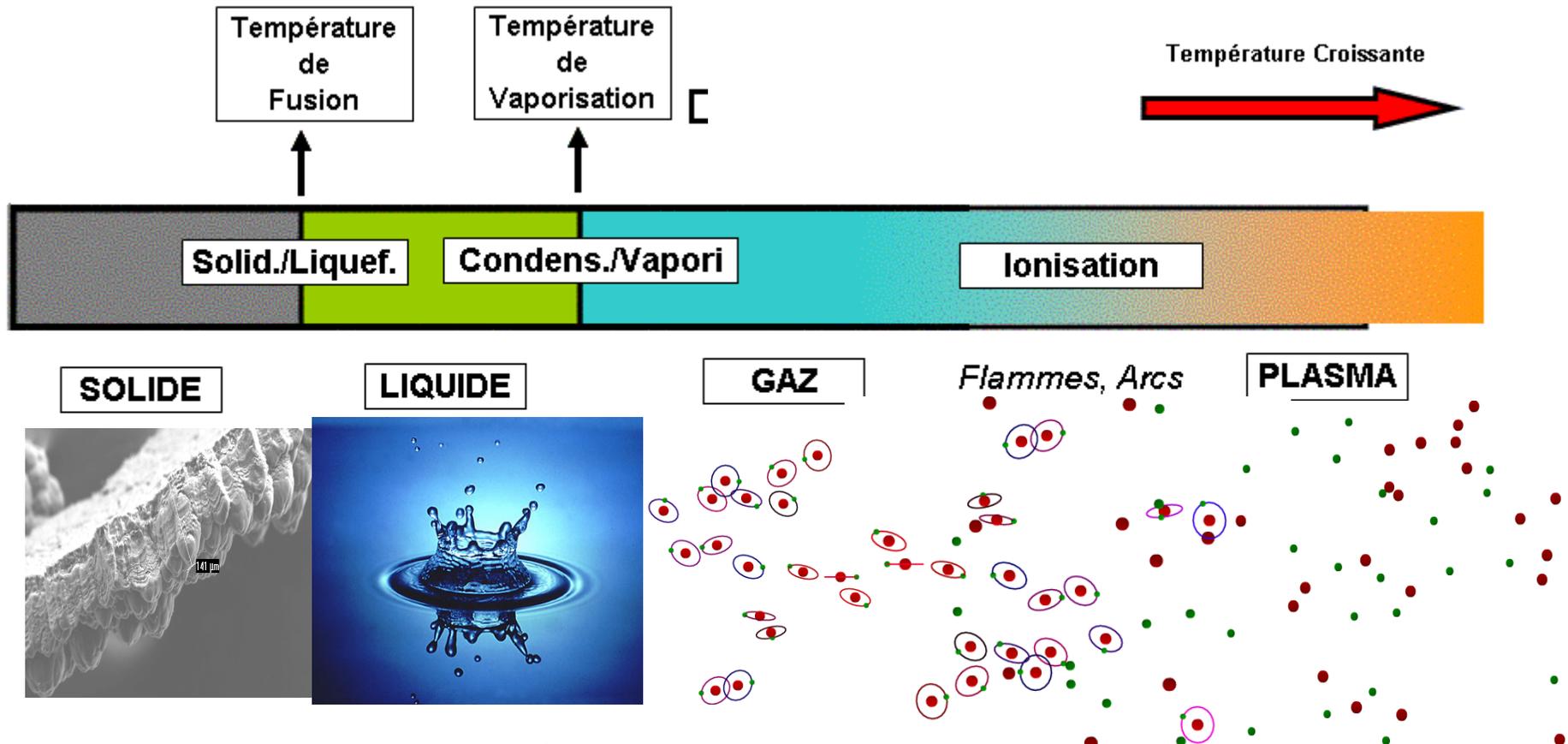
ou 200 trains de 100 wagons de Charbon



Pour disposer de 1 GW pendant une année

Quel est l'état de la matière à 200 millions de °C ?

Le PLASMA : 4ème état de la matière



La fusion se produit si la température est suffisante (car les ions se repoussent)

Des valeurs typiques :

Dans le soleil : 15 millions de ° mais c'est très lent

Pour nous : 100 millions de ° (un tube à néon : 100 000°)

Quelques exemples de plasma

99% de la matière visible

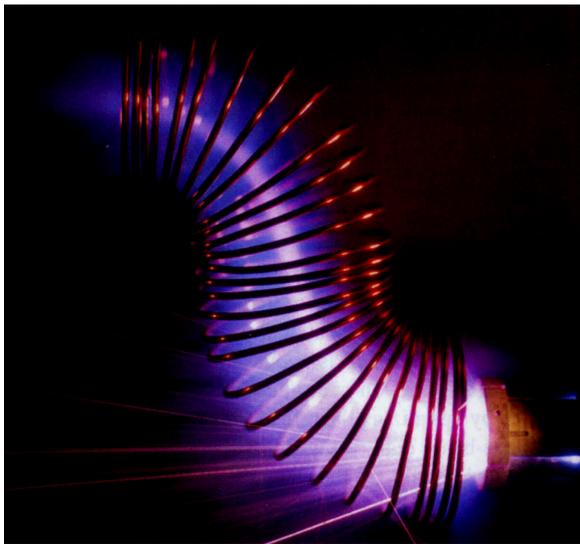


Aurore boréale

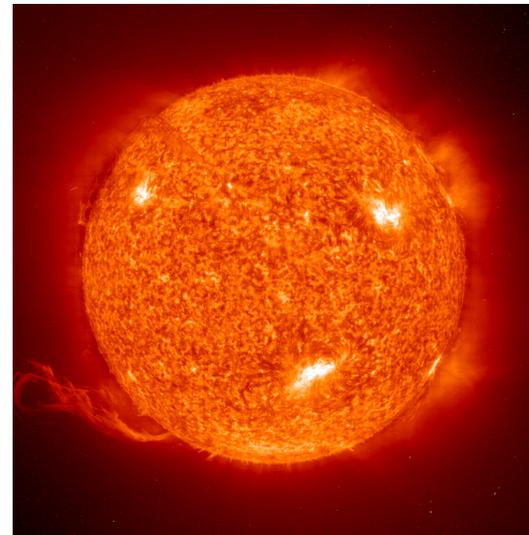
Foudres + feu



Écran plasma montrant un plasma



Plasma confiné par un champ magnétique



Plasma confiné par son propre poids

Comment obtenir la fusion sur Terre ?

Comme il faut atteindre 200 millions de °C
plus de 10 fois la température interne du soleil

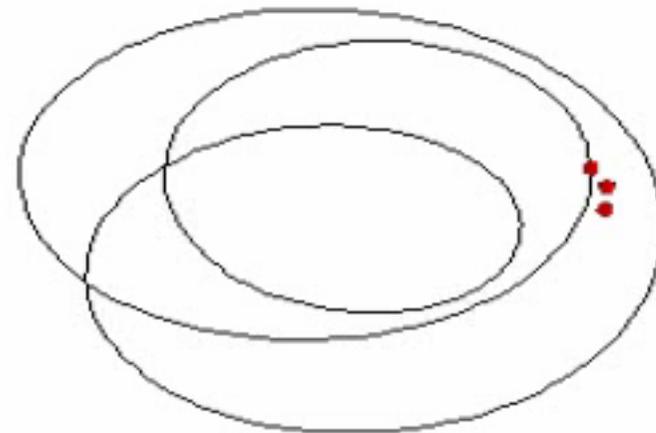
et contenir cette matière à cette température dans un volume fini

Aucun matériau ne résiste à de telle température

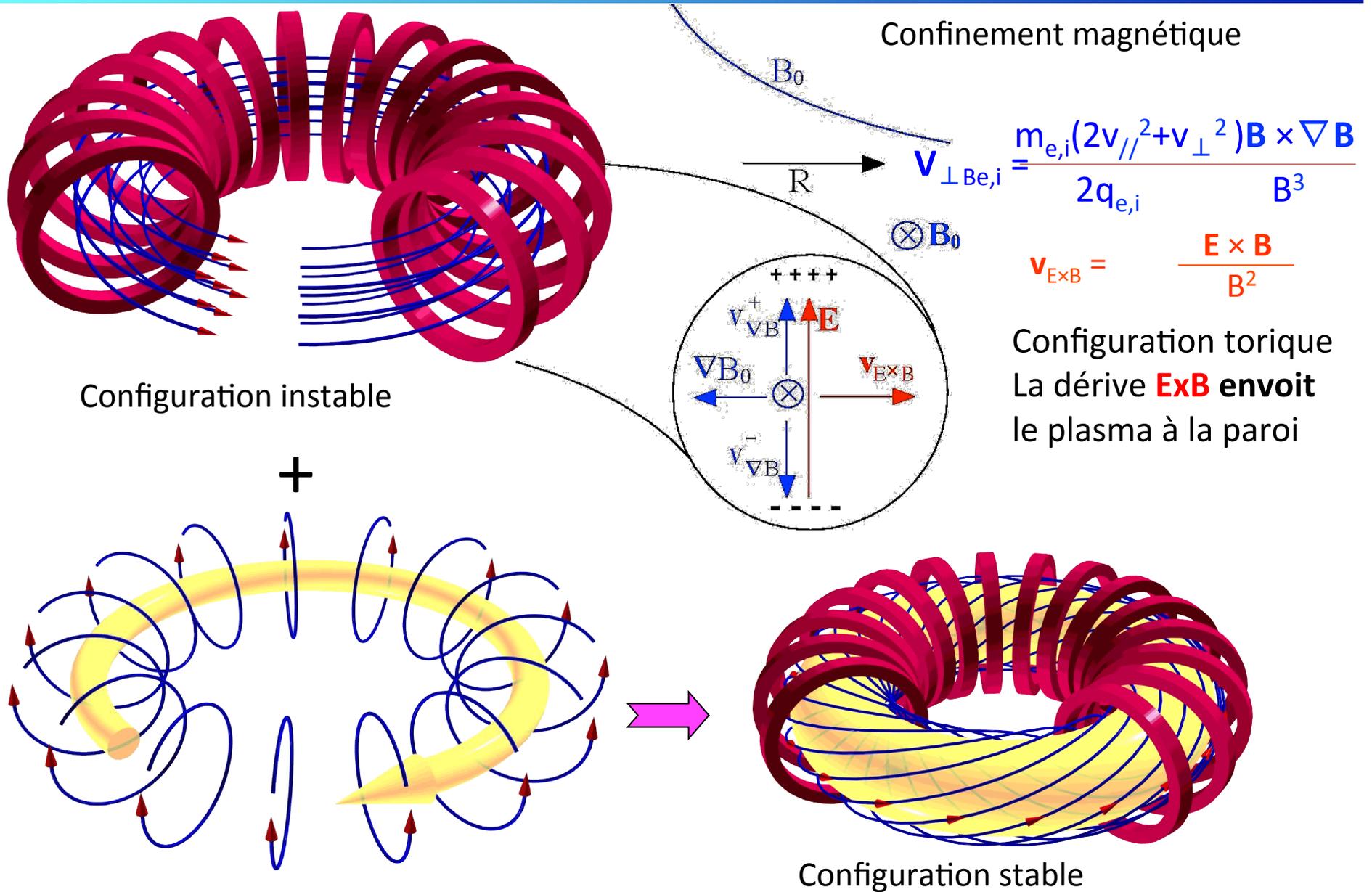
Solution → **une bouteille magnétique** où les lignes de champ se referment sur elles-mêmes.

Toutefois la pression magnétique doit être supérieure à la pression du gaz "plasma" pour le confiner.

D'où la nécessité de produire des champs magnétiques intenses ce qui est seulement possible avec des **supra-conducteurs** pour générer plus d'énergie que celle consommée pour la produire.

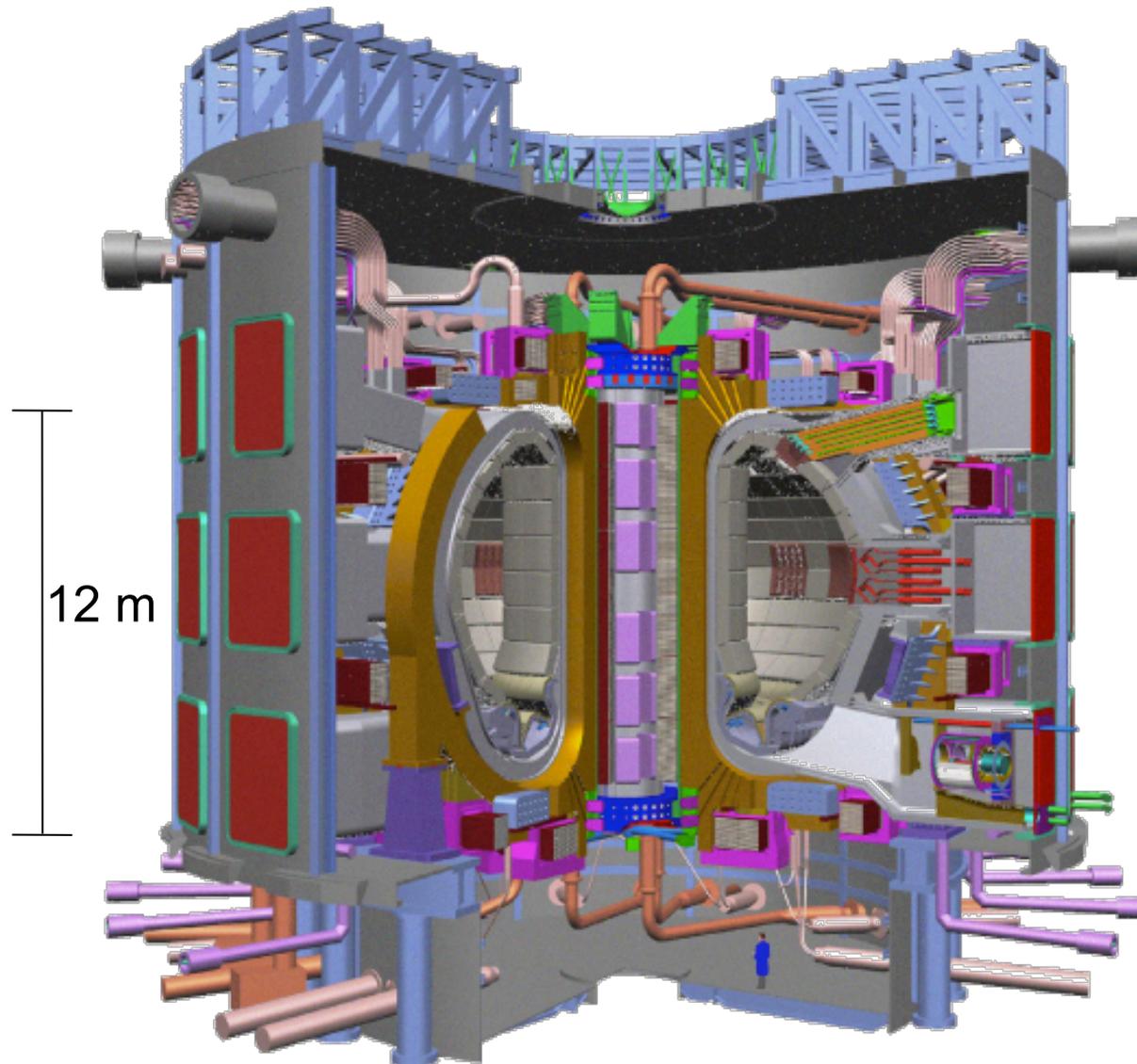


Méthodes de confinement possibles pour produire des réactions de fusion



Le projet ITER

International Thermonuclear Experimental Reactor

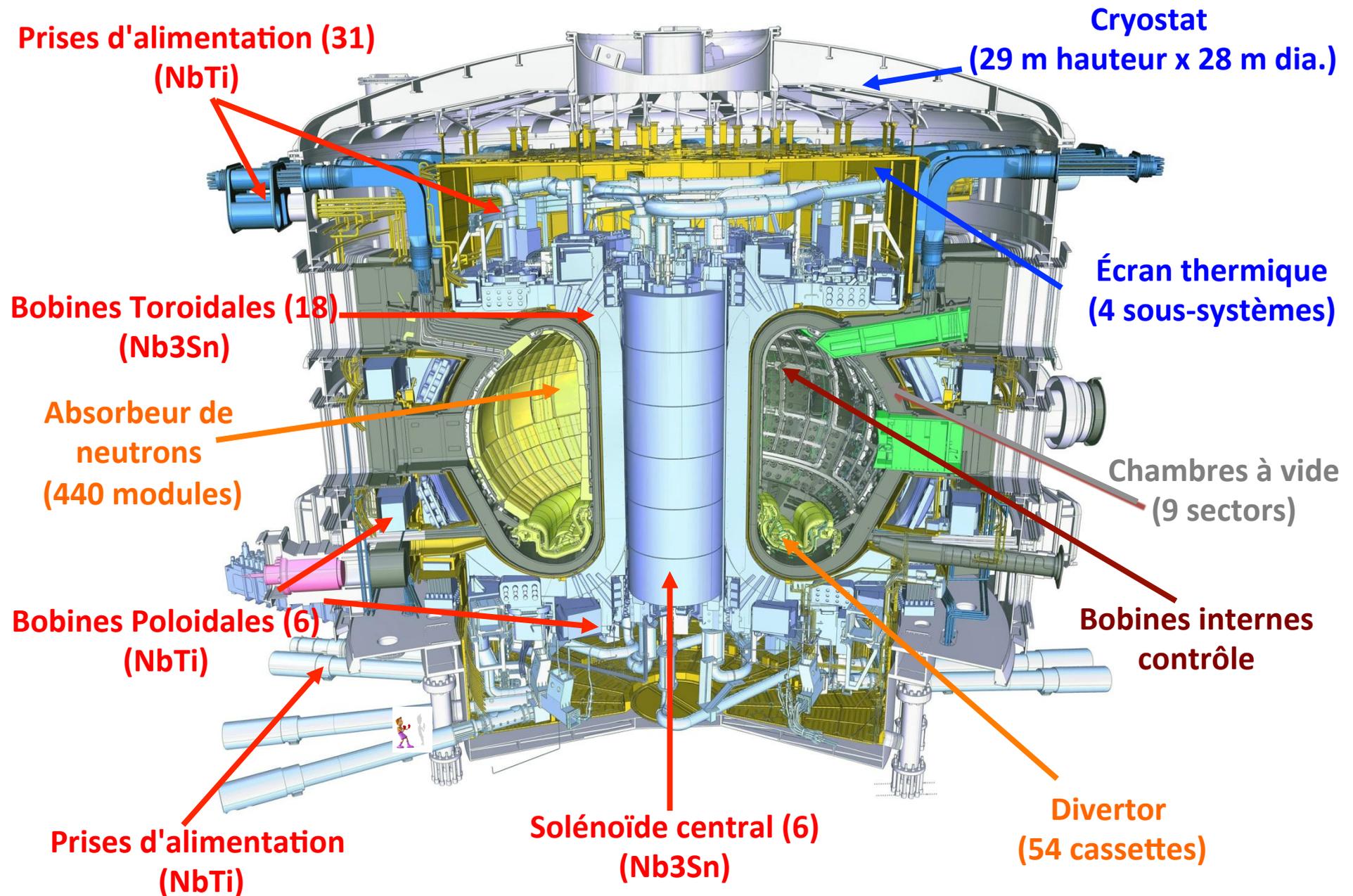


⌘ Projet International :
Europe, Chine, Russia.

⌘ 1^{er} Plan de construction
en 1999, révisé 2003, sur la
voie depuis 2004

| | |
|--------------------------|-------|
| R [m] | 6.2 |
| a [m] | 2.0 |
| κ | 1.7 |
| δ | 0.35 |
| I_p [MA] | 15.1 |
| B [T] | 5.3 |
| T_{puls} [s] | 400 |
| P_{fusion} [MW] | 400 |
| Coût ~ini | 5 G€ |
| fini | 15 G€ |

Le Tokamak ITER (500 MW produit par la Fusion)



ITER, enjeux Technologiques & de Développements

- Développement d'aimants supraconducteurs de grande taille avec des champs intenses **> 5 Tesla**

Spécifications irréalistes il y a 20 ans, réalisé maintenant (résolu)

- Développement d'un Divertor capable de recevoir des flux intenses de chaleur (**> 20MW/m²**)

Large progrès pour atteindre 20 MW/m² sur des temps longs (années) (résolu)

- Développement d'un système de Maintenance Robotisé capable de bouger **4 tonnes à ± 1mm**

Impensable pour des ingénieurs du nucléaire, maintenant possible (résolu)

Développement d'un système d'injection du mélange DT carburant des réacteurs à fusion

point clé pour ITER et le réacteur à Fusion DEMO (en cours)

Développement de systèmes de chauffage à haut rendement (**efficacité > 50%**)

- Enjeux pour les systèmes envisagés (en cours)

- Développement de diagnostics performants pour ITER (**précision < 1%, résolution 1mm**)

- Enjeux vu le changement d'échelles spatiales par rapport au Laboratoire (en cours)

Tous les points non-résolus nécessitent des développements fondamentaux en Physique des Plasmas (non-linéarité, champs intenses, modèles auto-cohérents,...)

**Un exemple de solution technologique
pour qu'ITER fonctionne**

La génération de la configuration magnétique

+

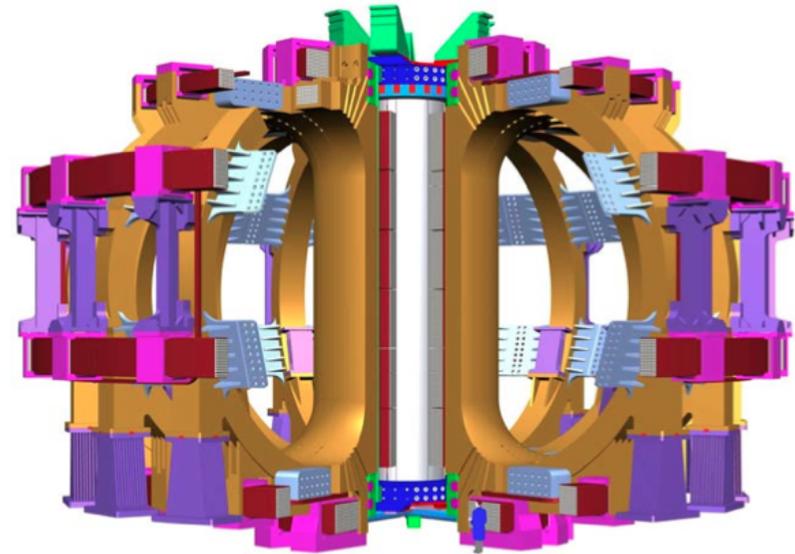
Développements en cours et retombées

ITER: le système générateur de champ magnétique

48 superconducting coils

- 18 Toroidal Field (TF) Coils
- 6 Central Solenoid (CS) Modules
- 6 Poloidal Field (PF) Coils
- 9 pairs of Correction Coils (CC)
- Current leads

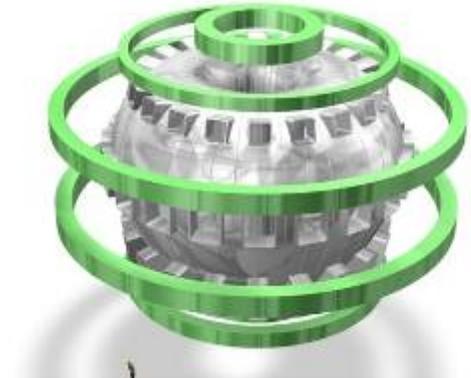
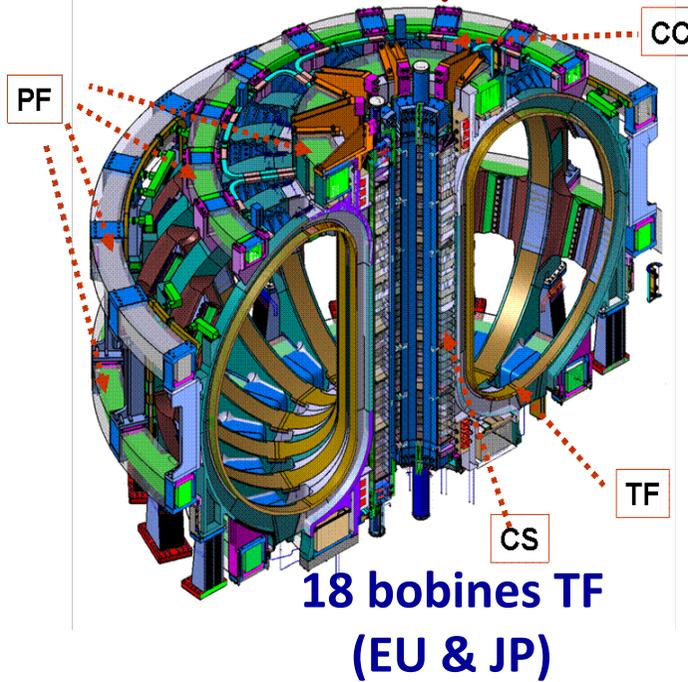
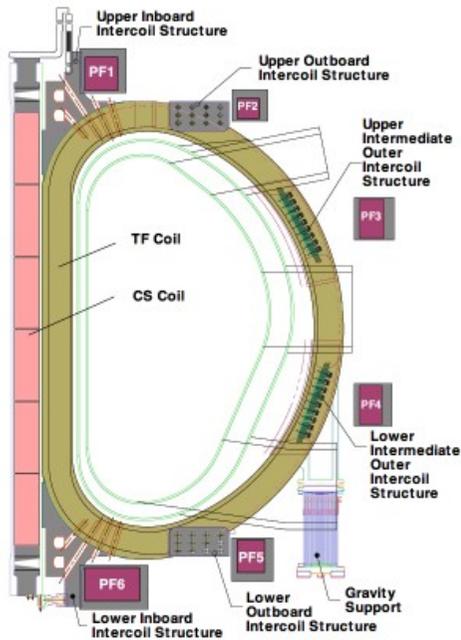
| System | Energy GJ | Peak field T | Cond. length km | Total weight t |
|-----------------------|-----------|--------------|-----------------|----------------|
| Toroidal field (TF) | 41 | 11.8 | 82.2 | 6540 |
| Central solenoid (CS) | 6.4 | 13.0 | 35.6 | 974 |
| Poloidal field (PF) | 4 | 6.0 | 61.4 | 2163 |
| Correction coils (CC) | - | 4.2 | 8.2 | 85 |



41 GJ vs. 10.5 GJ magnetic energy in the 27 km tunnel in the Large Hadron Collider at CERN

Le Système d'aimants supraconducteurs d'ITER

Coopération internationale pour sa réalisation



6 bobines PF (EU & RF)

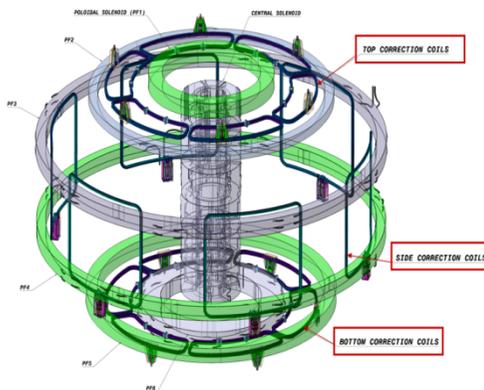
18 bobines TF (EU & JP)

Faits

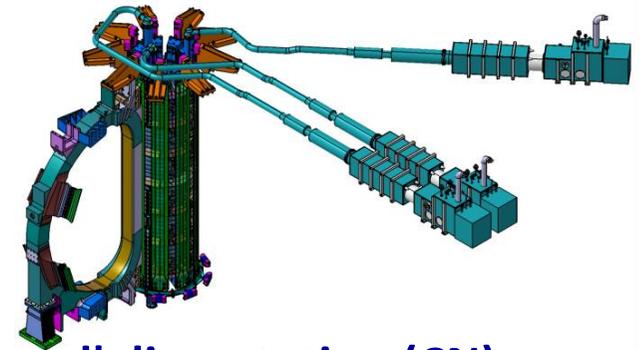
- 48 bobines supraconductrices (~9800 t)
- 11.8 T (maximum pour les bobines TF)
- 68 kA (courant max.)
- Énergie emmagasinée ~ 52 GJ

Enjeux Techniques

- Grandes dimensions
- Tolérances restreintes
- Champ magnétique élevé
- production des conducteurs et des aimants



9 Paires de bobines compensatrices (CN)



31 prises d'alimentation (CN)

CS solénoïde – 6 éléments (US)

Ordre de grandeur des énergies nécessaires



Énergie stockée dans le champ magnétique
52 GJ

5 fois celle présente dans LHC (27 km de long)
Accélérateur de particules à Genève

Représente l'énergie d'une centrale nucléaire pendant
1 minute

Correspond à l'énergie nécessaire pour élever la tour
Eiffel de ~ 2 fois sa hauteur

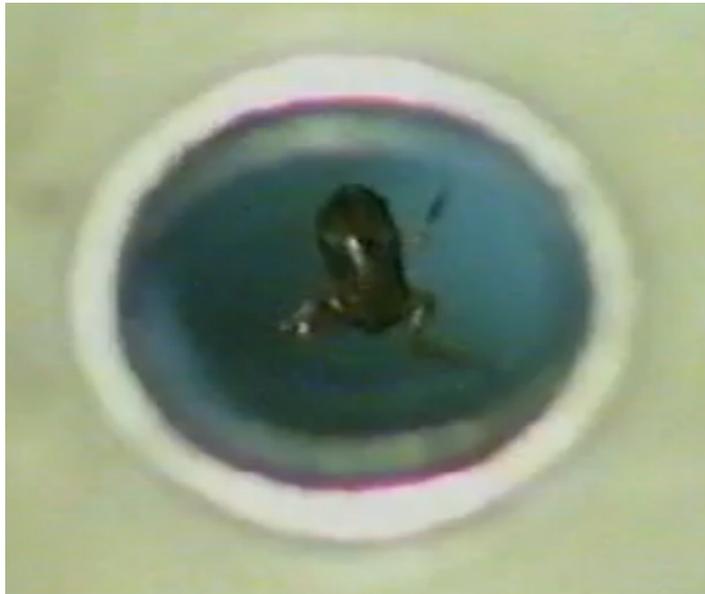
$$\vec{g} = 10 \text{ m s}^{-2}$$



$M \sim 7300 \text{ t}$

$h \sim 700 \text{ m}$

$10'$ de consommation d'énergie de la ville de Nancy



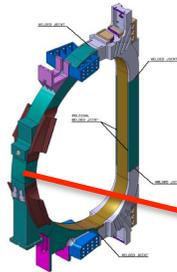
Proche des 16 T qui sont nécessaires pour qu'une grenouille lévite sous l'action d'un gradient du champ B

Idem pour une goutte d'eau par effet diamagnétique

http://www.youtube.com/watch?v=3W4QfYU2_Xo&feature=related

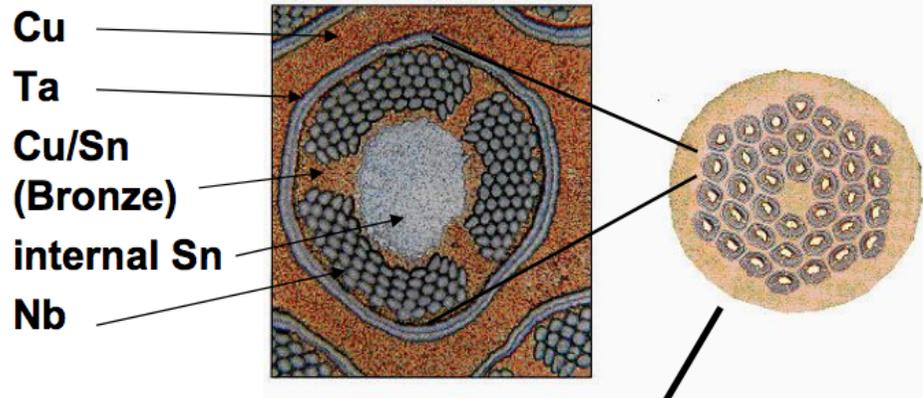


68 kA Courant équivalent à celui d'un coup de foudre



La force exercée sur la bobine est équivalente au poids de 4 tours Eiffel

ITER – Structure détaillée des conducteurs supra (bobines TF)



TFMC Strand specifications

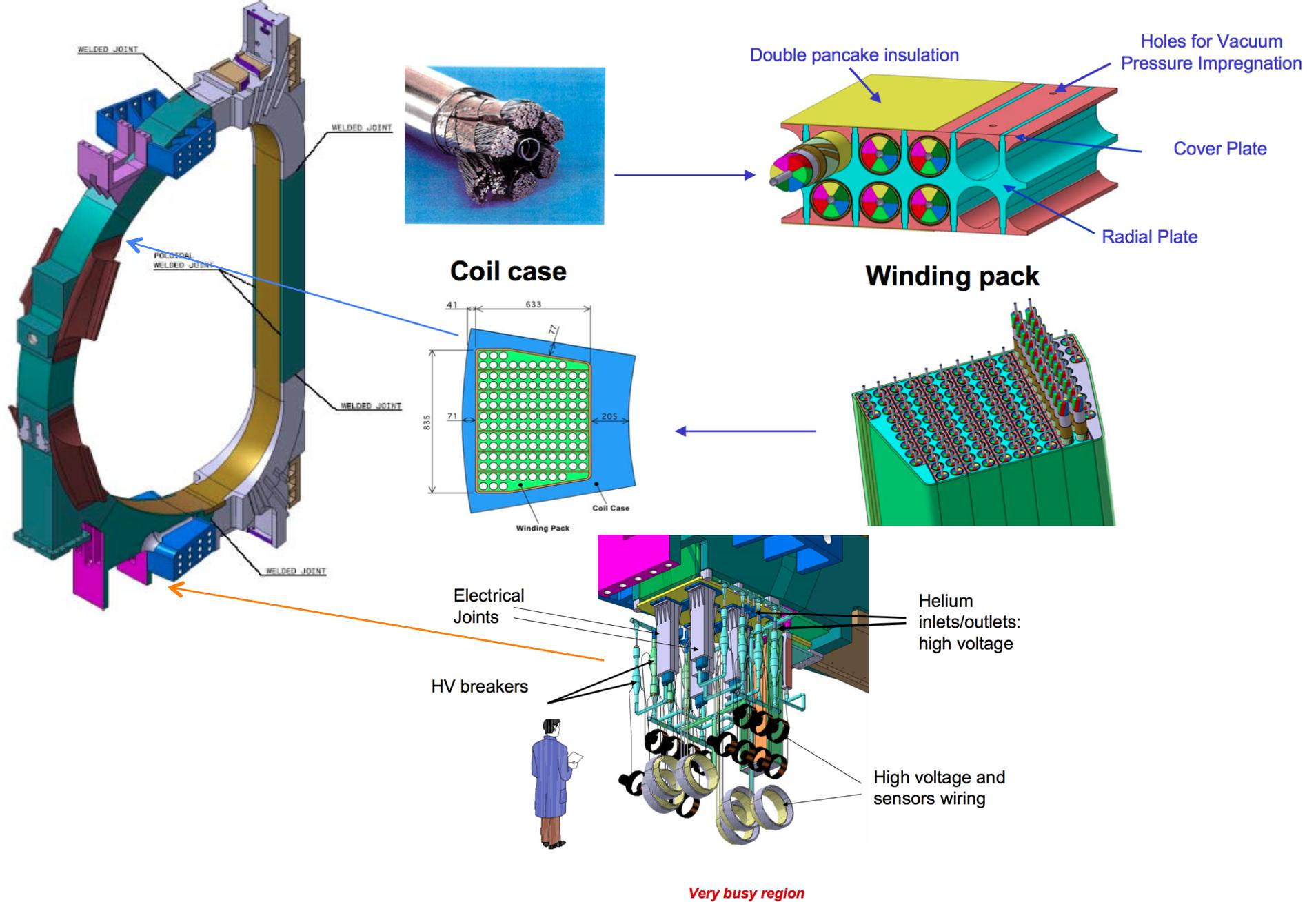
| | |
|---------------------|-------------------|
| Process | internal tin |
| Wire diameter | 0.81 mm |
| Filament diameter | 3.5 μm |
| Number of filaments | 5400 |
| Cr plating | 2 μm |
| Twist pitch | 10 mm |



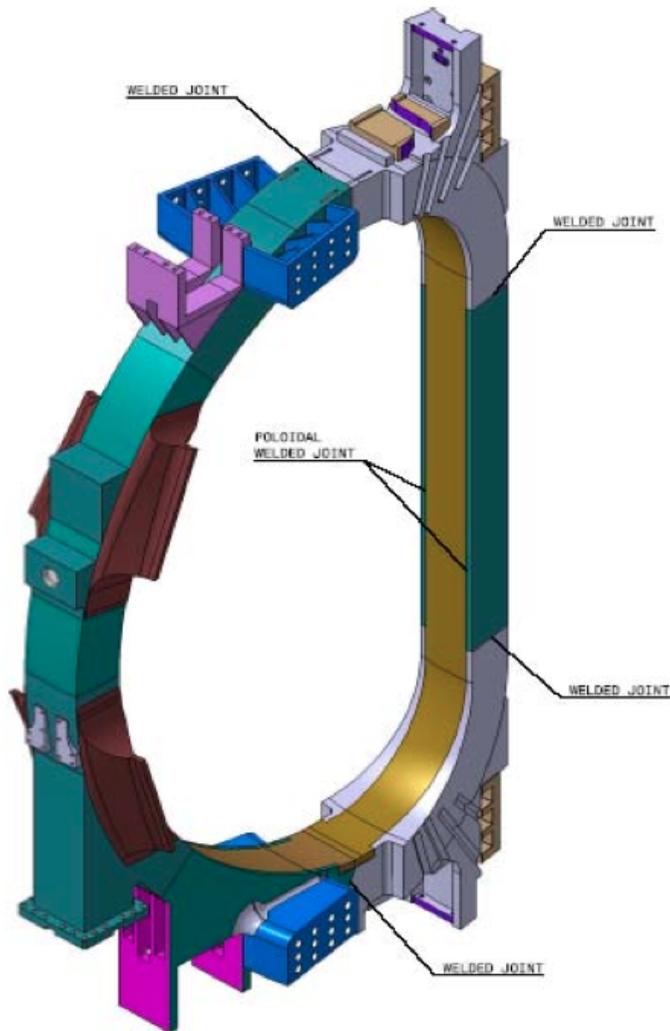
TFMC Cable specification

| | |
|------------------------------------|----------------------|
| Cable pattern | 3x3x5x4x6 |
| Corresponding twist pitches | 25/62/109/168/425 mm |
| Strands / copper strands | 720 / 360 |
| Local void fraction in the annulus | 36 % |
| Central hole inner diameter | 10 mm |
| Cable space diameter | 37.5 mm |
| Jacket thickness | 1.6 mm |

ITER Comment sont construites les bobines toroidales



ITER Bobines de champ toroidales



| | |
|-------------------------------|--------------------|
| Number of coils | 18 |
| Total stored energy (GJ) | ~ 41 |
| Max. conductor field (T) | 11.8 |
| Superconductor | Nb ₃ Sn |
| Operating current (kA) | 68 |
| Operating temperature (K) | 5 |
| Number of turns | 134 |
| Height (m) | 12.6 |
| Weight (t) | ~310 |
| Centering force per coil (MN) | ~400 |
| Discharge time constant (s) | 11 |
| Max. voltage (kV) | 7 |

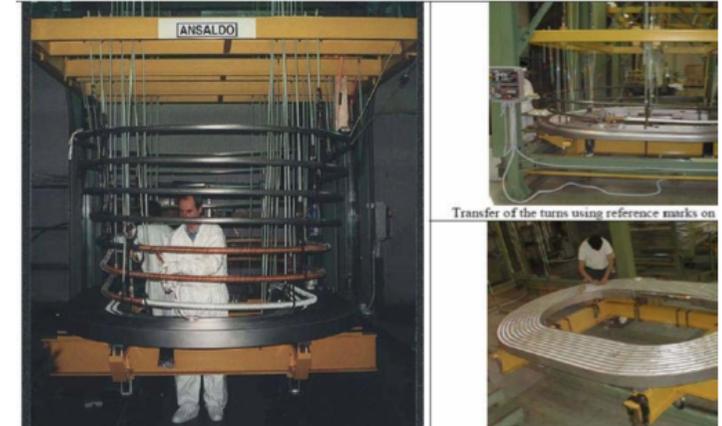
Les principales phases de construction



Wind...



React



Insulated and Transfer

Example: TFMC manufacturing phases



Welding magnet in case



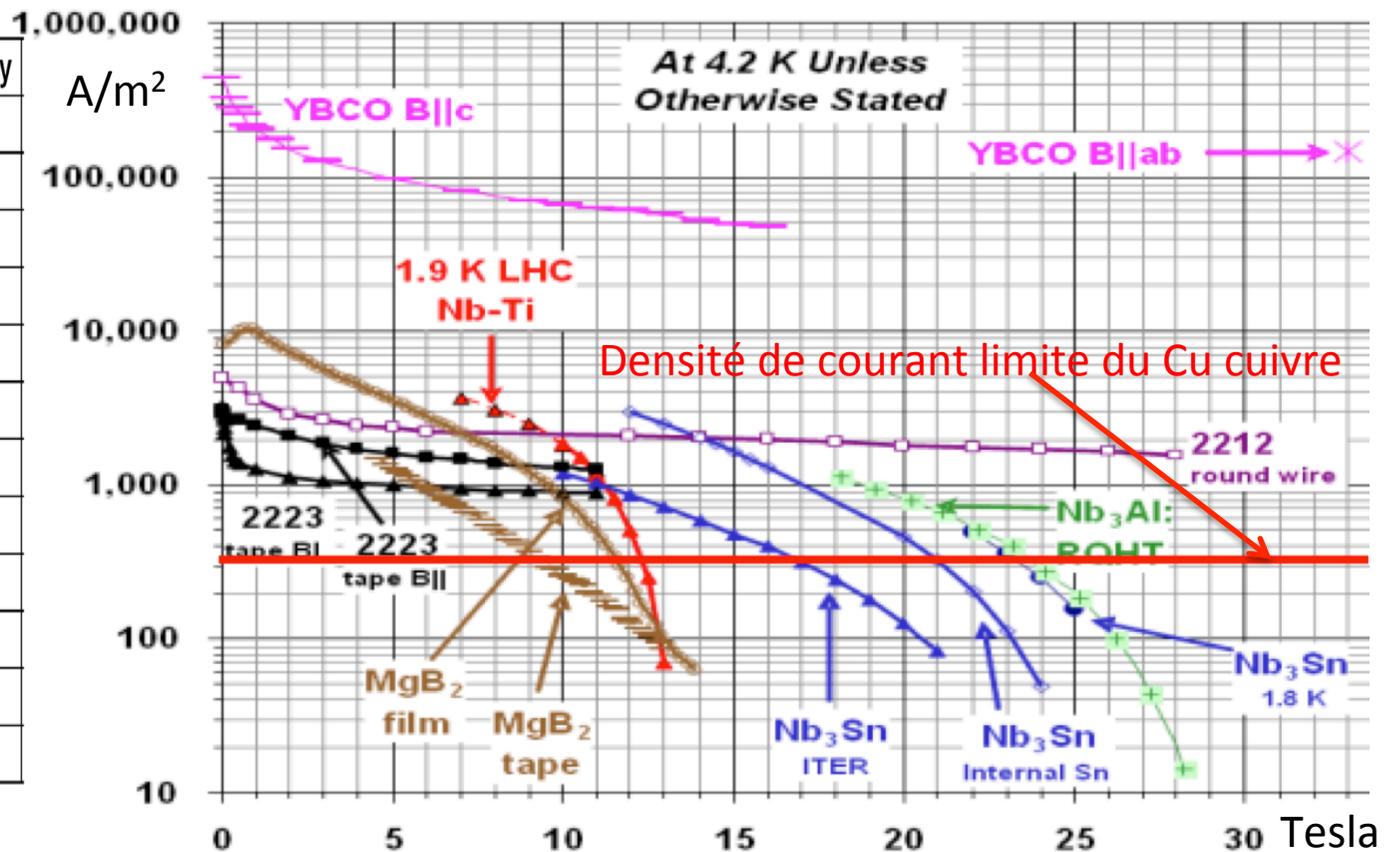
Stacking of modules



Impregnation of module

Comment choisir le bon Supraconducteurs ?

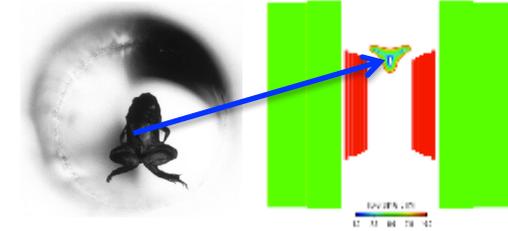
| Material | T_c / K | B_{c2} / T | Discovery |
|--------------------------|-----------|--------------|-----------|
| Hg | 4.15 | - | 1911 |
| Pb | 7.2 | - | 1913 |
| Nb | 9.2 | 0.27 | 1930 |
| NbN | 16 | 15 | 1941 |
| $Nb(C_xN_{1-x})$ | 17.86 | 27 | 1953 |
| NbZr | 12 | 8 | 1961 |
| NbTi | 9.3 | 14.5 | 1962 |
| Nb_3Sn | 18.3 | 27.9 | 1954 |
| Nb_3Al | 18.9 | 32 | 1958 |
| $Nb_3Al_{0.75}Ge_{0.25}$ | 20.5 | 41 | 1967 |
| Nb_3Ge | 23.2 | 38 | 1973 |
| $PbMo_6S_8$ | 15 | 60 | 1974 |



- NbTi : bien maîtrisé produit industriel → B_{max} 10 à 12 T
- Nb₃Sn : préparation délicate (progrès par lter), → B_{max} 23 à 25 T
- MgB₂ : découvert en 2001 et progrès rapides (IRM commercialisée en 2008) → B_{max} inconnu
- Bi-2212, Bi-2223, YBCO, (HTS) → 30 à 40 T : R&D et prototype
- Cuivre : limité par le cout d'exploitation → 35 T en continu et 100 Teslas et plus en pulsé
- Cuivre + supra (continu) → 40 à 50 T projets

retombées

Léviton magnétique de fluides



Léviton d'une grenouille dans un champ B(r) de 16 T



$$F_{magnétique} = \frac{1}{2} \chi_m \frac{\text{grad}(B^2)}{\mu_0} V$$

χ_m coef. magnétisation des matériaux

$$F_{gravité} = \rho g V$$

Grad (B²) nécessaire pour léviter →

$$G_0 = \frac{2\mu_0 \rho \|g\|}{\chi_m}$$

Pour O₂:
 Pour H₂:
 Pour l'eau :
 Pour l'Hélium :

~8T²/m
 -986T²/m
 -2800 T²/m
 -4000 T²/m

Installations existantes au SBT CEA

Station de lévitation pour l'oxygène (OLGA)



Bobine supra NbTi. d=300mm
 Volume à 1.5 % g : 4 cm³

Station de lévitation pour l'hydrogène (HYLDE)



Bobine supra NbTi 10T à 2.17K. d=90mm
 Volume à 1.5 % g : 0,1 cm³



BUS SUPRA DC

3 générations de conducteurs

- NbTi bas Tc, type ITER > 60 000 A (4-6K)
- Bi haut TC, type Long Island, Nexans - AMSC (77K)



- YBaCuO coated haut TC : AMSC, Nexans, CNRS (77K)



2 câbles en parallèle sur le bus :

- basse puissance pour interconnection énergies renouvelables, chargement flywheel, SMES haut Tc
- haute puissance pour alimentation champs intenses (haut Tc)
- test grandeur nature des 3 technologies de câbles.

Superconducting AC Cables

State-of-the-Art

Columbus



Ultera
13.2 kV, 3 kA, 200 m
Triaxial™ Design
BSCCO 2223
Energized 2006
High reliability

Figure:
Ultera

LIPA



Nexans
138 kV, 2.4 kA,
600 m
Single coaxial design
BSCCO 2223
Energized 2008

Figure:
Nexans

Gochang



LS Cable
22.9 kV, 50 MVA, 100 m
BSCCO 2223
Energized 2007
500 m field test with YBCO
in 2011

Autres projets utilisant les supraconducteurs

EPFL

FLYWHEEL (Rotation sur palier actif ou supra)
 Démonstration régulation réseau basse puissance
 Impulsionnel haute puissance (station d'essai Schneider)
Paliers supras testés Institut Néel / CRETA

SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage)
 Version haute tension, haute puissance crête
 pour alimentation champ pulsé (par exemple)
Version basse tension déjà développée à l'Institut Néel/ G2ELab



Aimants pour champs intenses
 "hybride" avec transfert
 10 MW d'un site à l'autre



Limiteurs de courant
 Transition état supra/normal dans
 YBCO ou BiSrCaCuO

Pac / stockage hydrogene
 Pile à combustible :CEA

- basse puissance, polymère
- haute température, haute puissance, oxides

Stockage de l'hydrogène dans Mg :
 - *réservoir pilote en cours de réalisation Institut Néel / CRETA*

800 kJ Bi-2212 SMES et SUPERSMES
DGA/CNRS /Nexans project (P.Tixador)



Superconducting Transformers
State-of-the-Art of Current Limiting Transformers

| Karlsruhe Institute of Technology | Nagoya University | Waukesha/SuperPower |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |
| 60 kVA Demonstrator 11kV/0.6 kv Primary copper Secondary YBCO tapes Successful test in 2010 Recovery under nominal load | 2 MVA Demonstrator 22kV/6.6 kv Primary Bi 2223 tapes Secondary YBCO tapes Successful test in 2009 Larger prototype planned | 28 MVA Prototype 69 kv Primary and secondary with YBCO tapes Test planned in 2012 |

© Copyright EPFL
 © Copyright N. Kopylov
 © Copyright Waukesha

At. Née, 8.11.2010, superconductivity for power applications is getting more and more attractive