



---

# AIMANTS SUPRACONDUCTEURS

Philippe Fazilleau  
CEA/DSM/IRFU/SACM  
[philippe.fazilleau@cea.fr](mailto:philippe.fazilleau@cea.fr)

# Plan du cours

1. La Supraconductivité
2. Les conducteurs « supra »
3. Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire : ITER
5. Aimants pour le médical : NEUROSPIN
6. Le futur...les « HTc »

# 1. **La Supraconductivité**

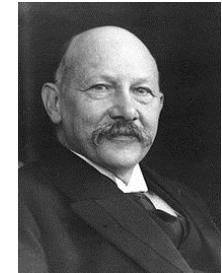
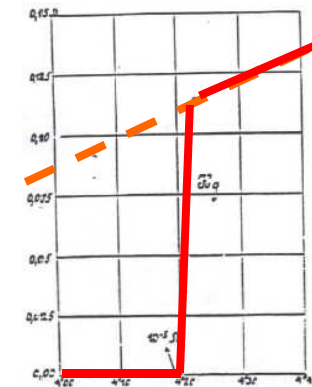
2. Les conducteurs « supra »
3. Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire : ITER
5. Aimants pour le médical : NEUROSPIN
6. Le futur...les « HTc »

# La supraconductivité

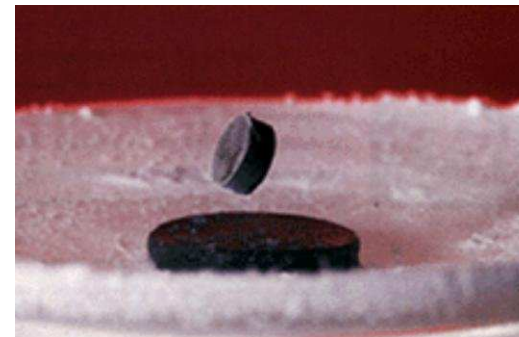
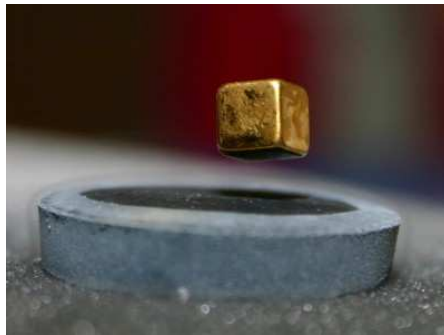
## 1) Résistivité électrique nulle ( $R=0$ )



**Gilles Holst**, étudiant de Kamerlingh Onnes publie une courte note à l'académie royale des Pays-Bas le **28 Avril 1911** : "**Sous toute réserve, la résistivité du mercure disparaît en dessous de 4 K**".



## 2) Expulse le champ magnétique ( $B=0$ ) « Effet Meissner »



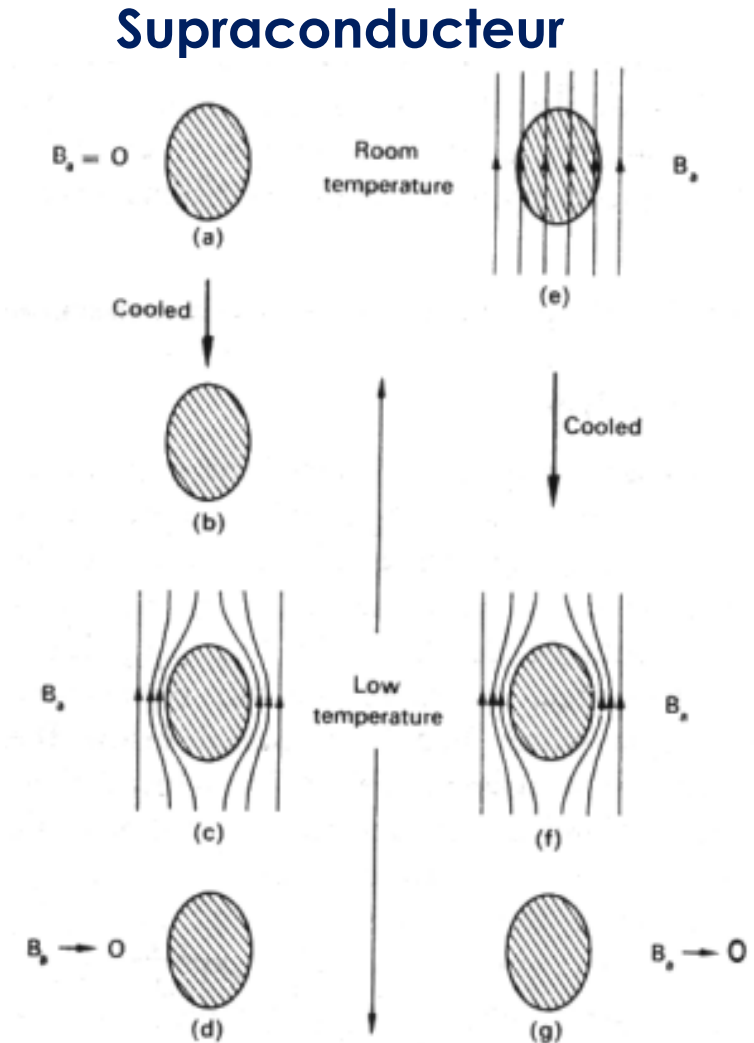
# Le diamagnétisme parfait : effet Meisner

Un supraconducteur refroidi à une température inférieure à sa **température critique** et placé dans un champ magnétique expulse totalement son flux magnétique.

L'effet se manifeste lorsque le champ magnétique est appliqué après le refroidissement.

**Mais** il en va de même lorsque l'application du champ **précède** le refroidissement

**Ce diamagnétisme parfait ne peut donc pas s'expliquer par la simple hypothèse d'une résistivité nulle.**



# Rapide désillusion

## Projet 10 T ...



Bobine en **plomb** (1913)



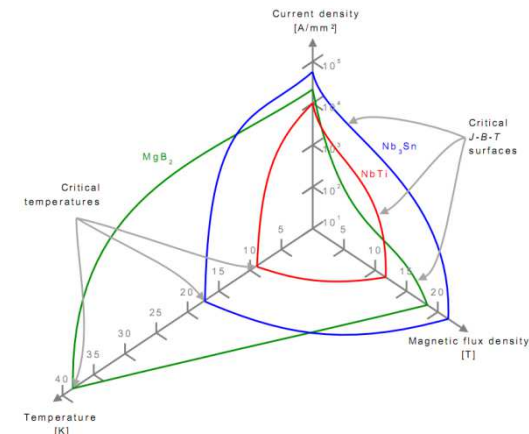
Bobine en **étain** (1913)

*De faibles champs magnétiques détruisent la supraconductivité*

⇒ Il faut attendre les **supraconducteurs de type II**

(fin des années 50, découverts en Union Soviétique)

*Apparition du phénomène de supraconductivité*  
**Surface critique**



# Surface critique

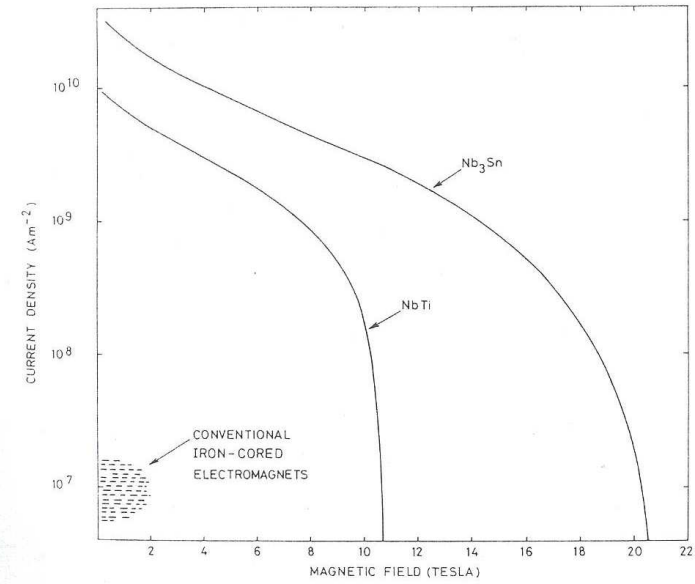
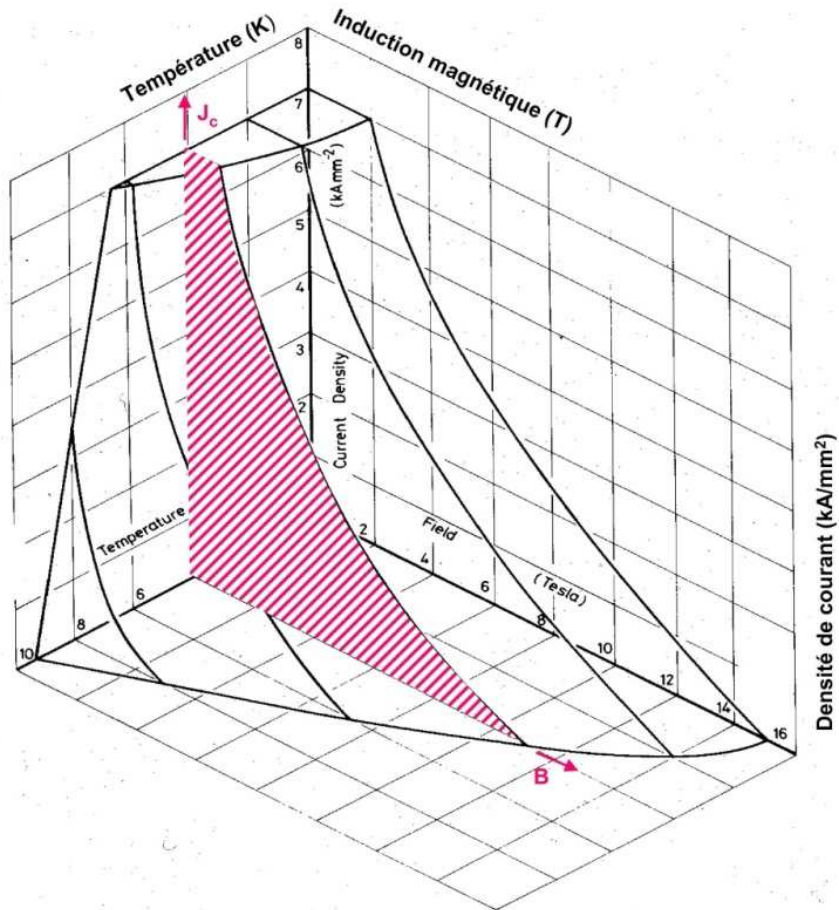
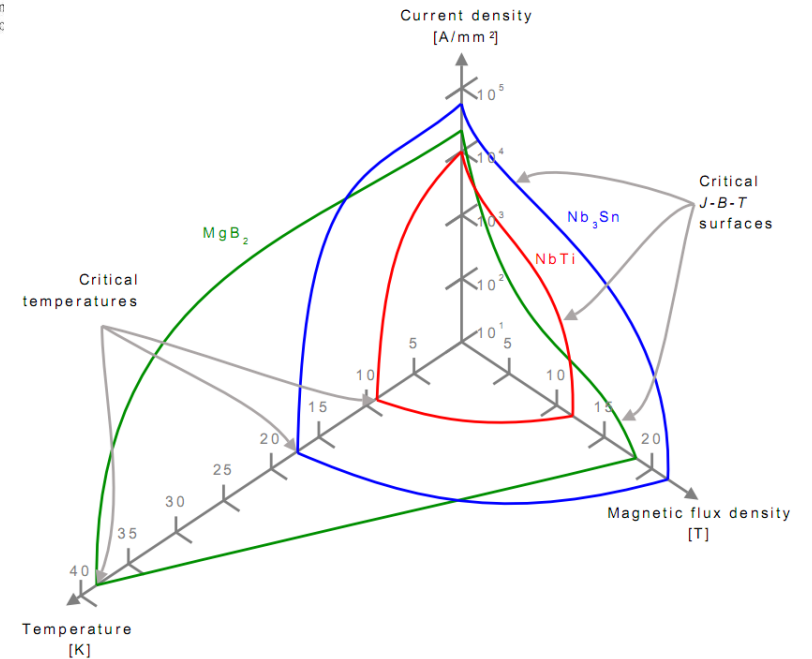
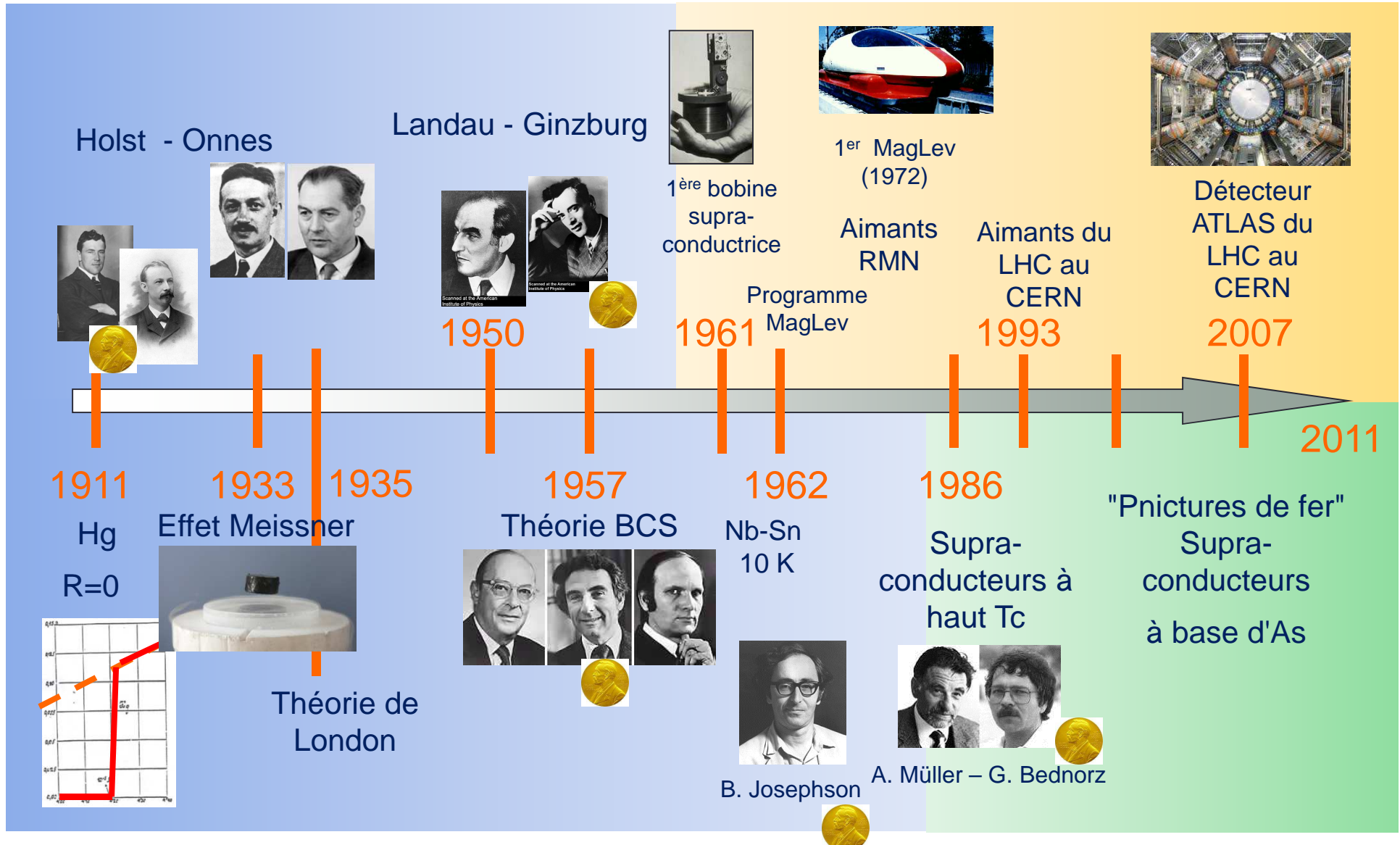


Fig. 1.2 Critical curves for the two common technological superconductors, niobium titanium and niobium tin, at a constant temperature of 4.2 K. Superconductivity prevails below the curves and normal conventic





# 100 ans de supraconductivité





# Une propriété relativement commune

H																	He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac																
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw		

■	Bons métaux	➡	Non Supraconducteurs
■	Supraconducteurs	➡	Mauvais métaux
■	Supraconducteurs sous pression		

## La théorie BCS - 1957



John Bardeen



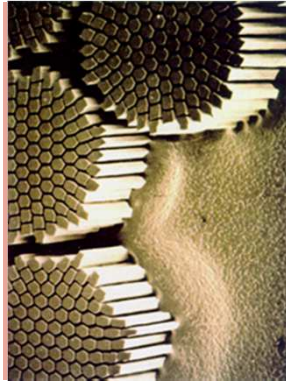
Léon Cooper



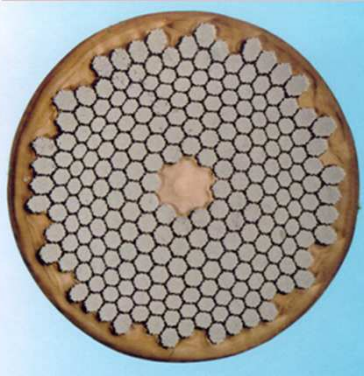
Robert Schrieffer

1. La Supraconductivité
2. **Les conducteurs « supra »**
  - ✓ **Stabilité et Protection**
  - ✓ **Contraintes Mécaniques**
  - ✓ **Cryogénie**
  - ✓ **Exemples de conducteurs**
3. Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire : ITER
5. Aimants pour le médical : NEUROSPIN
6. Le futur...les « HTc »

# Stabilité et protection

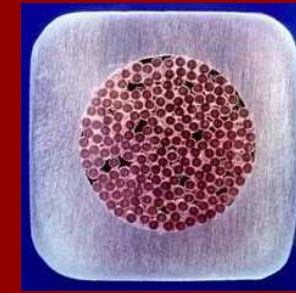
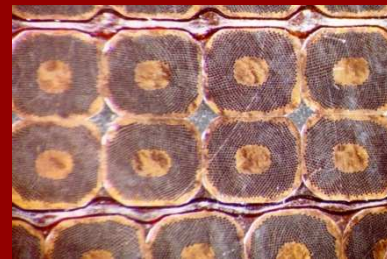
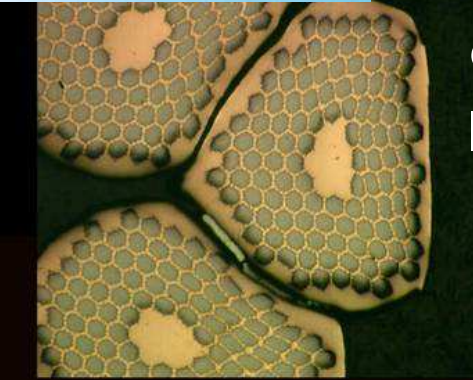


Conducteur supraconducteur à basse température critique dans un électroaimant  $\Rightarrow$  prise en compte des propriétés électriques et thermiques du matériau supraconducteur et de sa matrice normale, de celles de l'isolation, de l'environnement cryogénique (fluide réfrigérant).



- Assurer le point de fonctionnement d'un aimant compte tenu d'éventuelles perturbations : concept de *stabilité*.

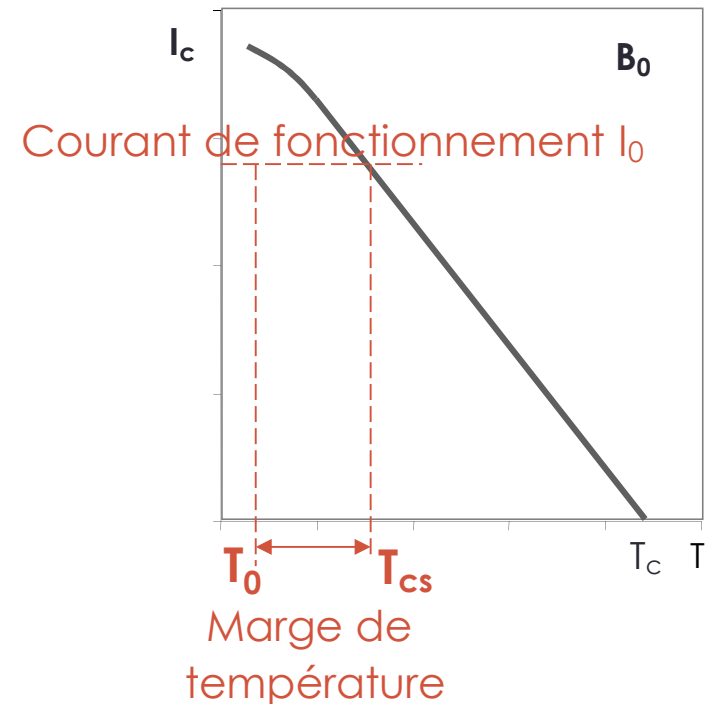
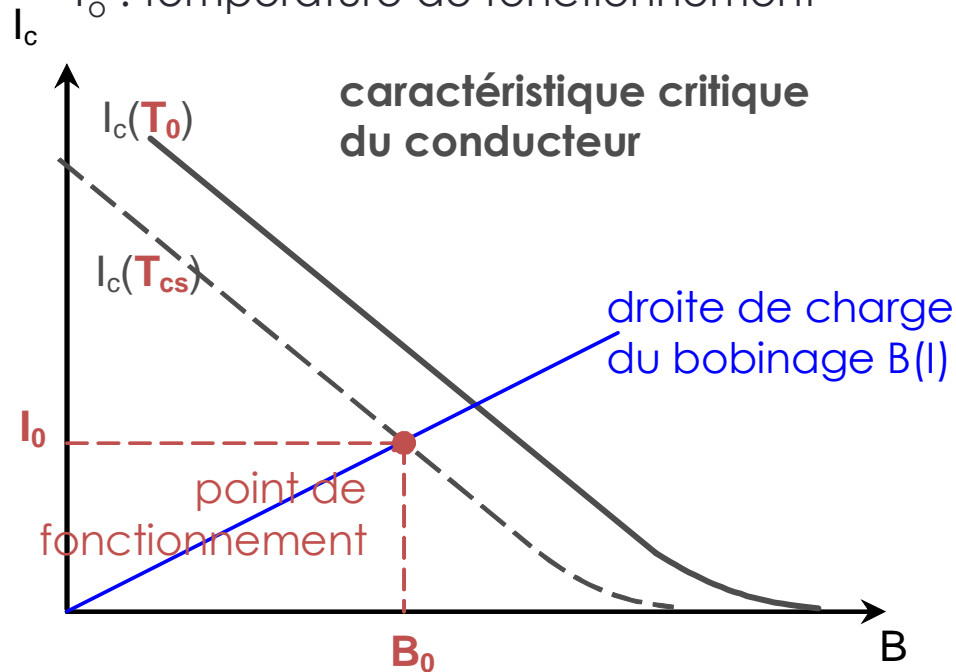
- Assurer la sécurité thermique du bobinage lors d'une transition accidentelle : *protection* de l'aimant.



# Stabilité : marge de température

$I_0$  : courant de transport dans le bobinage (courant imposé par le circuit extérieur)

$T_0$  : température de fonctionnement



## Marge de température

$\Delta T = T_{cs} - T_0$  : marge de température entre la température de transition de l'état supraconducteur vers l'état normal,  $T_{cs}$ , et la température de fonctionnement,  $T_0$ .

# Stabilité : marge enthalpique

Marge enthalpique du conducteur

Énergie volumique minimale nécessaire pour faire transiter le conducteur :

$$\Delta H = H(T_{CS}) - H(T_0) = \int_{T_0}^{T_{CS}} C_{\text{conducteur}} dT$$

Quelques ordres de grandeur

Composite NbTi – Cu avec Cu/NbTi = 2

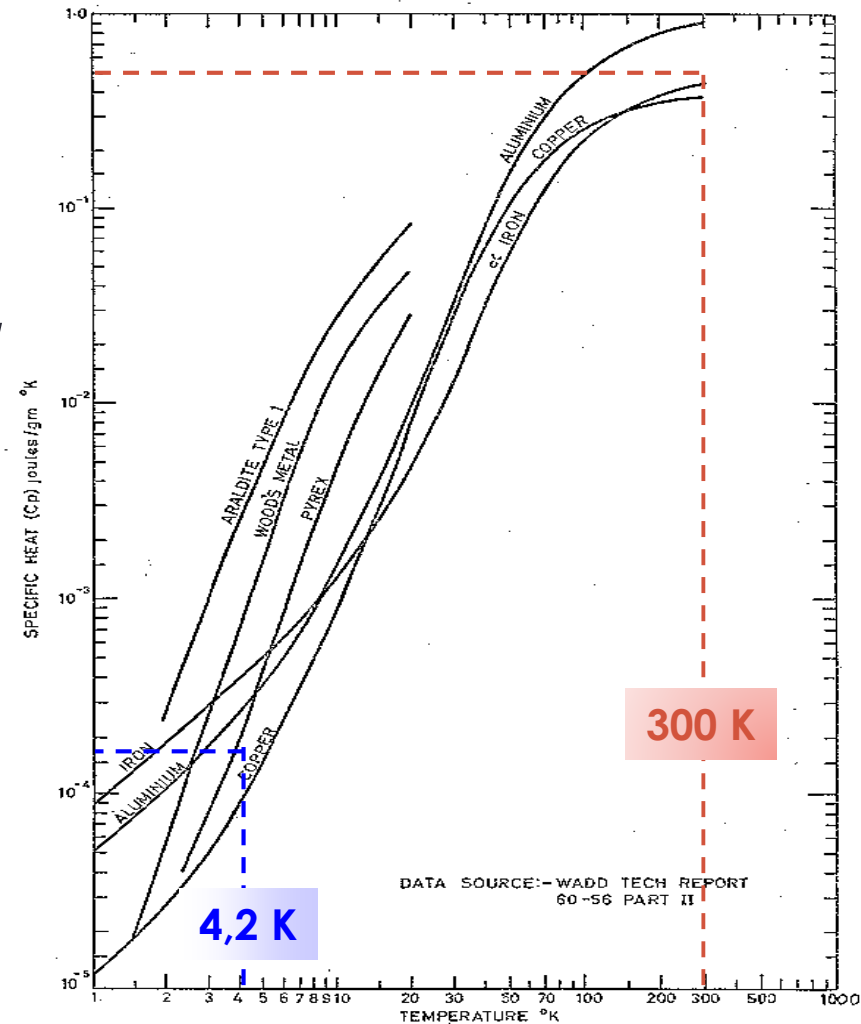
$T_0 = 4,5 \text{ K}$  et  $\Delta T = 1,2 \text{ K}$  :  $\Delta H = 3\,300 \text{ J/m}^3$

$T_0 = 1,8 \text{ K}$  et  $\Delta T = 1,2 \text{ K}$  :  $\Delta H = 500 \text{ J/m}^3$

$\Delta H \approx 1000 \text{ J/m}^3$  (énergie très faible : quelques  $\mu\text{J/mm}^3$ )  $\Rightarrow$  les aimants supraconducteurs sont très sensibles aux perturbations mécaniques comme des mouvements de conducteurs

Marge de stabilité ?

Un supraconducteur composite, soumis à une perturbation d'énergie supérieure à  $\Delta H$ , peut-il transiter et recouvrer spontanément son état supraconducteur ?



# Stabilité : perturbations

## Stabilité du point de fonctionnement

S'il transite accidentellement, le conducteur doit pouvoir récupérer spontanément son état supraconducteur.

Aide : son environnement (conducteurs voisins froids, fluide réfrigérant).

## Deux classes de perturbations

Spectre des perturbations (espace et temps)			
	Distribuées et quasi-stationnaires ( $W/m^3$ )	Localisées et stationnaires (W)	Localisées et transitoires (J)
Exemples	Pertes AC Flux neutronique Pertes faisceau	Conduction par les supports Jonctions électriques de conducteurs	Sauts de flux Mouvements de conducteurs Fissures de résine
Dissipations d'énergie prévisibles : prises en compte lors de la conception (dans la marge de température)		Perturbations accidentelles (objets des études de stabilité)	

# Stabilité : trois figures de mérite

Trois grandeurs permettent d'évaluer  
**le niveau de stabilité d'un aimant :**

- ✓ La **marge en température** du conducteur,  $\Delta T$
- ✓ La **MPZ** (minimum propagating zone) qui donne une idée des **lois d'échelle** générales et des facteurs qui doivent être optimisés lors d'un dimensionnement. Elle permet de comparer **les performances d'un supraconducteur** dans un aimant.
- ✓ La **MQE** (minimum quench energy), **quantité minimale de chaleur**, déposée instantanément en un point, nécessaire pour provoquer un quench ; elle est utile pour un calcul prédictif du comportement thermique d'un aimant donné.

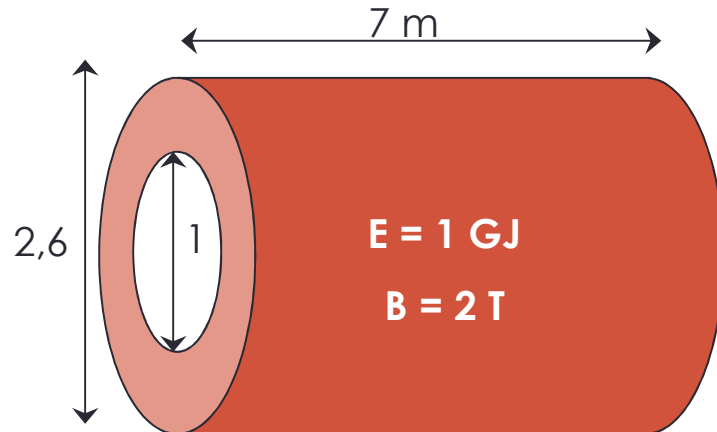
***Plus ces valeurs sont élevées, moins l'aimant transite facilement.***



# Protection des aimants supraconducteurs

*Pourquoi doit-on protéger un aimant supraconducteur ?*

**Aimant résistif en cuivre**



$$j_{Cu} = 2 \text{ A/mm}^2$$

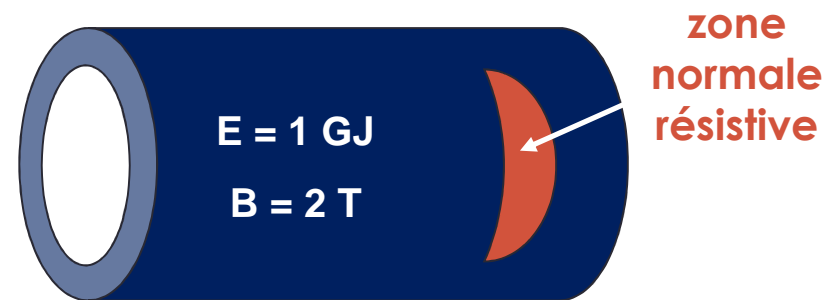
$$V_{tot} = \pi (1,3^2 - 0,5^2) 7 = 32 \text{ m}^3$$

$$\text{Dissipation : } E/V = 32 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$$



$$T = 65 \text{ K}$$

**Aimant supraconducteur**



$$j_{bob} = j_{Cu} \times 10$$

$$\Rightarrow \text{épaisseur} / 10$$

$$\Rightarrow V_{tot} = 1,9 \text{ m}^3$$

$$E = 1 \text{ GJ} = 10^9 \text{ J}$$

Conversion de l'énergie  
électromagnétique en chaleur dans la  
zone résistive

$$V_{rés} = V_{tot} / 10 \Rightarrow E / V_{rés} = 5 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3$$



$$T = 1400 \text{ K}$$


# Protection en cas de *quench*

**Transition irréversible** d'une zone de conducteur de l'état supraconducteur à l'état normal (résistif)  
 dissipation de l'énergie électromagnétique dans une **fraction du volume** total du bobinage

Moyen pour assurer la sécurité thermique du bobinage :  
 décharger l'énergie **dans tout le volume** ou à **l'extérieur**



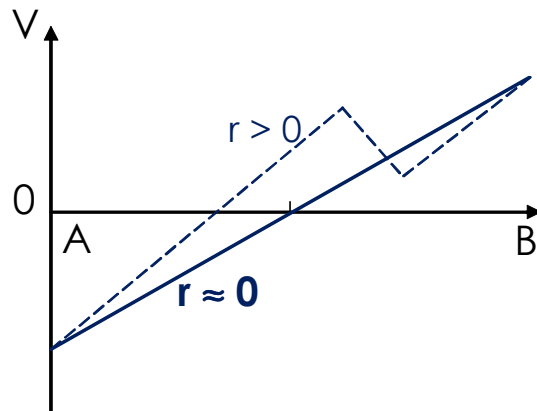
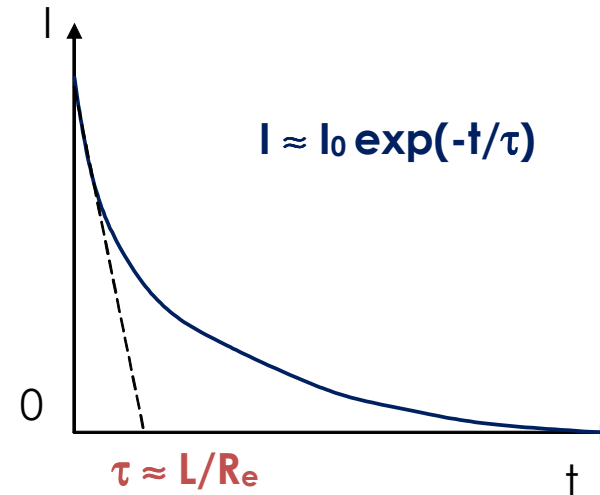
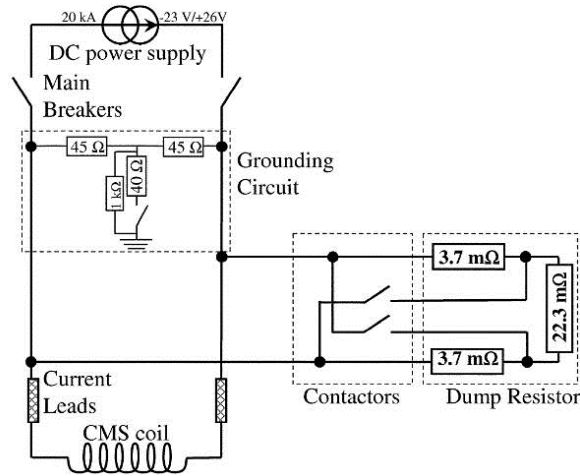
**inconvenient : fortes pertes cryogéniques**



**inconvenient : décharge rapide dans résistance extérieure**  
 ⇒ **forte tension aux bornes du bobinage**

**La protection d'un aimant relève de problèmes thermiques et électriques**

# Schéma typique de protection (CMS)



$r$  : résistance de la zone transitée

En fin de décharge, toute l'énergie électromagnétique initiale est dégradée en chaleur dans la résistance  $R_{\text{dump}}$  (et dans  $r$ ) :

$$\frac{1}{2} L I_0^2 = \int_0^{\infty} (R_e + r) I^2 dt$$

1. La Supraconductivité
2. **Les conducteurs « supra »**
  - ✓ Stabilité et Protection
  - ✓ **Contraintes Mécaniques**
  - ✓ Cryogénie
  - ✓ Exemples de conducteurs
3. Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire : ITER
5. Aimants pour le médical : NEUROSPIN
6. Le futur...les « HTc »

# Contraintes mécaniques

$$\sigma \sim JBR$$

- ✓ Reprise des efforts par le bobinage lui-même ou par une structure extérieure
- ✓ Limiter les concentrations de contraintes pour ne pas endommager l'isolation électrique

Les conducteurs ne doivent pas bouger, pour conserver leur forme (qualité du champ) et pour éviter les dissipations, sous de très importantes forces de Laplace.

 *Contrainte d'une boucle de rayon 200 mm, portant*

*150 A/mm<sup>2</sup>, dans 10 T:*

$$\sigma_q = J B R = 1.5 \cdot 10^8 \cdot 10 \cdot 0.2 = 300 \text{ MPa}$$

1. La Supraconductivité
2. **Les conducteurs « supra »**
  - ✓ Stabilité et Protection
  - ✓ Contraintes Mécaniques
  - ✓ **Cryogénie**
  - ✓ Exemples de conducteurs
3. Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire : ITER
5. Aimants pour le médical : NEUROSPIN
6. Le futur...les « HTc »

# Contraintes cryogéniques

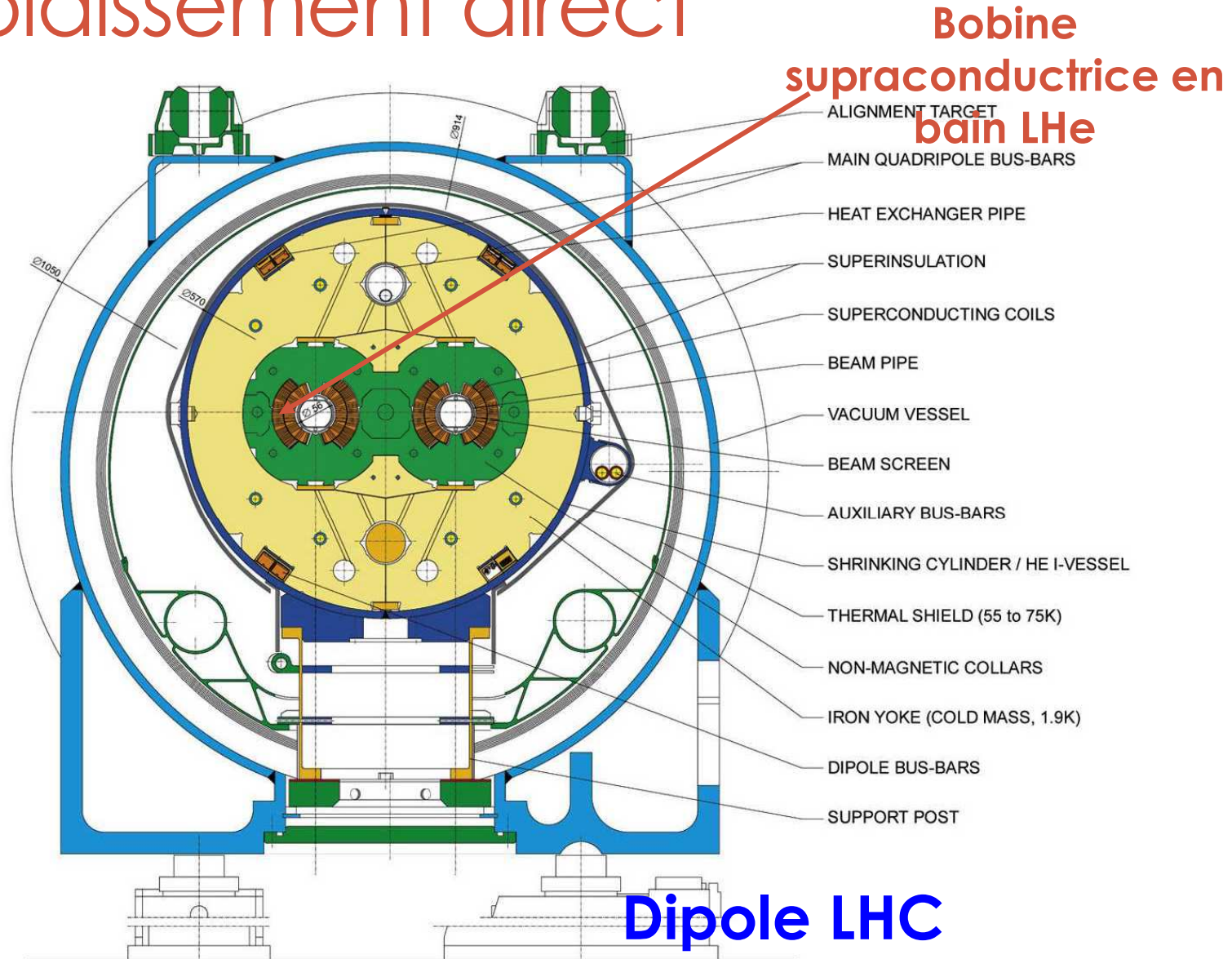
**Assurer un « bon refroidissement » à la température de l'hélium**

$$Q(rJ^2, \dots) < h P/A (T_c - T_{\text{bain}})$$

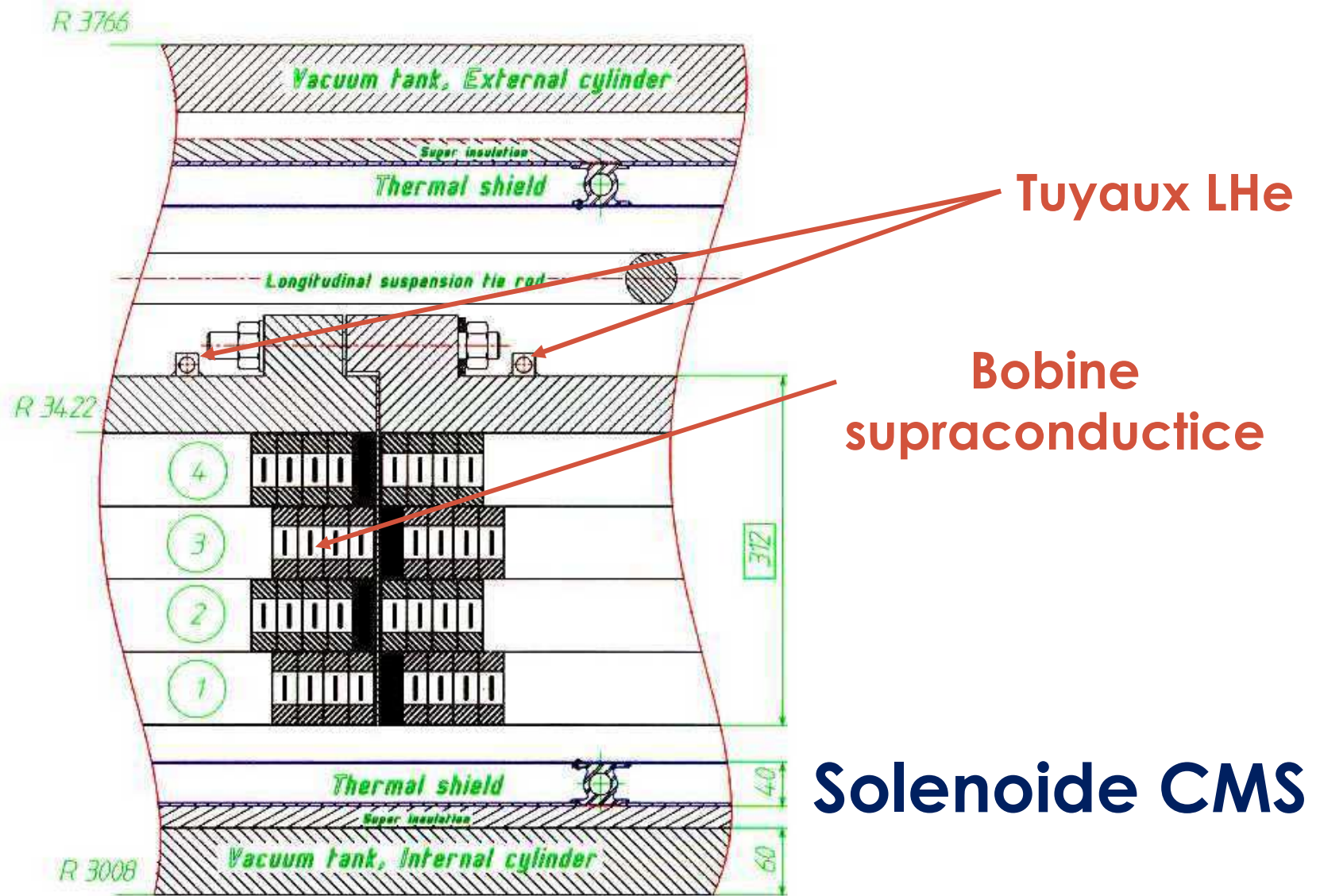
- ✓ Refroidissement direct dans un bain
- ✓ Refroidissement indirect par conduction à travers le bobinage
- ✓ Circulation forcée d'hélium dans le conducteur



# Refroidissement direct



# Refroidissement indirect

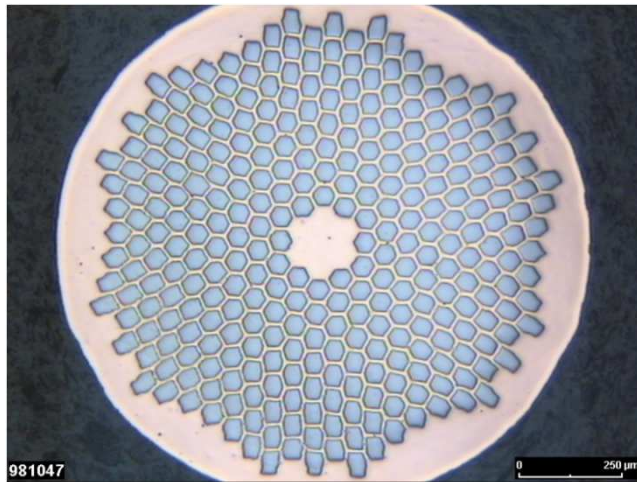


**Solenoid CMS**

1. La Supraconductivité
2. **Les conducteurs « supra »**
  - ✓ Stabilité et Protection
  - ✓ Contraintes Mécaniques
  - ✓ Cryogénie
  - ✓ **Exemples de conducteurs**
3. Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire : ITER
5. Aimants pour le médical : NEUROSPIN
6. Le futur...les « HTc »

# Brins et câbles

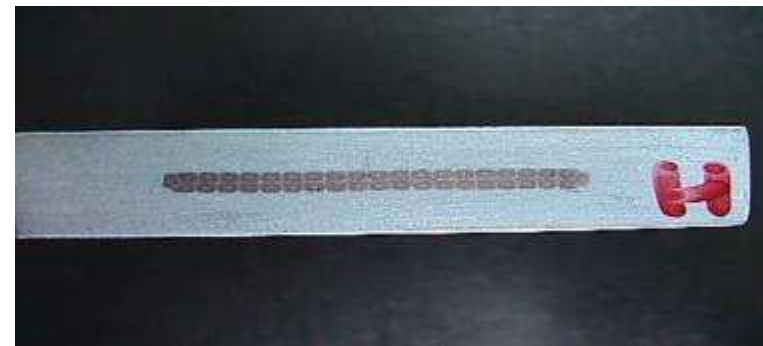
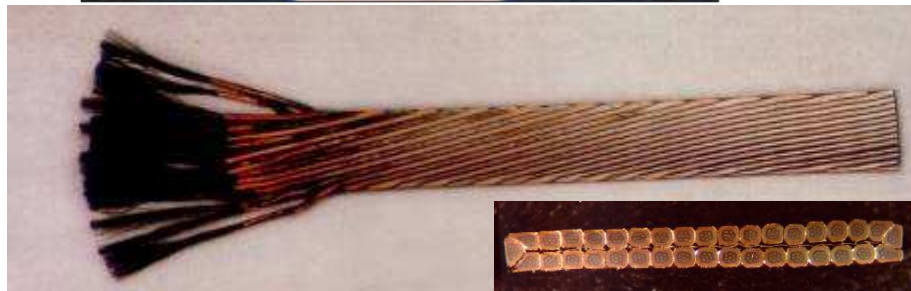
Les supraconducteurs sont formés de **brins multifilamentaires**, où des centaines à milliers de filaments sont enrobés dans une matrice stabilisante, twistés (5-50 mm) pour assurer la stabilité en champ variable et champ propre.



← Brin Atlas Cu/NbTi

Câble Rutherford pour  
 ↓ le dipole LHC

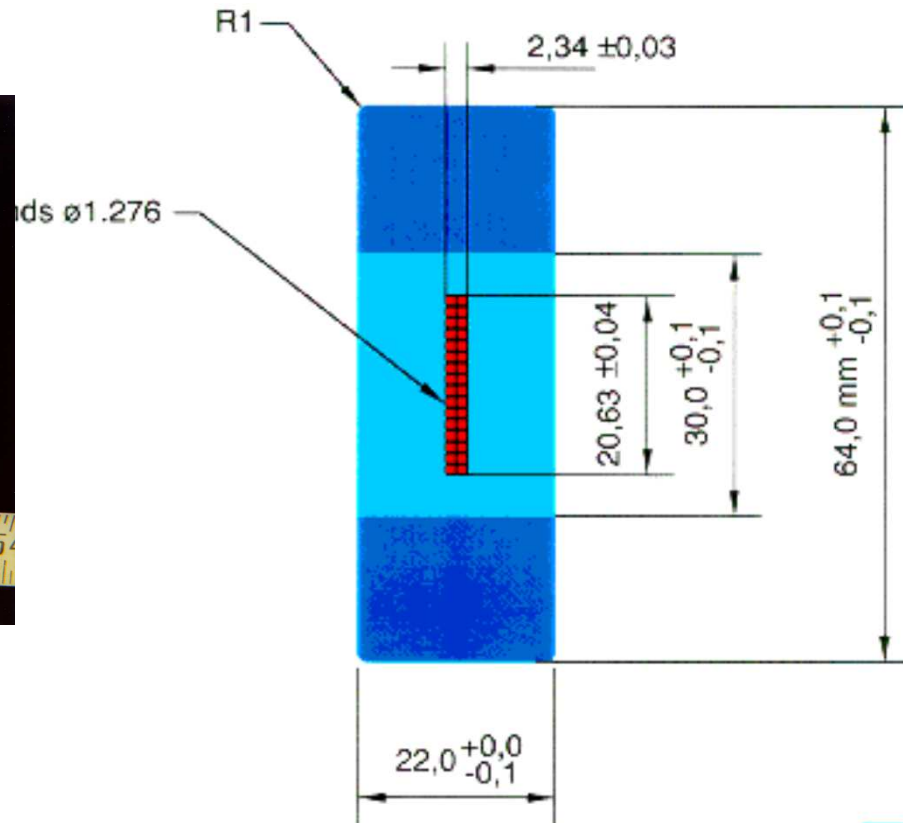
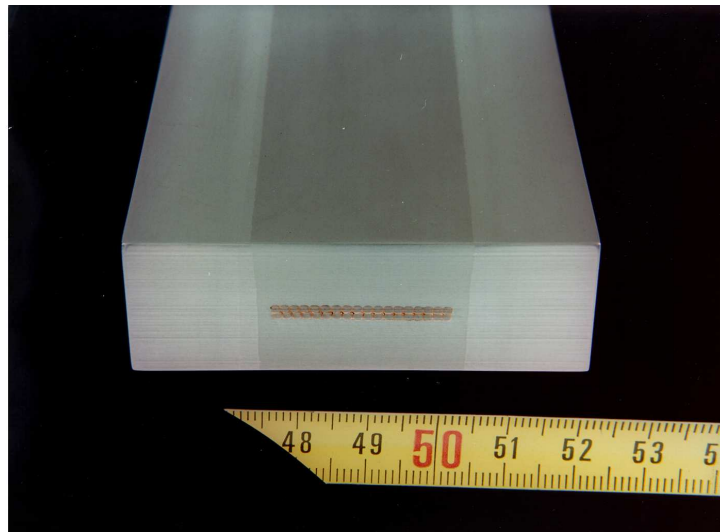
conducteur ATLAS (Rutherford  
 coextr. with pure Al) ↓





# Exemple de conducteur pour détecteurs : CMS

CMS Solénoïd  
CEA Saclay 30/06/99  
Conducteur  
K 1100/001



Conductor Ic at 4.2 K and 5 Tesla 55.6 kA

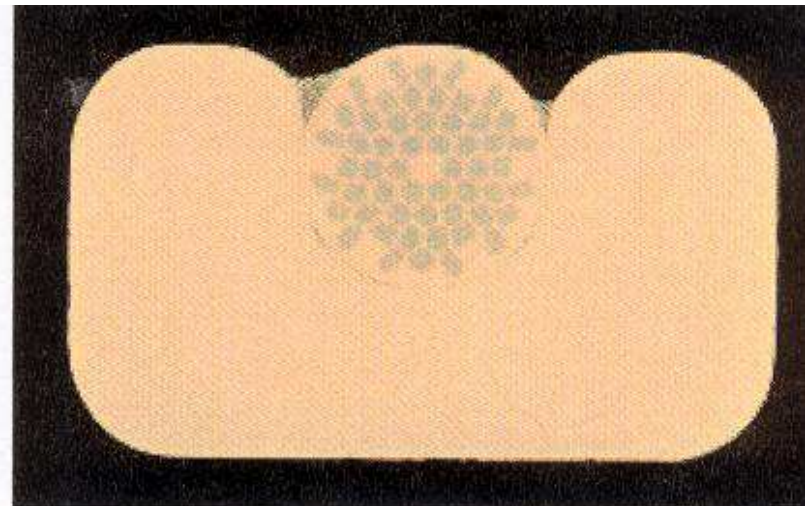
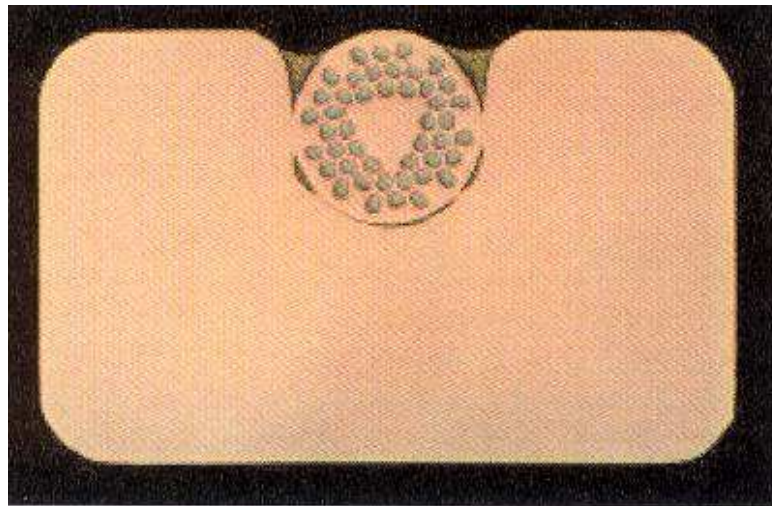
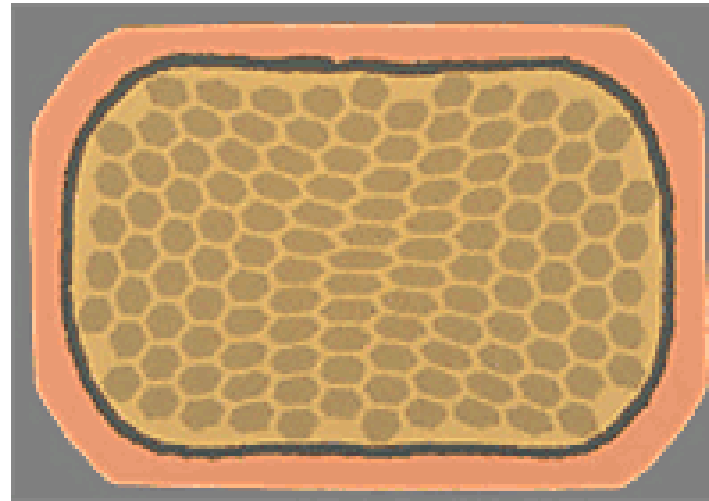
Cu/SC ratio 1.1:1

- Al 99.998
- Alloy

# Conducteur ITER



# Conducteurs d'IRM-RMN

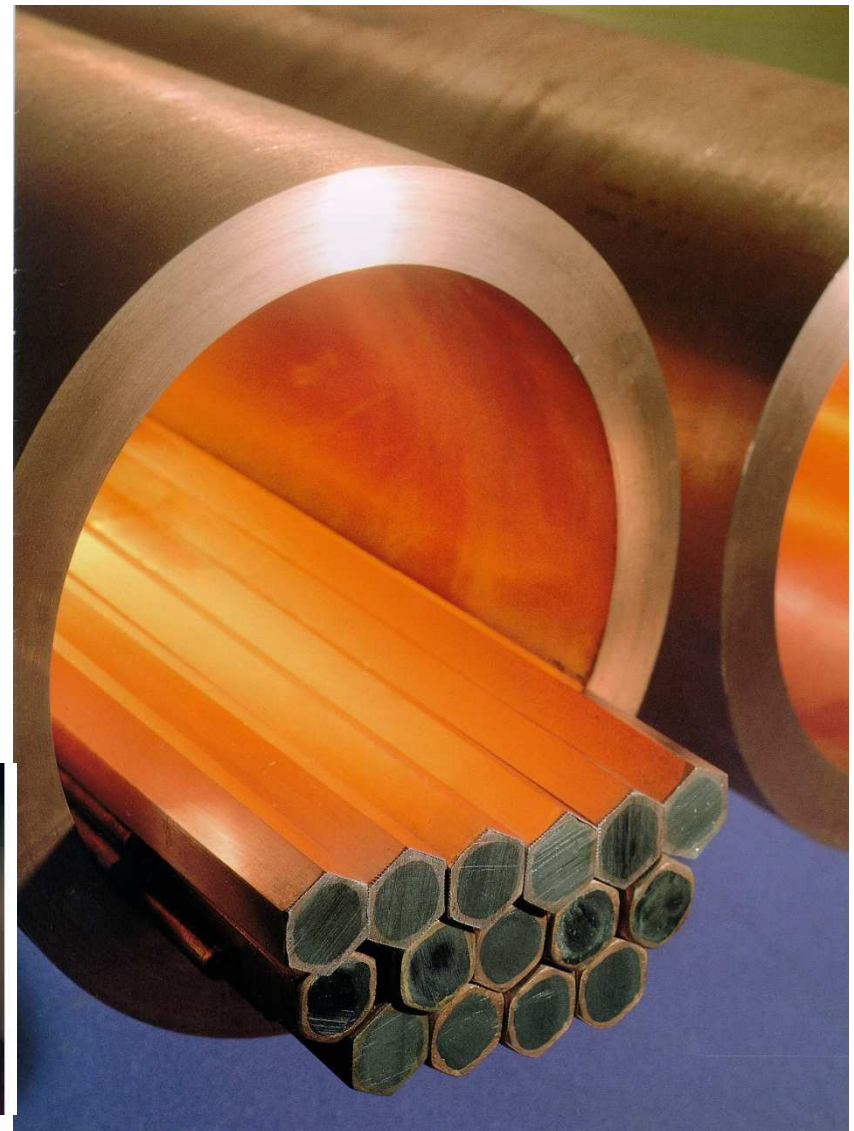
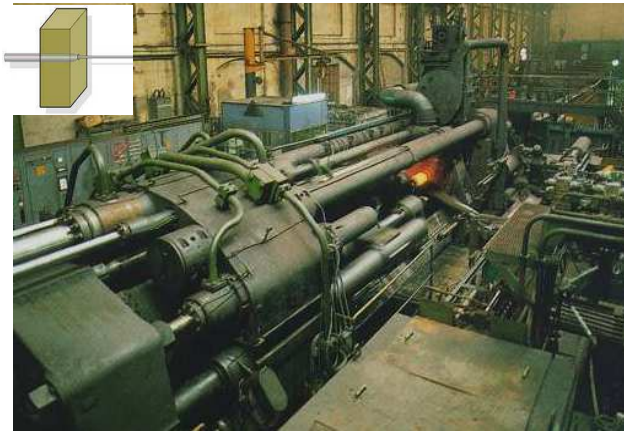


Wire in Channel

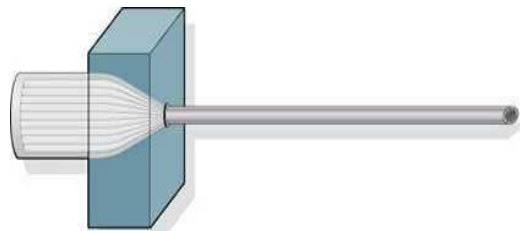
$a \times b = 1.10 \times 1.70 \text{ mm}^2 : 2.15 \times 4.25 \text{ mm}^2$ , Cu : NbTi ratio 10 to 20



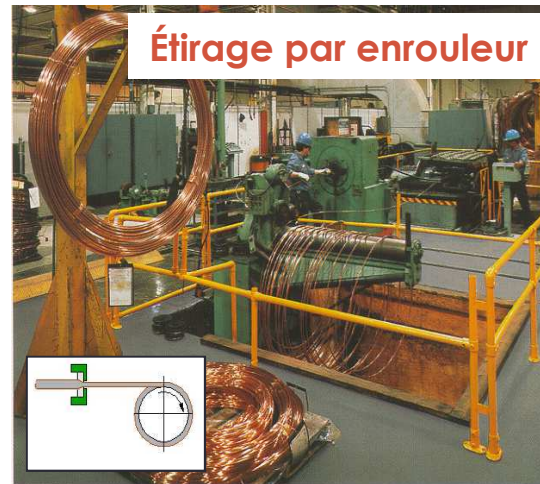
# Fabrication des bielles



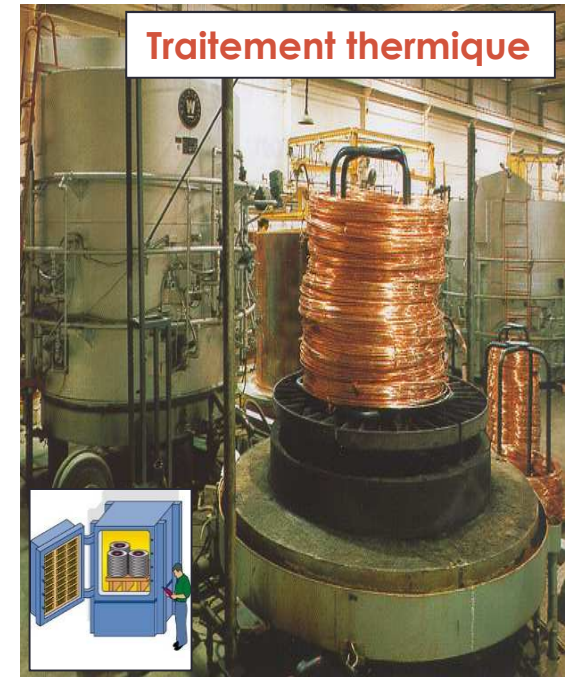
# Fabrication des brins



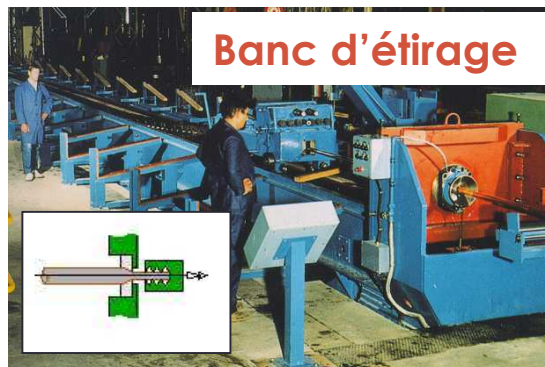
Extrusion des billettes



Étirage par enrouleur



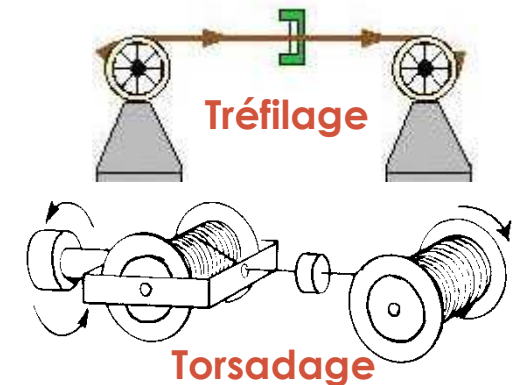
Traitement thermique



Banc d'étirage



Stockage

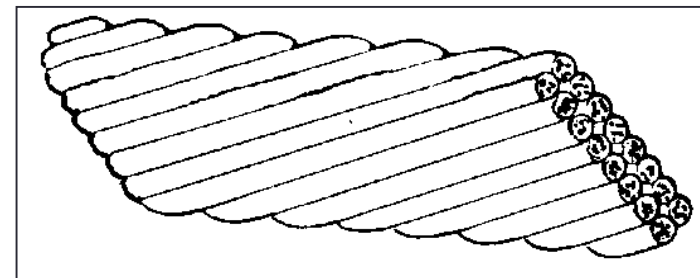
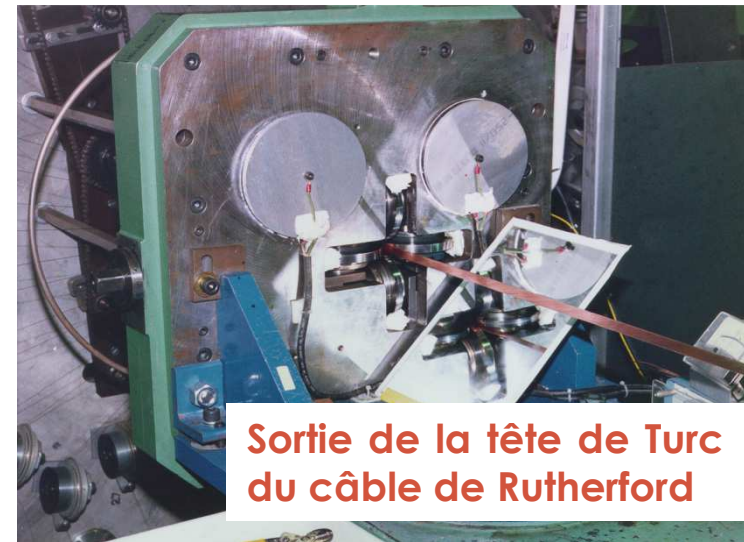
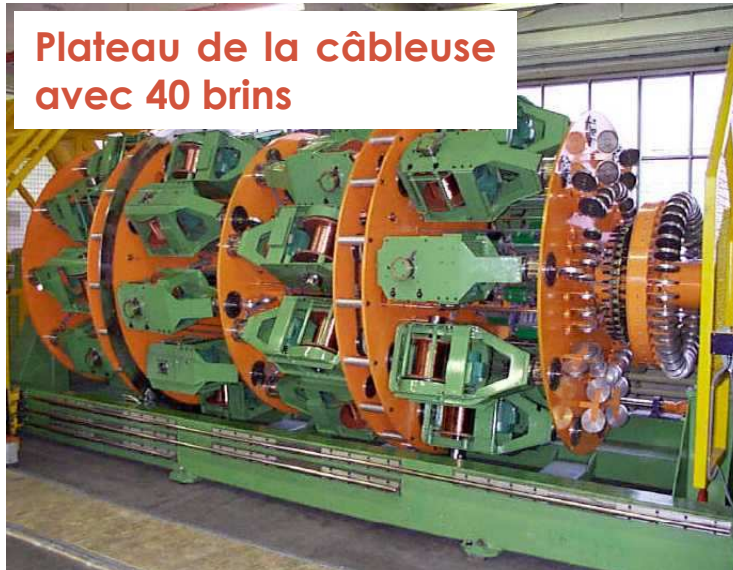


Tréfilage

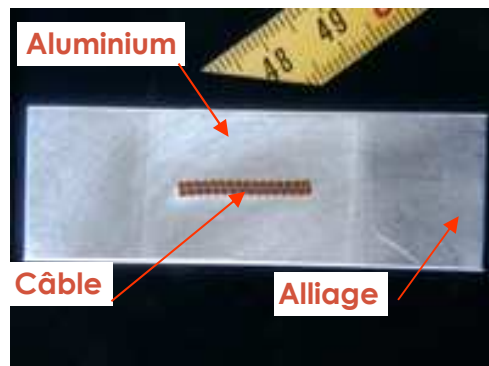
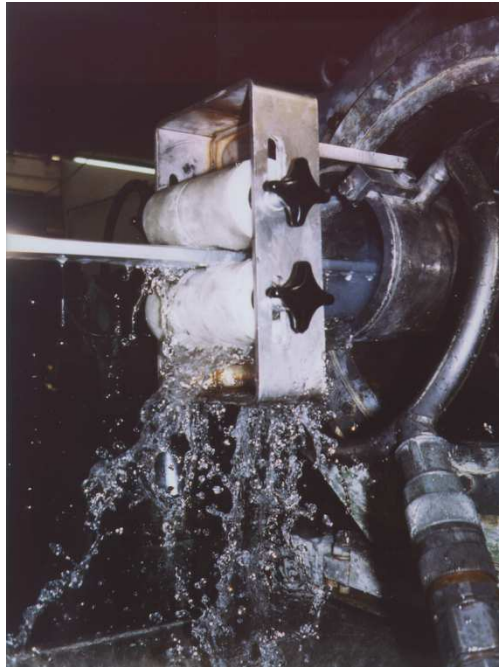
Torsadage



# Fabrication du câble



# Fabrication du conducteur



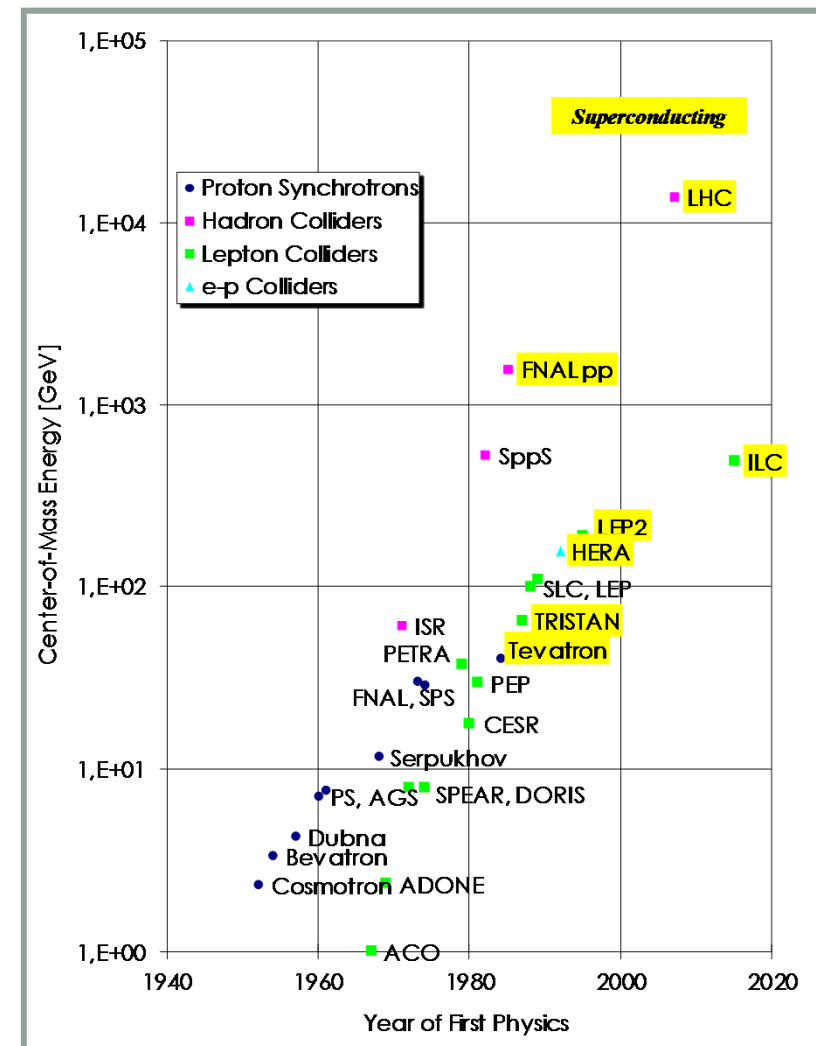
1. La Supraconductivité
2. Les conducteurs « supra »
  - ✓ Stabilité et Protection
  - ✓ Contraintes Mécaniques
  - ✓ Cryogénie
  - ✓ Exemples de conducteurs
3. **Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC**
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire : ITER
5. Aimants pour le médical : NEUROSPIN
6. Le futur...les « HTc »



# L'énergie des accélérateurs

Un développement exponentiel depuis les années 50.

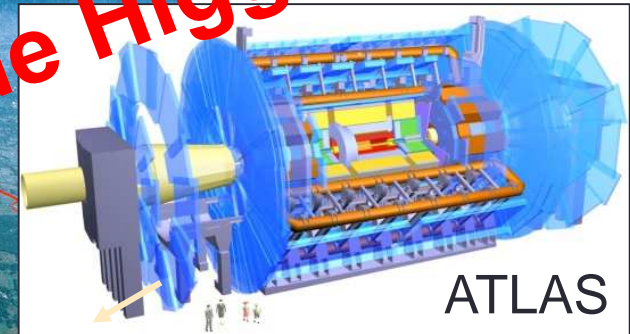
Toutes les machines construites depuis les années 80 utilisent des conducteurs supraconducteurs.



# Gigantesques Instruments Supra: Le LHC



CMS



ATLAS

Refroidissement à 1,9 K  
en He superfluide.

**Découverte du boson de Higgs  
Juillet 2012**



LHC

7000 km de câble NbTi

23 km d'aimants SC :

- 1232 dipôles,
- 474 quadripôles,
- 7612 bobines de corrections.



# Supraconductivité et aimants d'accélérateurs

L'énergie du faisceau, le champ magnétique et le rayon de l'accélérateur sont liés suivant la formule :

$$E_{\text{beam}} = 0.3 * B * r \quad (\text{Gev, T, m})$$

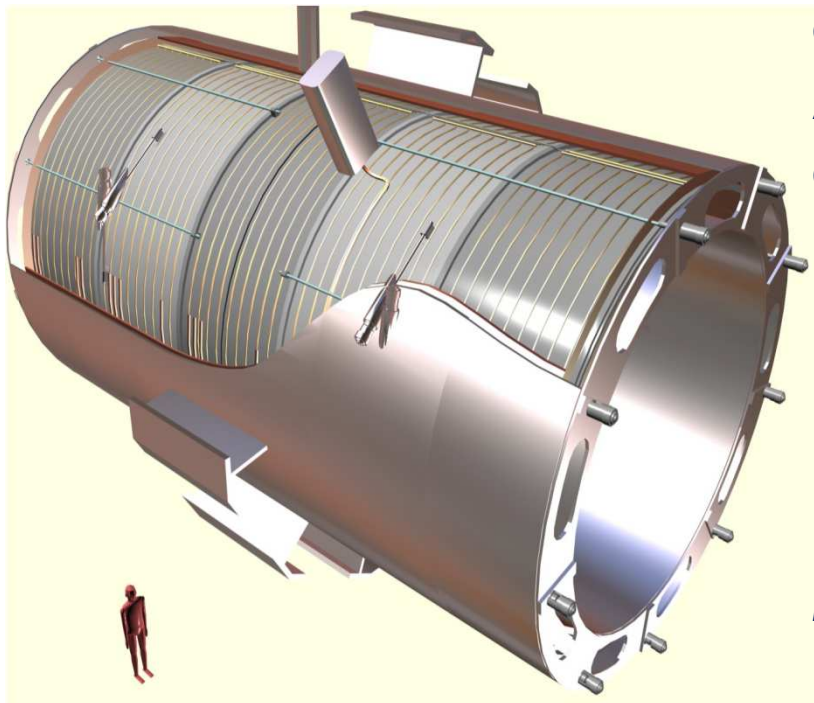
**Pour le LHC  $E = 7\,000$  Gev,  $B = 8.33$  T,  $r = 2\,800$  m**

	LHC actuel (aimants SC)	LHC à aimants résistifs
Champ magnétique	8.3 T (propriétés NbTi)	1.8 T (fer)
Circonférence	27 km	125 km
Puissance des aimants	40 MW	900 MW
Densité de courant	400 A/mm <sup>2</sup>	10 A/mm <sup>2</sup>

La supraconductivité permet d'atteindre des valeurs importantes de champ magnétique et donc de réduire la taille et la consommation électrique des accélérateurs.

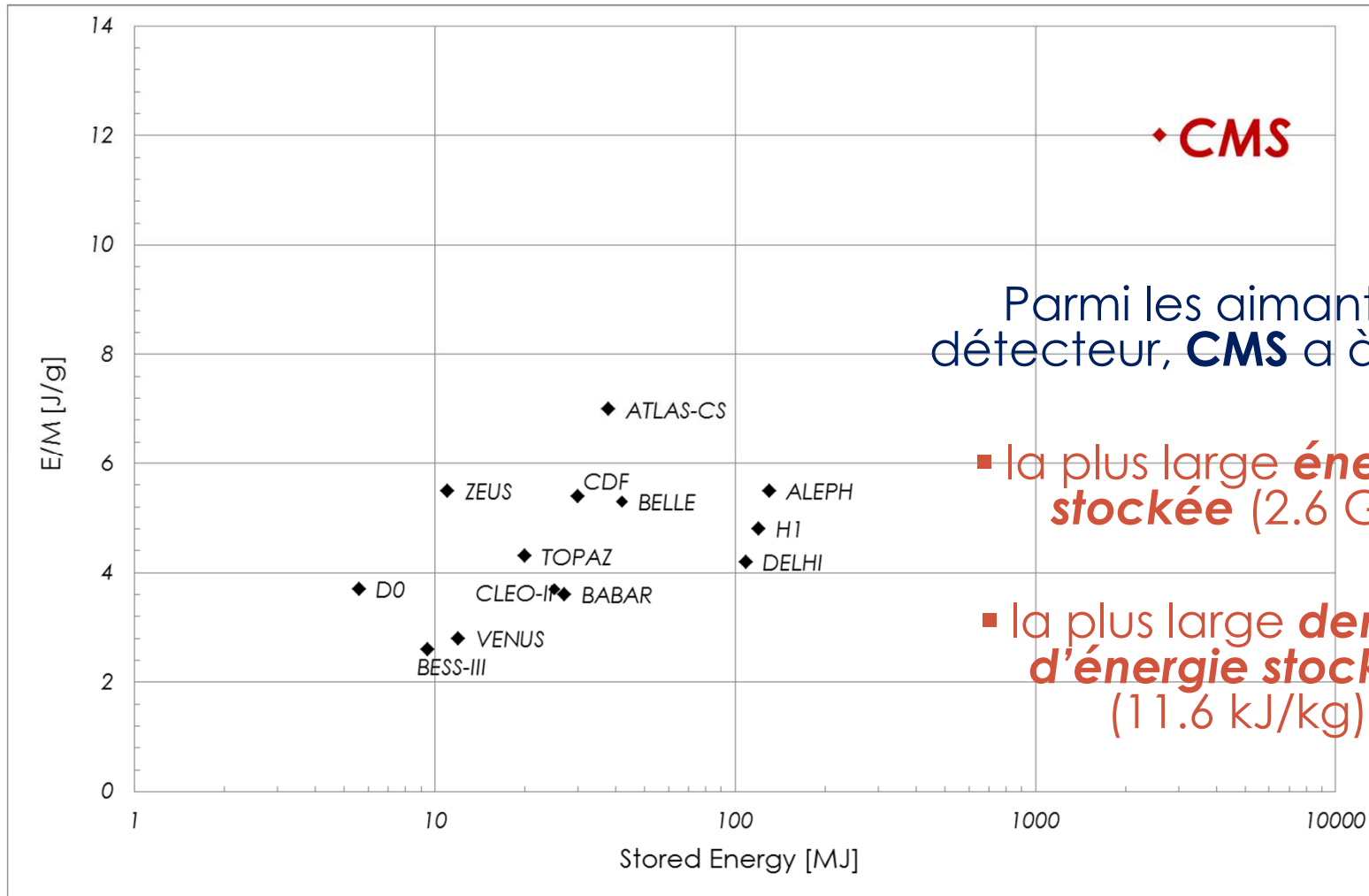
# Solénoïde CMS

## (Compact Muon Solenoid)



<b>Champ Magnétique Central</b>	<b>4.0 T</b>
<b>Champ « Maximum »</b>	<b>4.6 T</b>
<b>Ampères tours totaux</b>	<b>42-51 MA<math>\cdot</math>t</b>
<b>Courant nominal</b>	<b>19500 A</b>
<b>Énergie stockée</b>	<b>2.67 GJ</b>
<b>Longueur magnétique</b>	<b>12500 mm</b>
<b>Diamètre moyen du bobinage</b>	<b>6632 mm</b>
<b>Épaisseur du bobinage</b>	<b>262 mm</b>
<b>Épaisseur du cylindre support</b>	<b>50 mm</b>
<b>Masse froide totale</b>	<b>225 tonnes</b>

# Energie de CMS

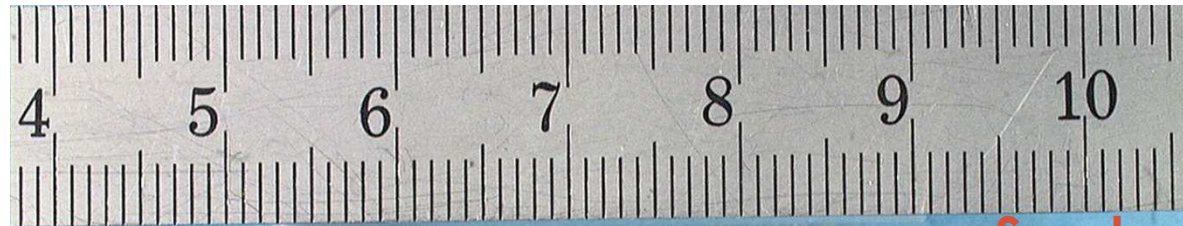


Parmi les aimants de détecteur, **CMS** a à la fois :

■ la plus large **énergie stockée** (2.6 GJ)

■ la plus large **densité d'énergie stockée** (11.6 kJ/kg)

# Conducteur du solénoïde CMS



Soudure par  
Faisceau  
d'électron

Supraconducteur  
(32 brins)

Stabilisant thermique:  
Aluminium très haute  
pureté: 99.998%

Renfort mécanique:  
Alliage d'aluminium  
6082 T5

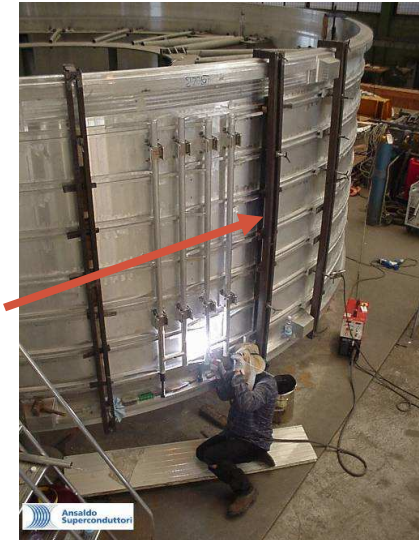




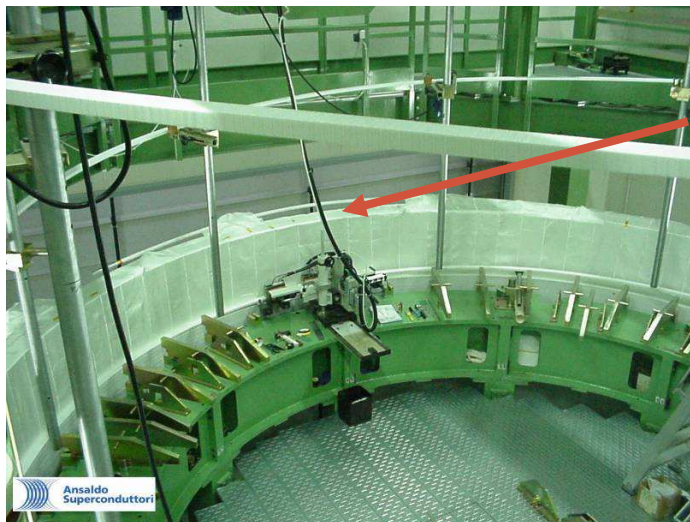
# Réalisation des modules (fin juin 2004)



Polymérisation  
CB-1



Finition  
CB0

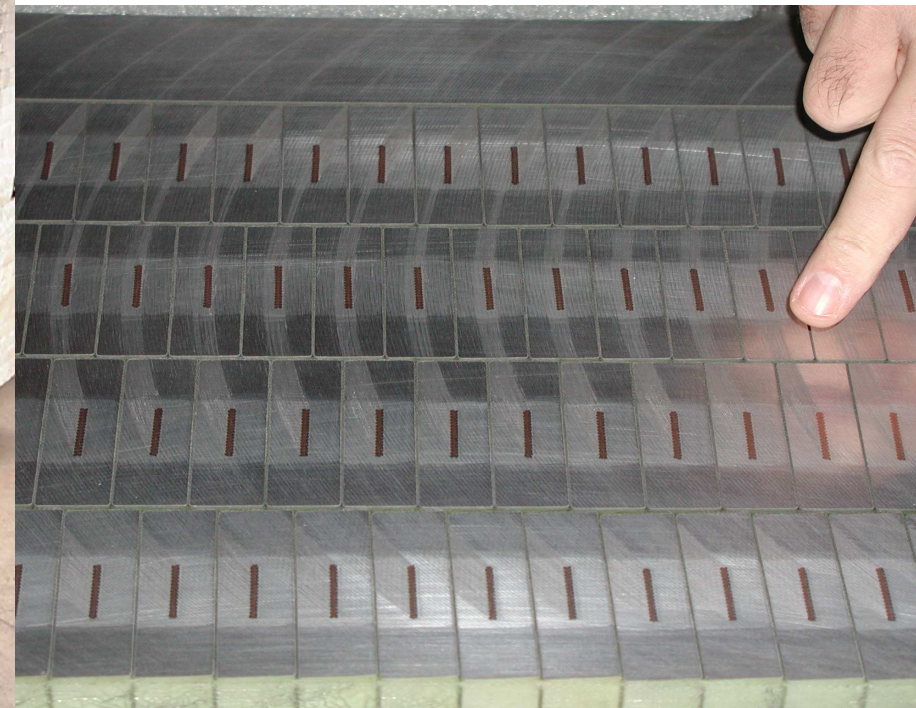


Bobinage  
CB+1



Réalisation  
cylindre  
CB+2

# Bobine prototype





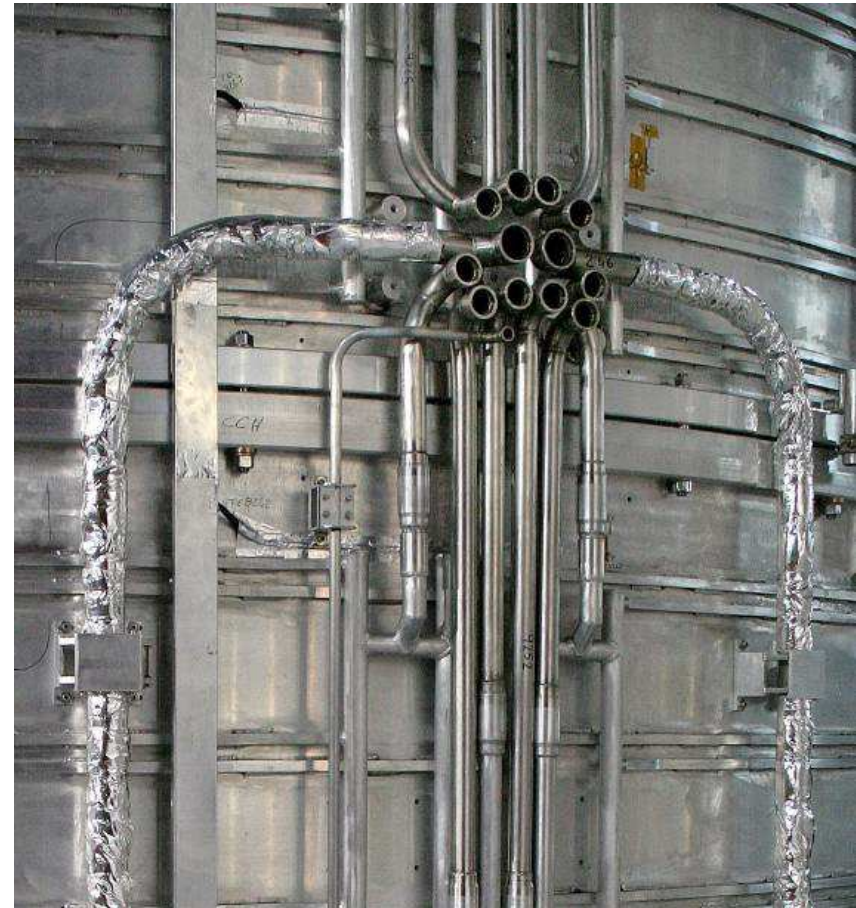
# Assemblage de la bobine en vertical



**Permet en particulier un  
couplage mécanique  
précis**



# Jonctions

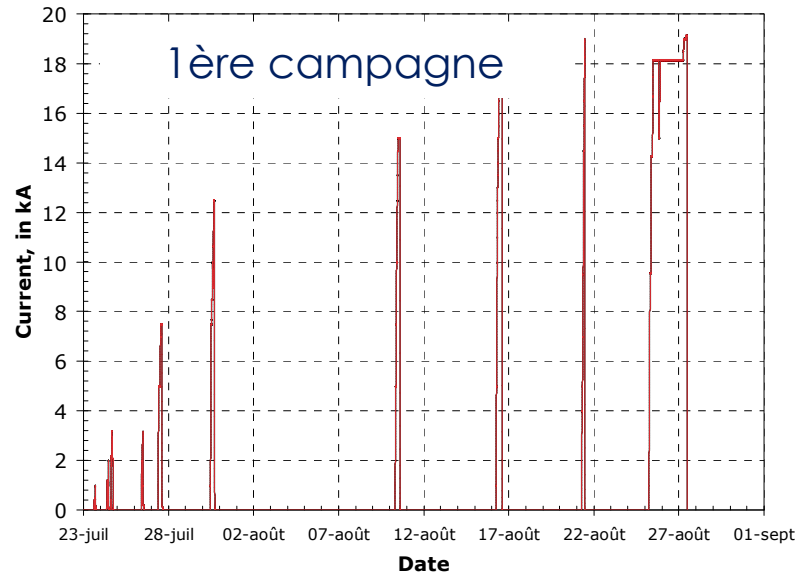




# Retournement et insertion

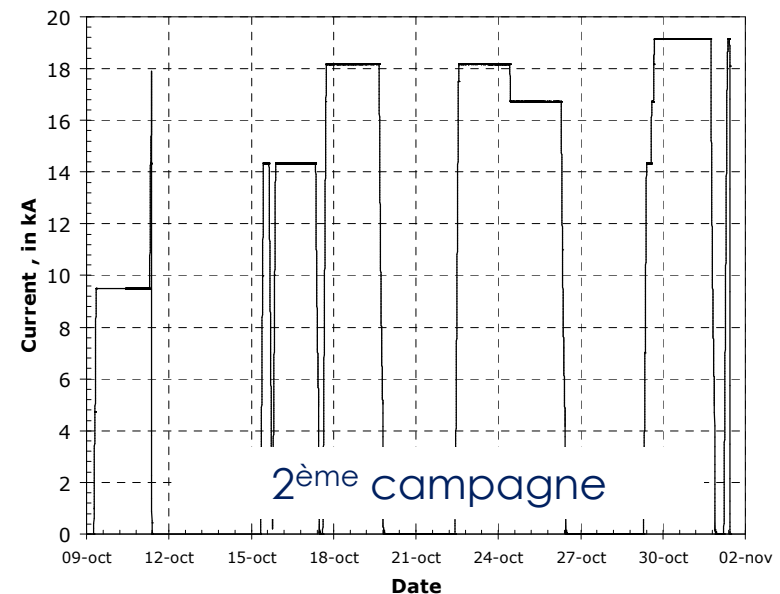


# Tests : cycles électriques

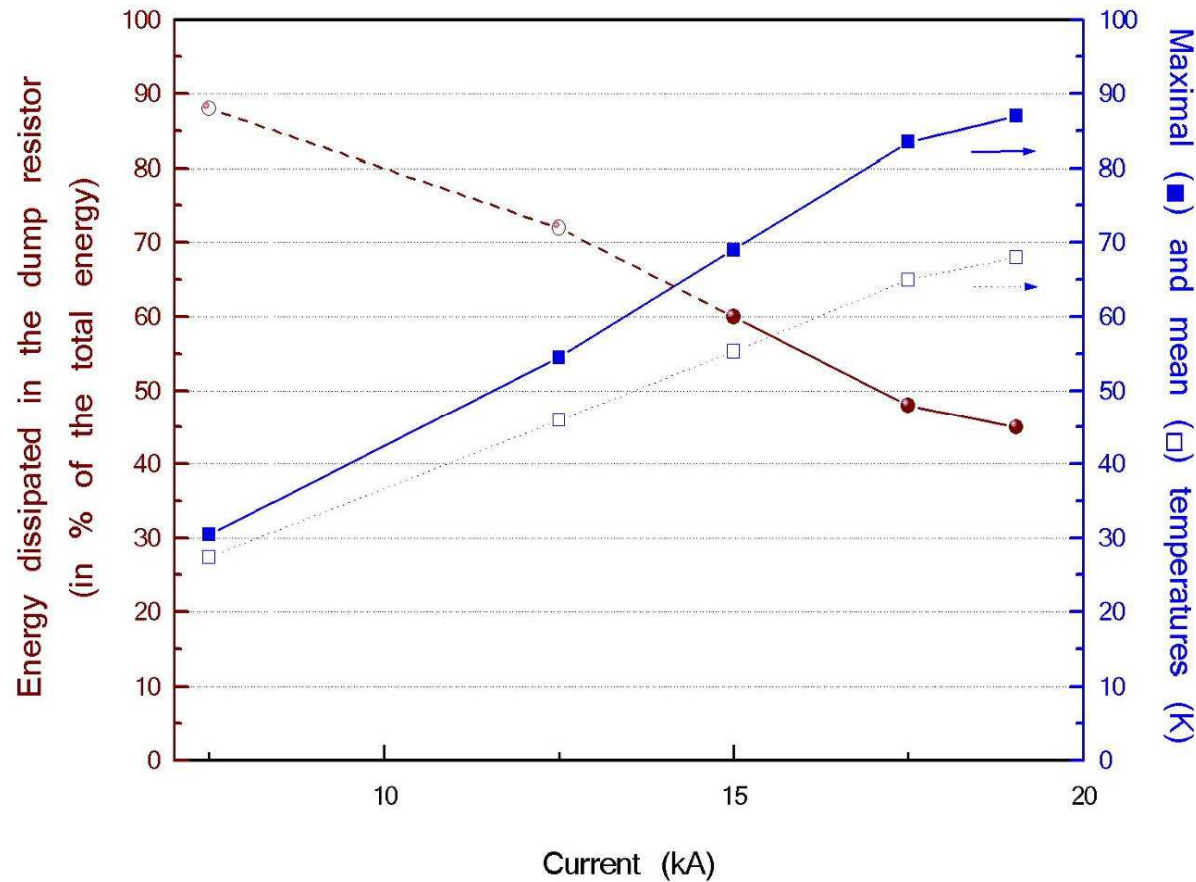


- Cartes de champ
- **Longs paliers (~ 2 jours)**
- Décharge rapide en final

- **Accroissement progressif jusqu'à  $I_{nom}$**
- **Courts paliers (~1 h)**
- **Test des modes de décharge**
- **Pas de transition naturelle, mais effet de quench-back pour  $I > 7,5$  kA**
- **Deux problèmes mineurs avec des auxiliaires**



# Protection et décharge rapide



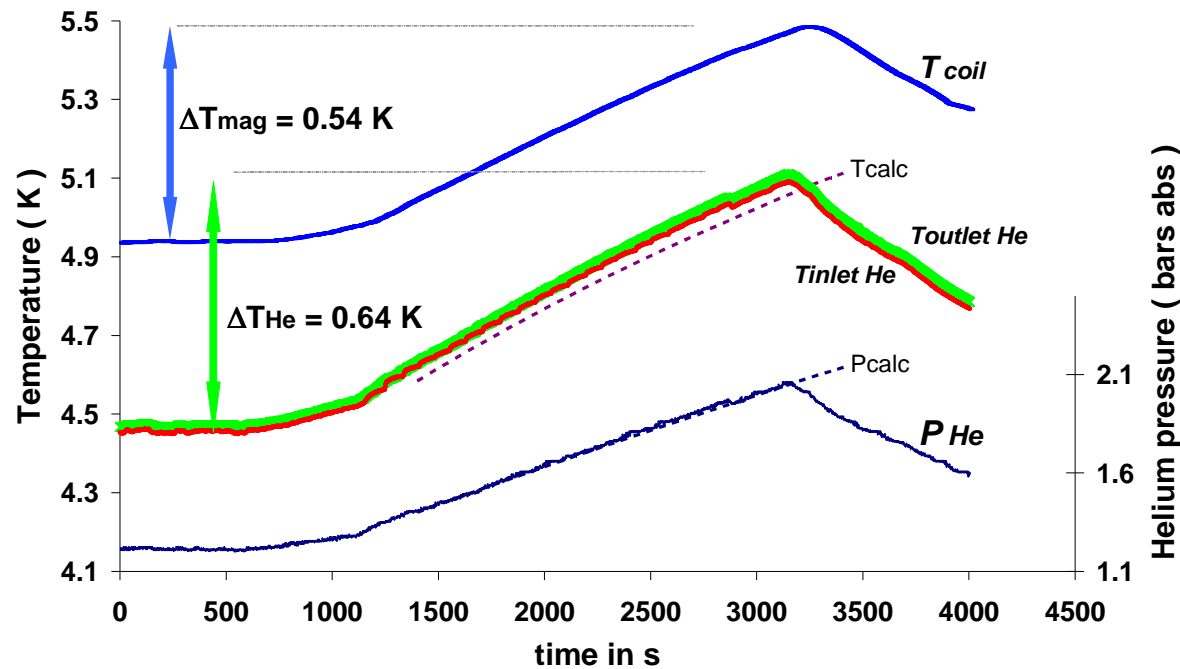
Pas de transition naturelle, mais effet de quench-back au dessus de 7,5 kA

Au courant nominal:

- Tmax 85 K
- 45 % de l'énergie stockée est extraite

# Stabilité de la bobine

P and T increases 2<sup>nd</sup> November 2006



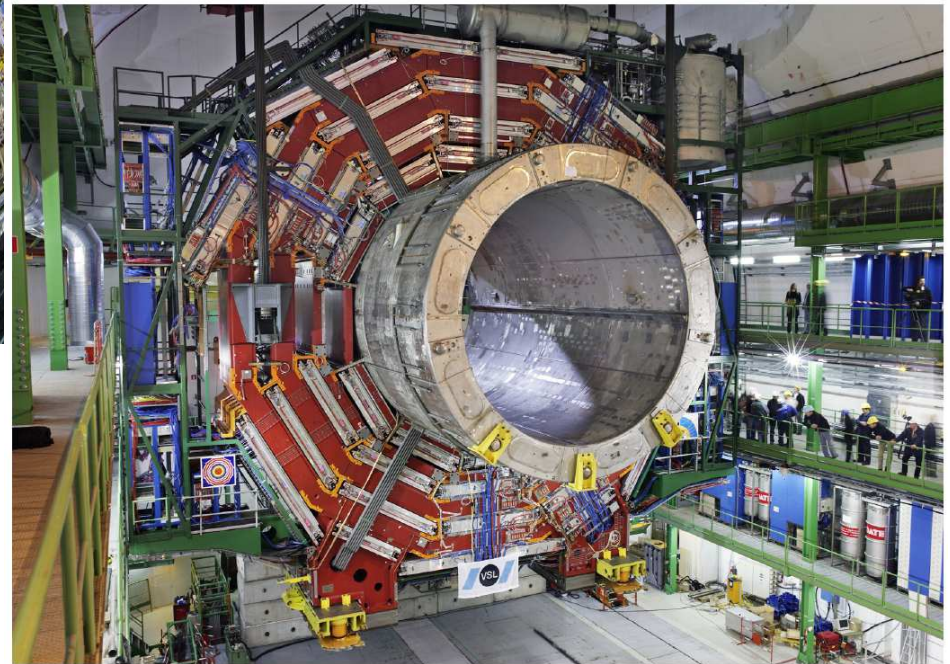
- $B_0 = 4$  T
- $T_{cs}$  calculée : 6.44 K
- $\Delta T > 0,6$  K à 4 T



# Descente de la bobine en caverne



Début de la descente



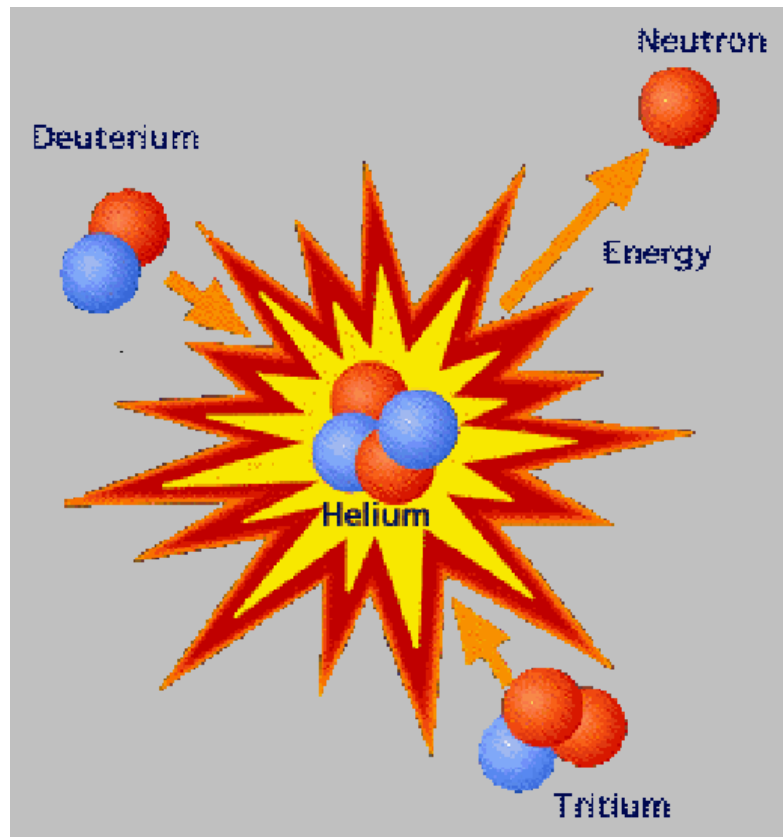
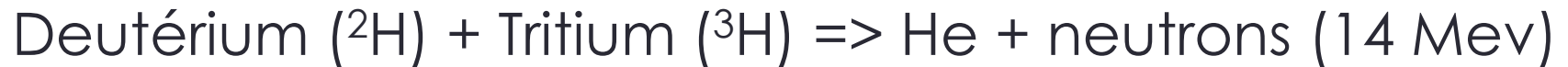
YB0 landing in the CMS experiment hall

Atterrissage en caverne ....  
10 h après

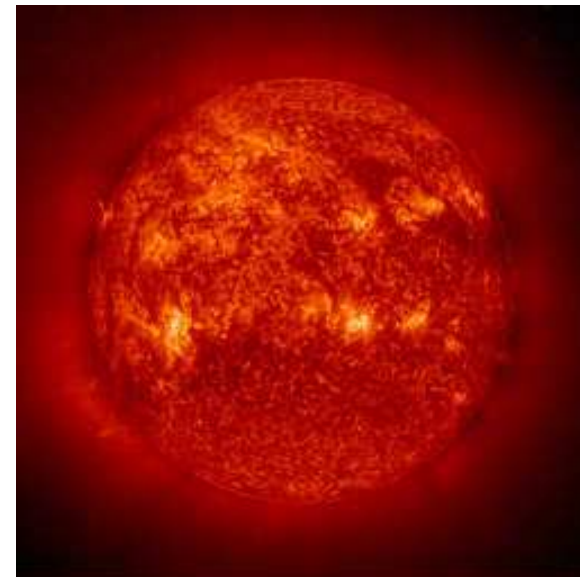
1. La Supraconductivité
2. Les conducteurs « supra »
  - ✓ Stabilité et Protection
  - ✓ Contraintes Mécaniques
  - ✓ Cryogénie
  - ✓ Exemples de conducteurs
3. Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC
4. **Aimants pour la fusion thermonucléaire : ITER**
5. Aimants pour le médical : NEUROSPIN
6. Le futur...les « HTc »

# La Fusion thermonucléaire contrôlée

Réaction de fusion :



- ❑ Deutérium : 33 g/t d'eau de mer.
- ❑ Tritium : interaction neutrons produits avec lithium



# La Fusion thermonucléaire contrôlée

## □ Conditions de réaction

- Températures très élevées (centaines de millions de degré) => plasma

## □ Confinement magnétique

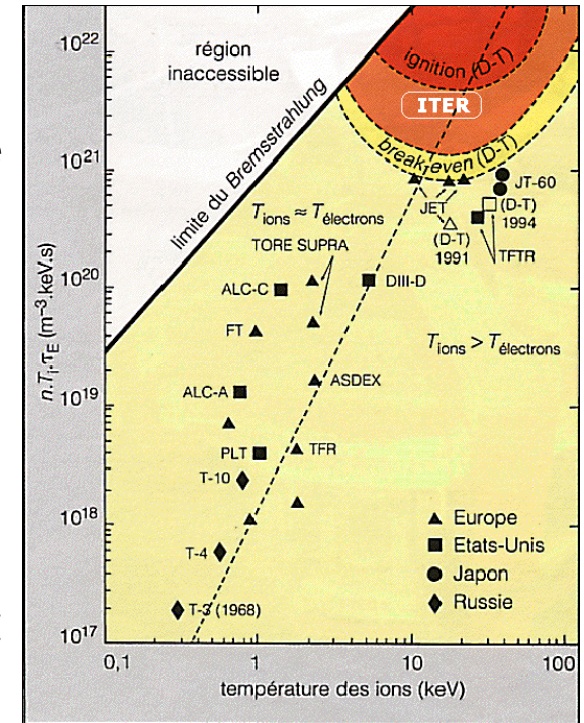
- Maintien du plasma par une induction magnétique
- Forte induction dans volume important : aimants SC

## □ Ignition : fusion compense les pertes, critère de Lawson

$$N W \tau > 6 \cdot 10^{21} \text{ keVs/m}^3 \quad (\text{Deutérium - Tritium})$$

(N : densité de noyau ; W : énergie (température) ;  $\tau$  : temps de confinement)

Concentration en noyaux forte, Temps de confinement longs.

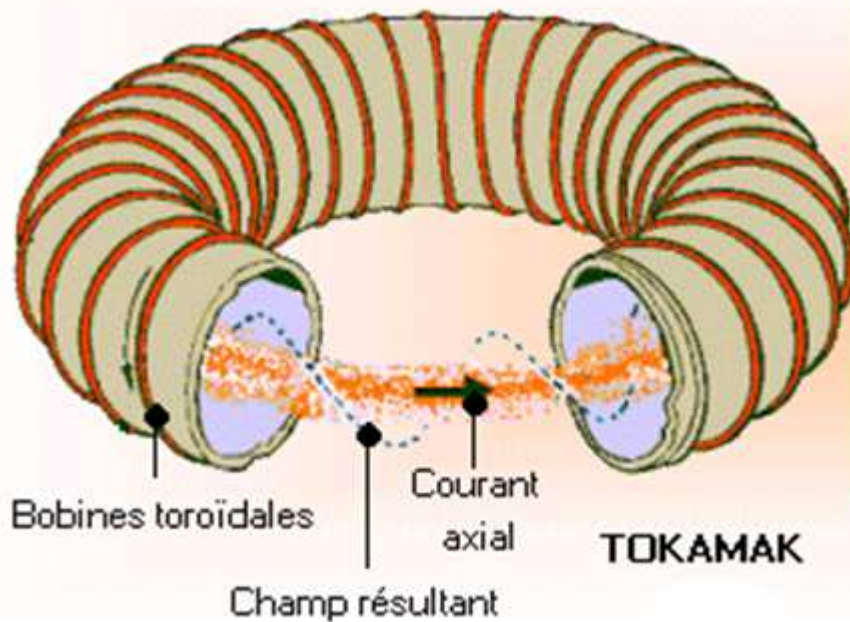




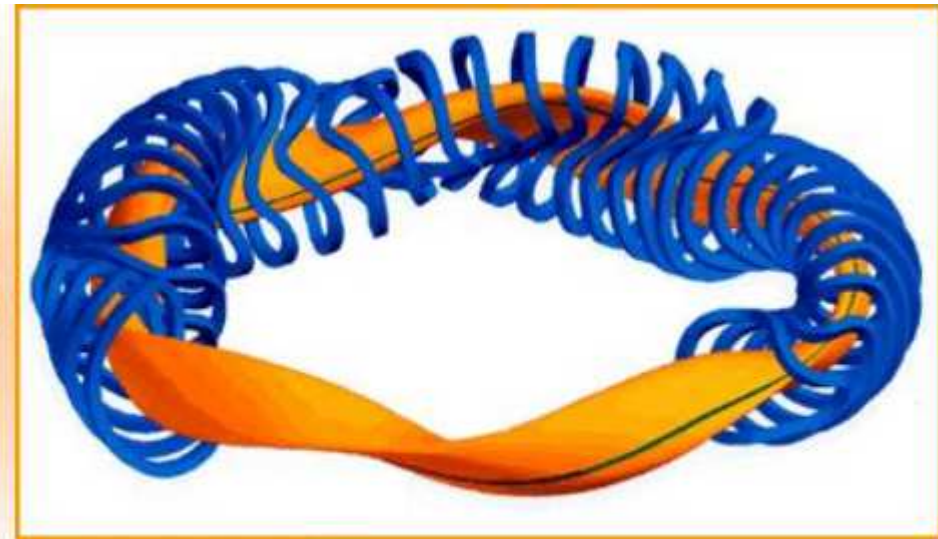
# Confinement magnétique

- ✓ Plasma : particules chargées
- ✓ Confinement optimal :

*Action de B*  
*Induction hélicoïdale*



**TOKAMAK**



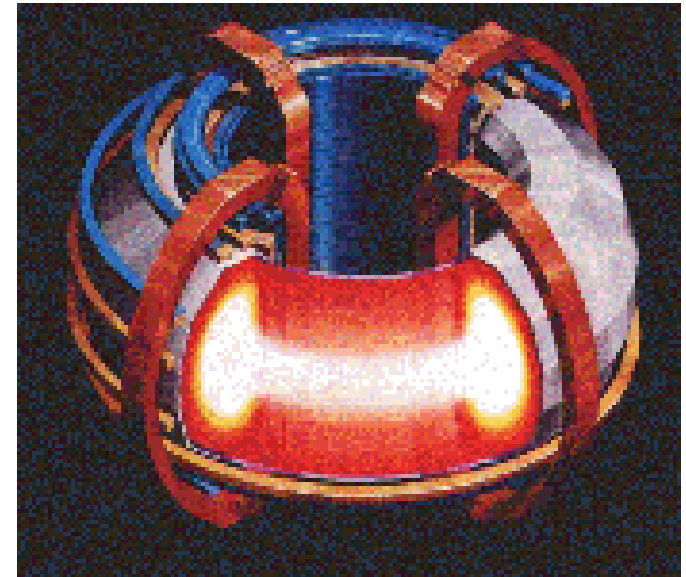
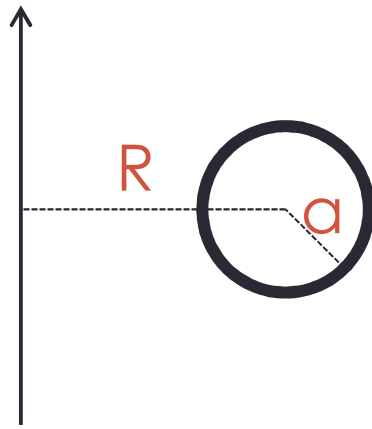
**STELLARATOR**



- ✓ Solutions :

- tore + courant plasma **TOKAMAK**
- bobines en hélice **STELLARATOR**

# Paramètres importants



$$P_{\text{LH}} = 2.84 M^{-1} B_T^{0.82} n_e^{0.58} R a^{0.81}$$

(Puissance de fusion)

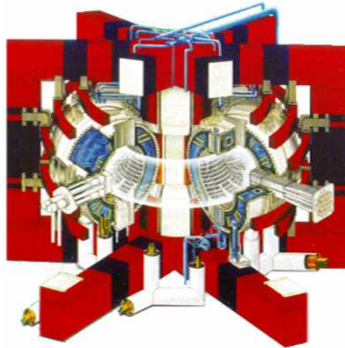
$$t_{\text{E,th}} = 0.0562 I_p^{0.93} B_T^{0.15} P^{-0.69} n_e^{0.41} M^{0.19} R^{1.97} e^{0.58} k_a^{0.78}$$

(Temps de confinement du plasma)

# Fusion : nécessité des supraconducteurs

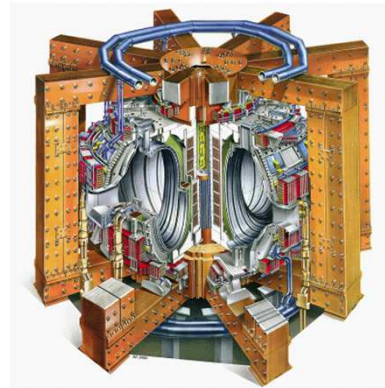
$$Q = P_{fus} / P_{inj}$$

**Tore Supra**  
(partly SC)



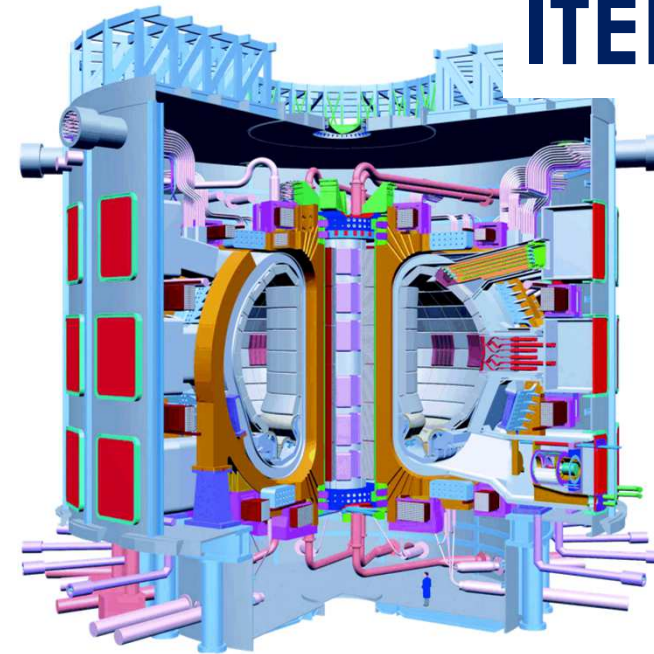
$V_{plasma}$	25 m <sup>3</sup>
$P_{fusion}$	~ 0
$t_{plasma}$	~ 400 s
$I_{plasma}$	1.5 MA
$B_{Toroidal}$	4.2 T
$Q$	0

**JET** (conv.)



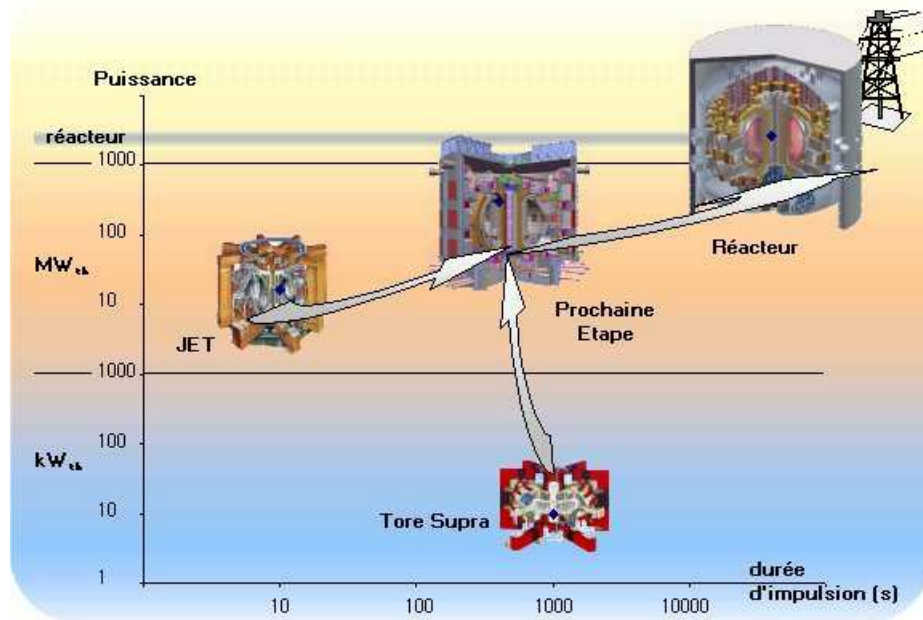
$V_{plasma}$	80 m <sup>3</sup>
$P_{fusion}$	~ 16 MW
$t_{plasma}$	~ 30 s
$I_{plasma}$	5 MA
$B_{Toroidal}$	3,5 T
$Q$	0.002

**ITER** (SC)



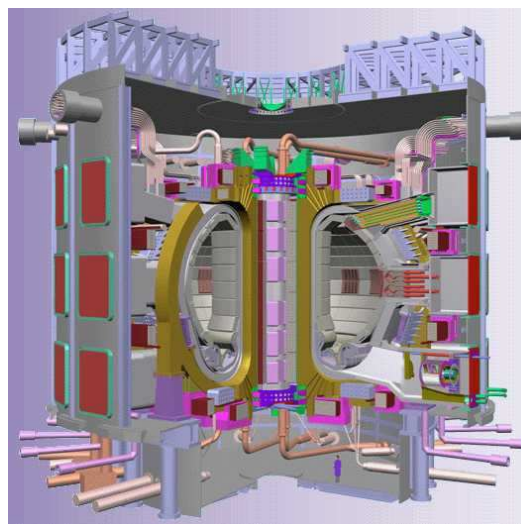
$V_{plasma}$	837 m <sup>3</sup>
$P_{fusion}$	~ 500 MW
$t_{plasma}$	~ 400 – 1000 s
$I_{plasma}$	15 MA
$B_{Toroidal}$	5.3 T
$Q$	10

# International Thermonuclear Experimental Reactor



- En construction à Cadarache,
- Livraison prévue pour 2020,
- Coût 20 G€

## Objectifs d'ITER



- Maintenir réaction pdt temps longs
- Etablir conditions d'un fonctionnement Continu
- Après ITER
  - DEMO
  - PROTO



# Bobines toroïdales

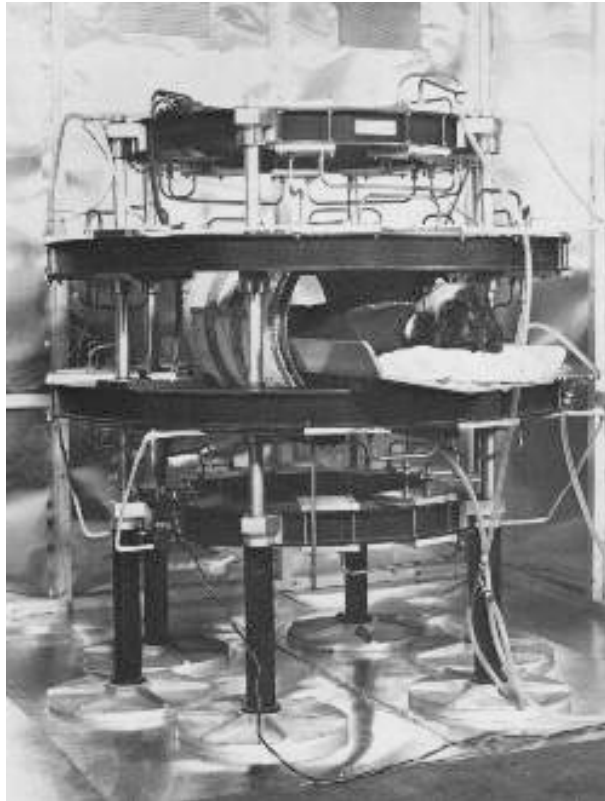
- ❖ Nombre de bobines **18 Nb<sub>3</sub>Sn**
- ❖ Champ Magnétique Toroïdal **5,3 T**
- ❖ Champ « Maximum » sur le conducteur **11,8 T**
- ❖ Ampères tours totaux **164 MA<sub>t</sub>**
- ❖ Courant nominal **68 000 A**
- ❖ Énergie stockée **41 GJ**
- ❖ Force de recentrage/bobine **403 MN**
- ❖ Force verticale/bobine **408 MN**
- ❖ Constante de décharge **11 s**
- ❖ Poids **5362 tonnes**



1. La Supraconductivité
2. Les conducteurs « supra »
  - ✓ Stabilité et Protection
  - ✓ Contraintes Mécaniques
  - ✓ Cryogénie
  - ✓ Exemples de conducteurs
3. Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire : ITER
5. **Aimants pour le médical : NEUROSPIN**
6. Le futur...les « HTc »



# IRM, une technique récente



**Les premiers essais datent des années 70**

# Quelques précautions...



# Aimants d'IRM et RMN

**Spectroscopie RMN** pour les applications chimiques, biochimique et pharmaceutiques,

**Imagerie IRM** pour la médecine et la recherche médicale

$$\mu = \gamma (h/2\pi) I ,$$

$\mu$  moment magnétique ,  $\gamma$  le facteur gyromagnétique et  $I$  le spin

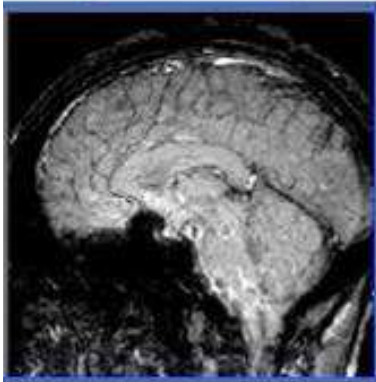
**$\Rightarrow 42.77$  MHz/T pour le proton**

La qualité du signal RMN est relié :

- ✓ **Au niveau de champ magnétique** : aujourd'hui le plus fort aimant de RMN atteint 1,1 GHz  $\Leftrightarrow$  25,71 T à 2,2 K.
- ✓ **A l'uniformité de champ** :  $\varnothing 5\text{mm} \times H10\text{mm}$  volume :  $\Delta B/B_0 \sim 10^{-6} - 10^{-8}$   
 $\Delta B/B_0 \sim 10^{-9} - 10^{-10}$  en spectroscopie haute résolution (0.1 Hz)
- ✓ **A la stabilité** (opération mode persistant): décroissance du champ inférieur à  $10^{-8}$ /heure ( $10^{-9}$ /h pour spectroscopie haute résolution)

# Influence de la valeur du champ – IRM

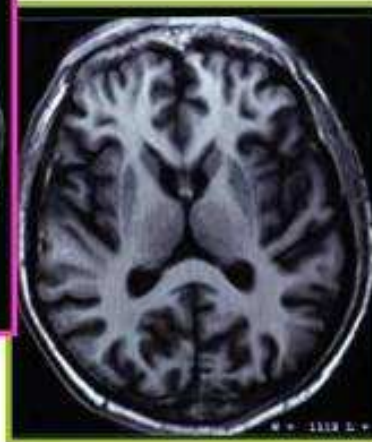
0.23 T



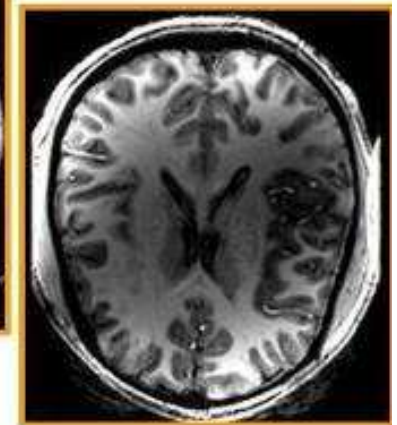
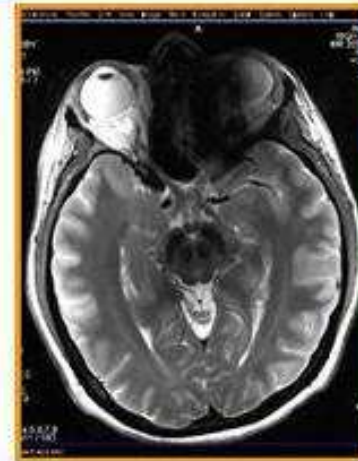
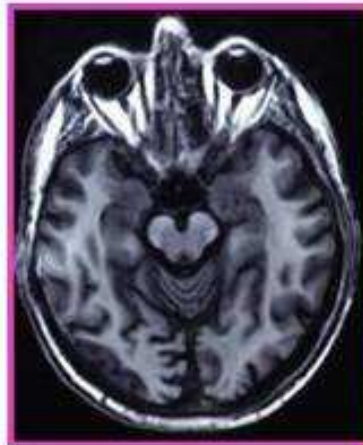
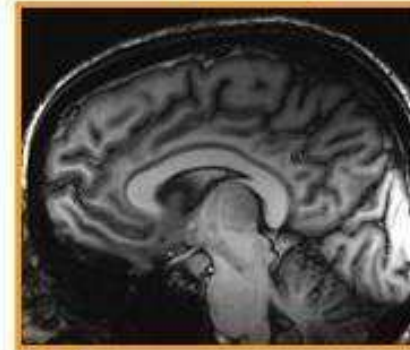
1.5 T



3 T

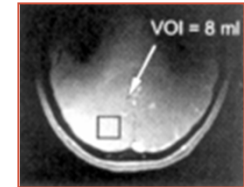


7 T



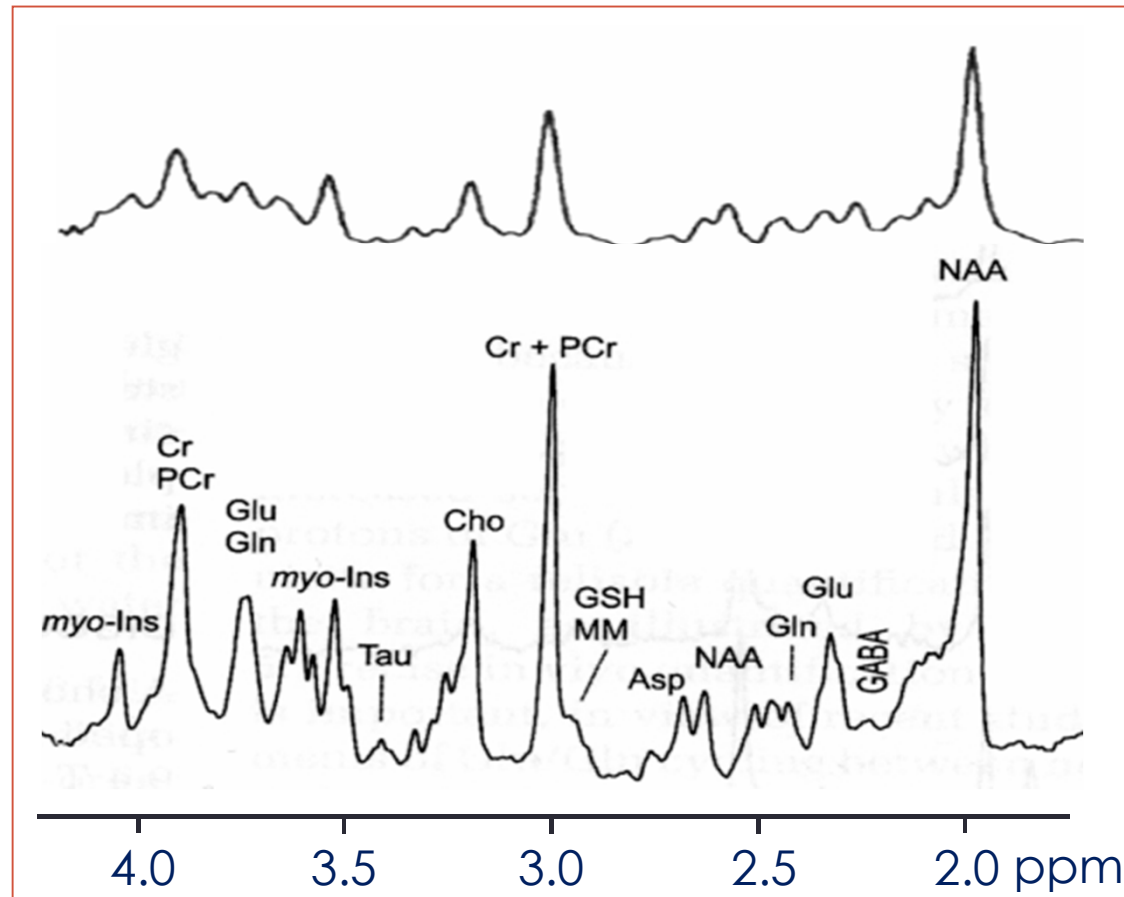
# Résolution spectrale - RMN

Spectroscopie RMN  $^1\text{H}$  dans le cerveau humain :



**2 Tesla :**  
(Frahm *et al.*)

**7 Tesla :**  
(Tkac *et al.*)





# Caractéristiques d'un système IRM

La **résonance du proton** est utilisé.

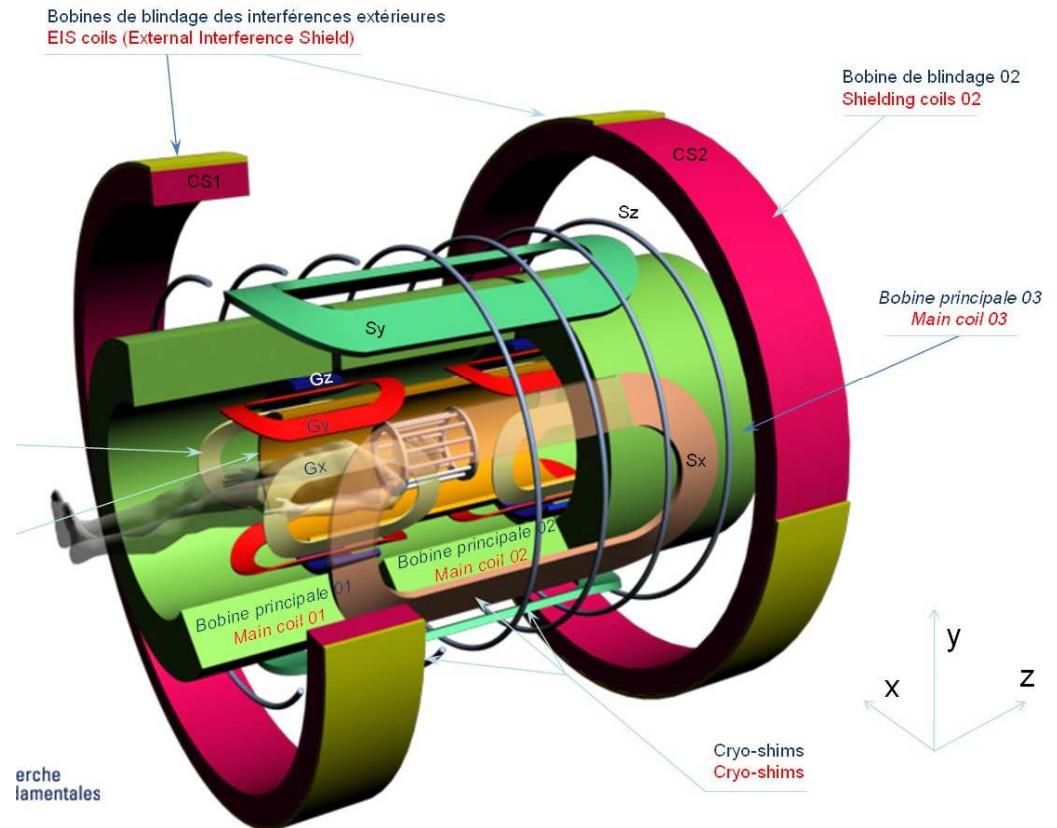
Pour produire une image des **bobines additionnelles** sont nécessaires pour produire un gradient contrôlé d'environ  $10^{-3}$  du champ principal. Ce bobinage de gradient doit être écranté pour éviter les courants induits dans le cryostat.

Un **blindage actif ou passif** est utilisé pour réduire le champ de fuite à 0.5 mT.

L'**aimant est shimé** avec des pièces en acier doux et/ou des petites bobines résistives ou supra pour prendre en compte toutes les sources locales de perturbations magnétiques.

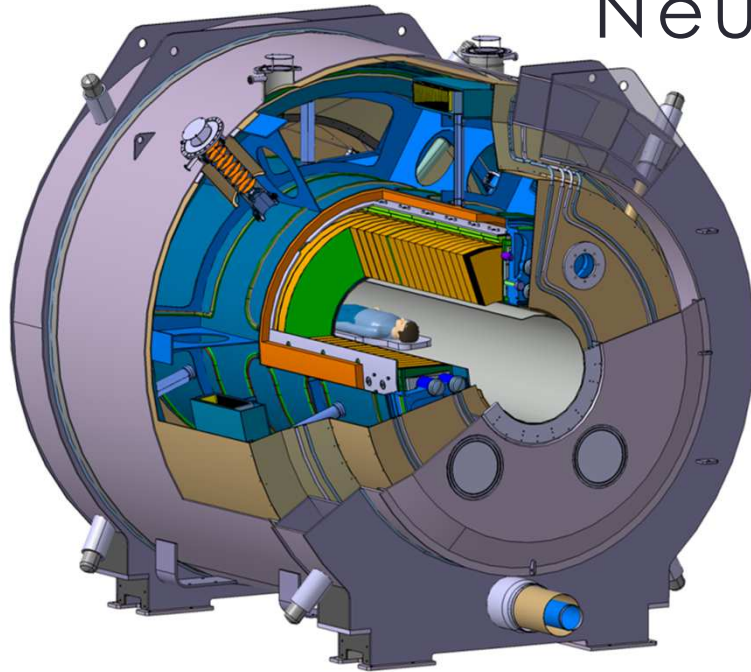
Conducteur: **brins de Cu/NbTi fort diamètre**, brins en goulottes cuivre.

## Les « bobinages » d'un IRM



# Aimant « ISEULT » 11,7 T Corps entier

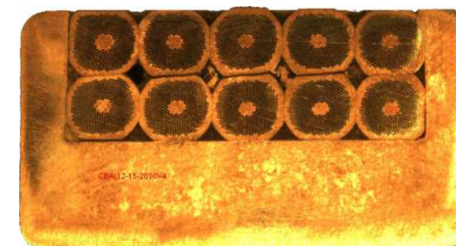
## Neurosciences (cea/dsv)



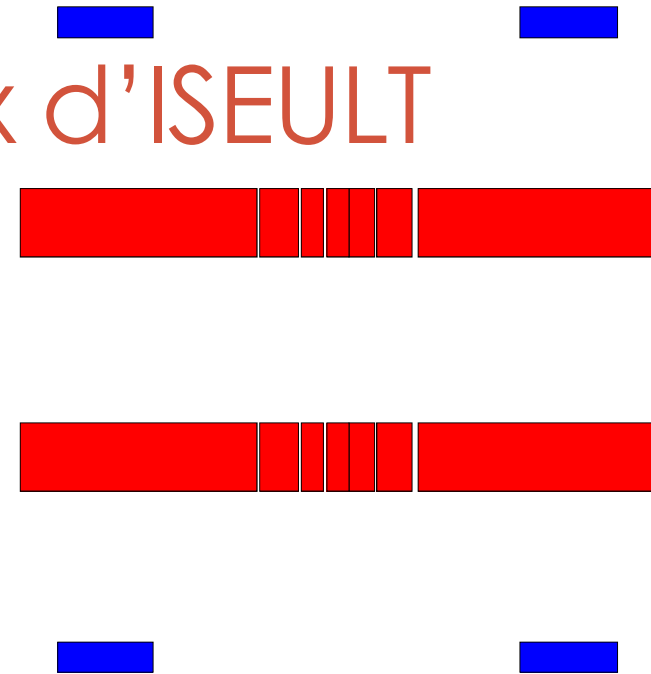
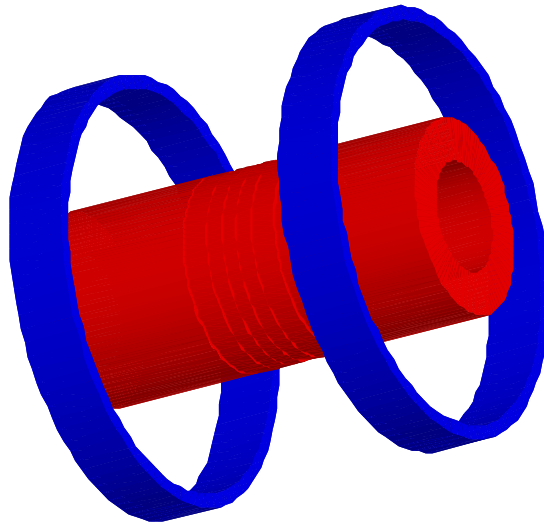
### Objectifs, observer :

- ✓ les neurones en action
- ✓ la construction du cerveau
- ✓ les gènes en action
- ✓ la chimie du cerveau

E	338 MJ
B	11,75 T
$I_0$	1483 A
T	1,8 K
$\varnothing_i / \varnothing_e / h$	0,8 m / 5 m / 5 m
Poids	132 tonnes

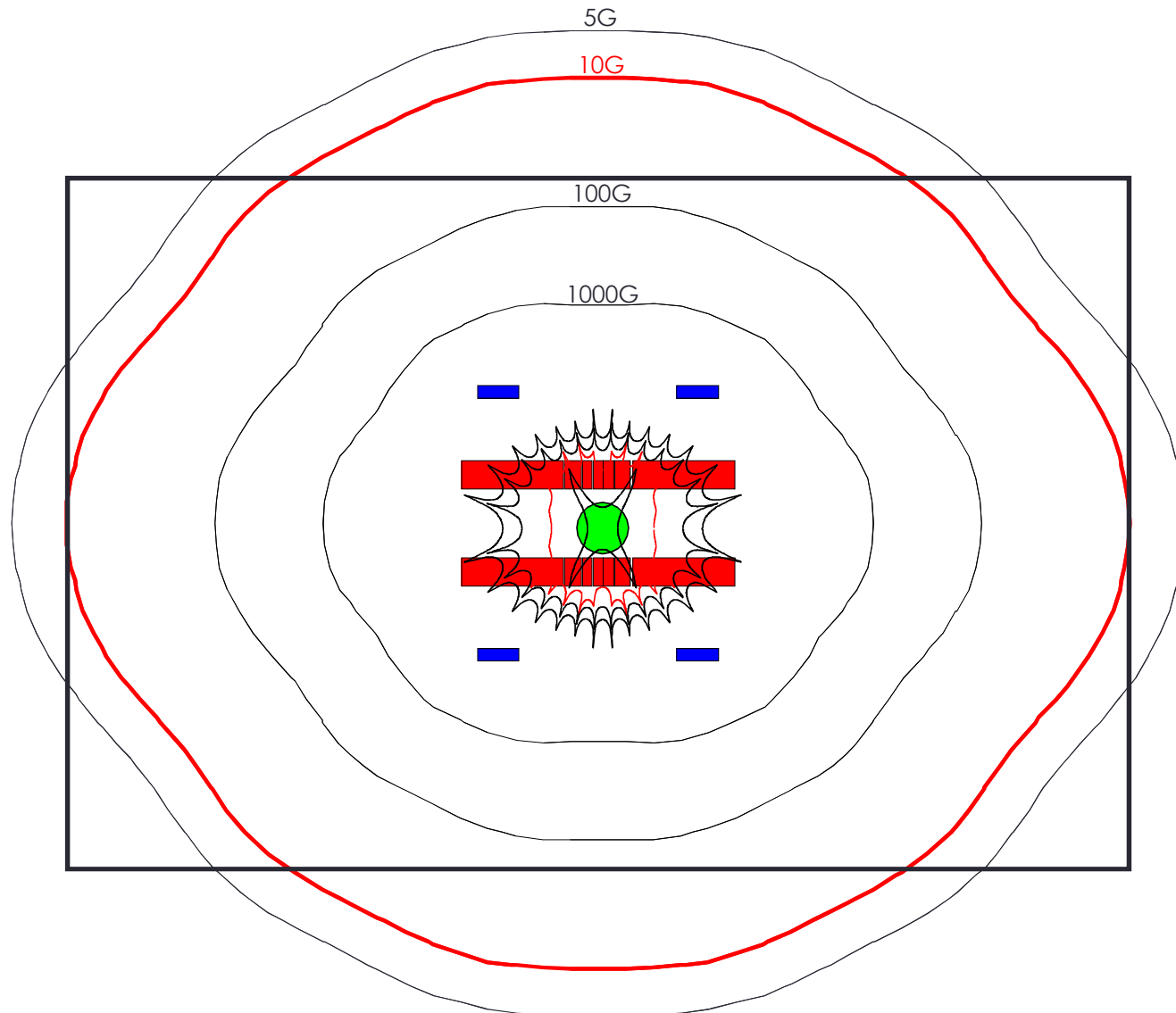


# Paramètres principaux d'ISEULT



Stored Energy	<b>298 MJ</b>
Operating current	1411 A
Critical current on the load line	1534 A
Temperature margin	1 K
Winding volume (Cable + Hell + Spacers)	<b>9.7 m<sup>3</sup></b>
Winding pack length	4.m
Winding inner diameter	1.m
Winding outer diameter	4.m
Current density inside winding	28 A/mm <sup>2</sup>
Estimated magnet weight	<b>150 tons</b>

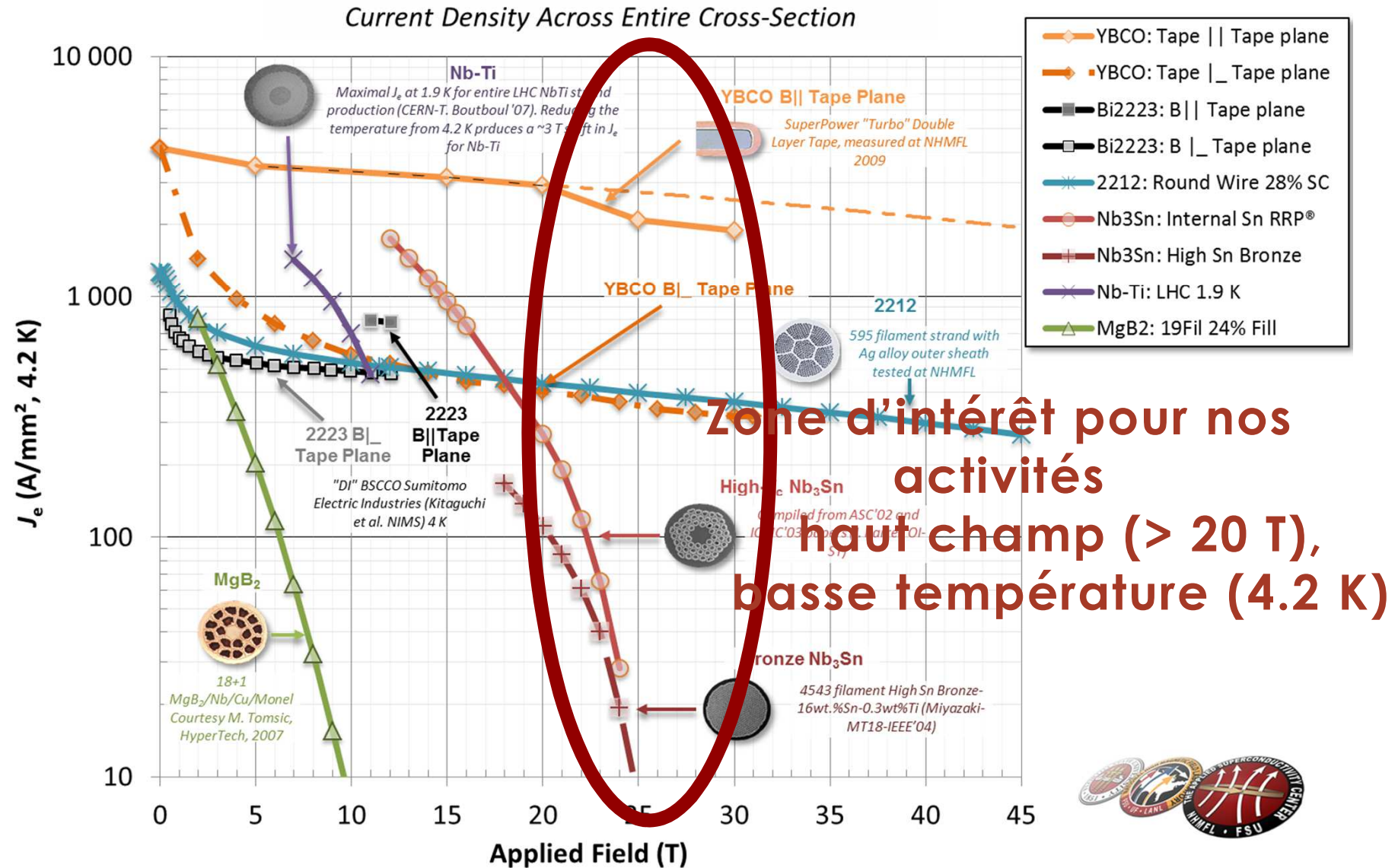
# Blindage actif et homogénéité



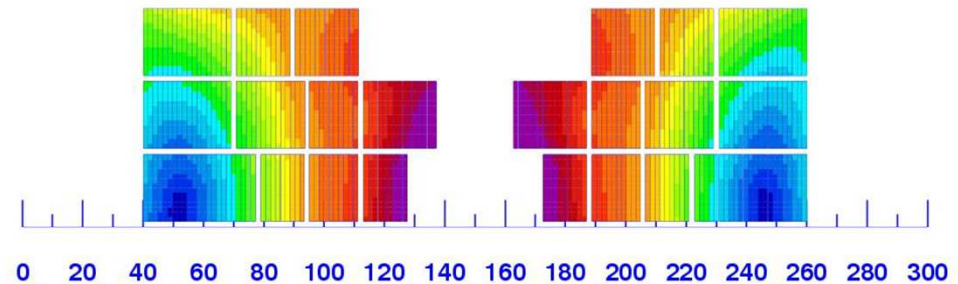
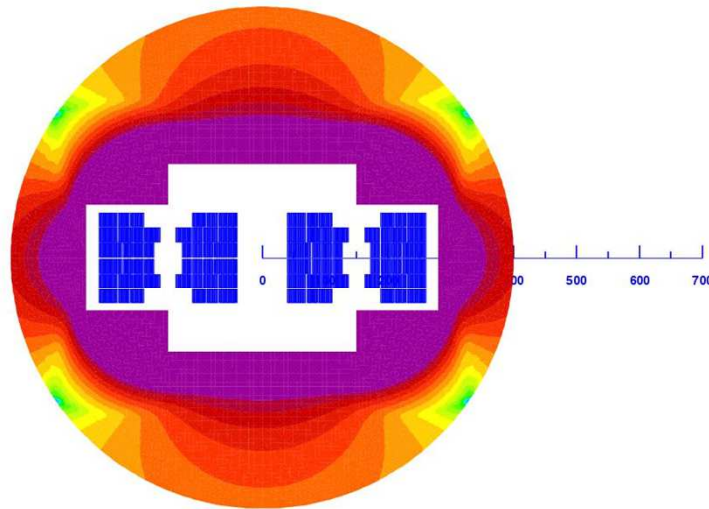
1. La Supraconductivité
2. Les conducteurs « supra »
  - ✓ Stabilité et Protection
  - ✓ Contraintes Mécaniques
  - ✓ Cryogénie
  - ✓ Exemples de conducteurs
3. Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire : ITER
5. Aimants pour le médical : NEUROSPIN
6. **Le futur...les « HTc »**



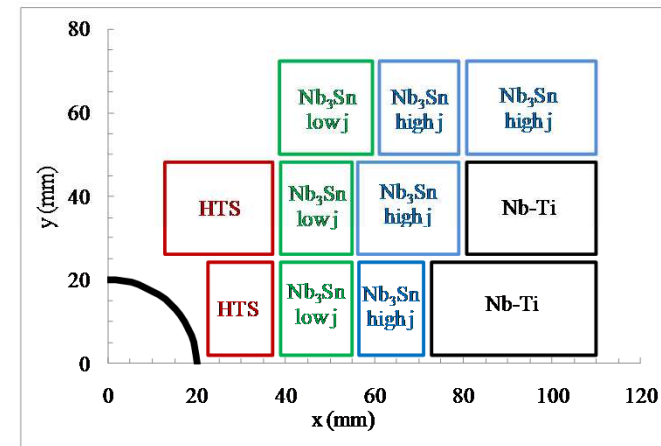
# Capacité de transport de courant à 4,2 K



# Exemple d'un futur dipôle 20 T (HE-LHC)



Material	N. turns	Coil fraction	Peak field	$J_{\text{overall}}$ (A/mm <sup>2</sup> )
Nb-Ti	41	27%	8	380
Nb <sub>3</sub> Sn (high J <sub>c</sub> )	55	37%	13	380
Nb <sub>3</sub> Sn (Low J <sub>c</sub> )	30	20%	15	190
HTS	24	16%	20.5	380

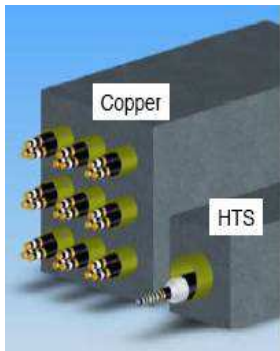


Courtesy L. Rossi & E.Todesco

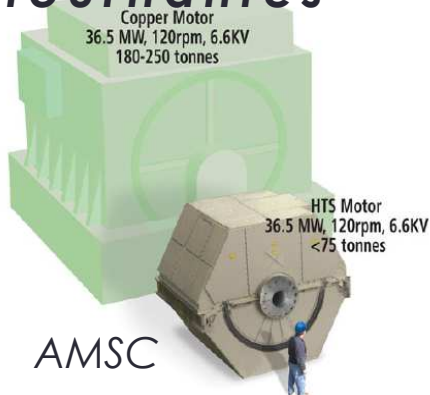
# Autres applications des supraconducteurs

## Dispositifs conventionnels

### Câbles



### Machines tournantes



## Lévitaiton



Photo Siemens



« Magnétisme  
grad B<sup>2</sup> »



# Bibliographie

- « Magnétostatique », E. Durand.
- « ElectroMagnétisme » vol, 1 et 2, R. Feynman
- « CERN ACCELERATOR SCHOOL » : mesures magnétiques , physique générale des accélérateurs, lumière synchrotron , supraconductivité.
- « Superconducting Magnets », Martin N. Wilson
- « Les Supraconducteurs », P. Tixador
- « Superconductivity of Metals and Alloys », P.G. de Gennes