

Ecole des **A**ccélérateurs

février 2016

# Aimants Supraconducteurs

Philippe Fazilleau

[philippe.fazilleau@cea.fr](mailto:philippe.fazilleau@cea.fr)



# Plan

- La **Supraconductivité**
- Les **conducteurs** « supra »
- Aimants **d'accélérateurs et détecteurs** : le **LHC**
- Aimants pour le **médical** : **NEUROSPIN**
- Aimants pour la **fusion** thermonucléaire : **ITER**
- Le **futur**... les « **HTc** »
- Autres **applications**



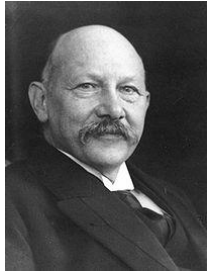
- **La Supraconductivité**
- Les **conducteurs** « supra »
- Aimants **d'accélérateurs et détecteurs** : le **LHC**
- Aimants pour le **médical** : **NEUROSPIN**
- Aimants pour la **fusion** thermonucléaire : **ITER**
- Le **futur**... les « **HTc** »
- Autres applications

# La supraconductivité

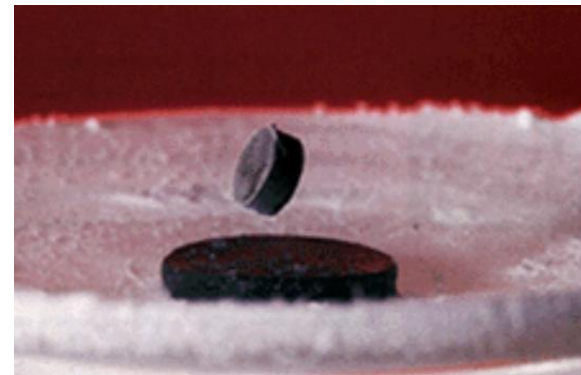
## 1) Résistivité électrique nulle ( $R=0$ )



**Gilles Holst**, étudiant de Kamerlingh Onnes publie une courte note à l'académie royale des Pays-Bas le **8 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

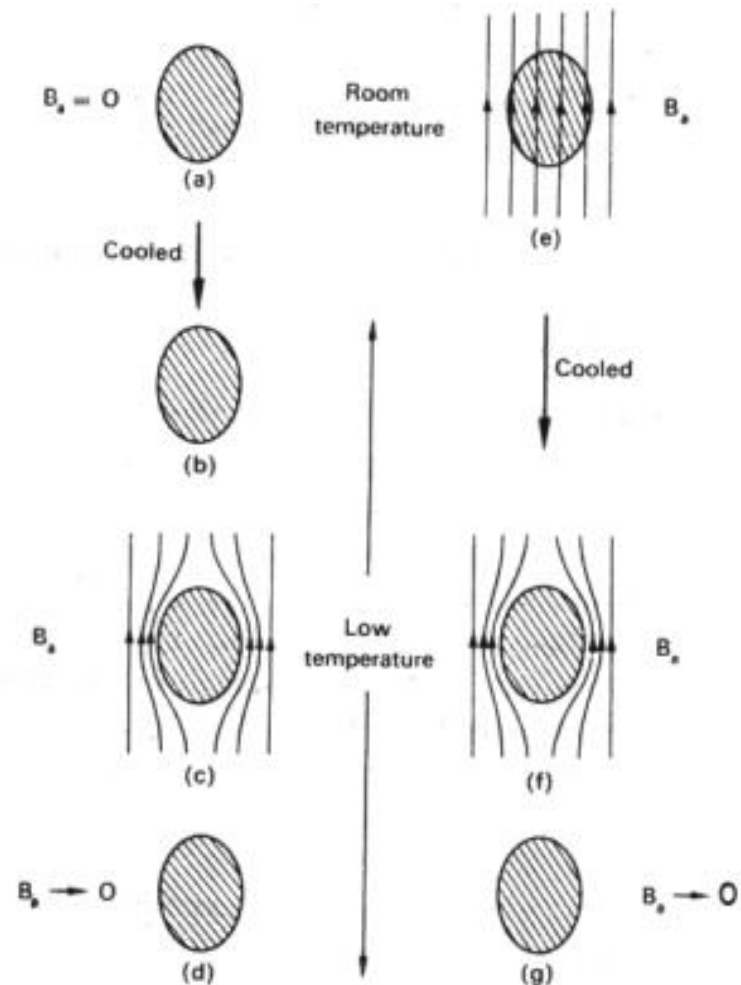
Un supraconducteur refroidi à une température inférieure à sa **température critique** et placé dans un champ magnétique expulse totalement son flux magnétique.

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.***

## Supraconducteur



# Rapide désillusion

- **Projet 10 T ...**



Superconductor	Critical temperature (K)	Critical field (mT)
In	3.41	28.7
Sn	3.72	30.9
Hg	4.15	41.2
Ta	4.48	82.9
Pb	7.18	80.4

Bobine en **plomb** (1913)    Bobine en **étain** (1913)

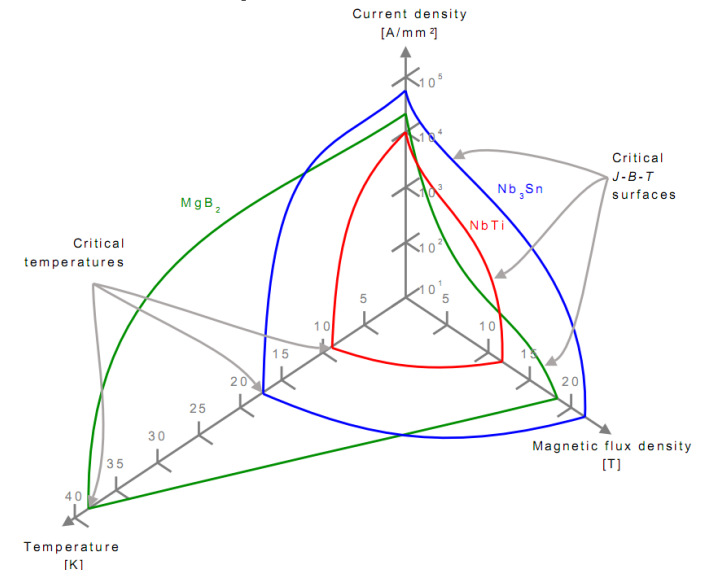
*De faibles champs magnétiques détruisent la supraconductivité*

⇒ 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

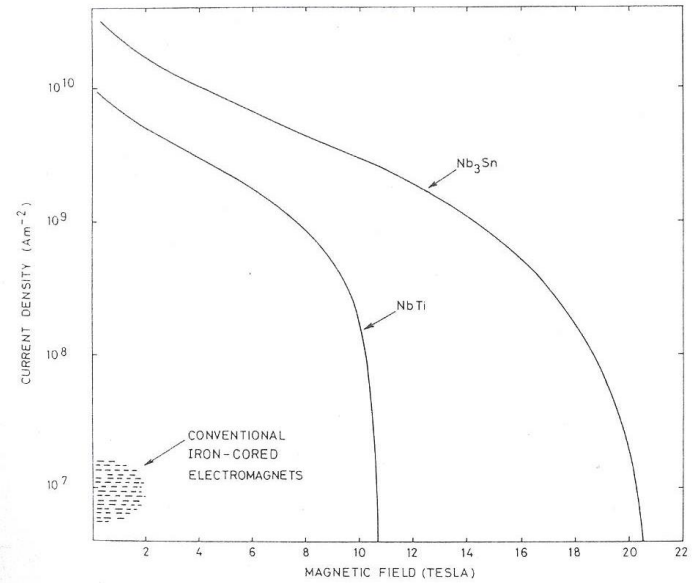
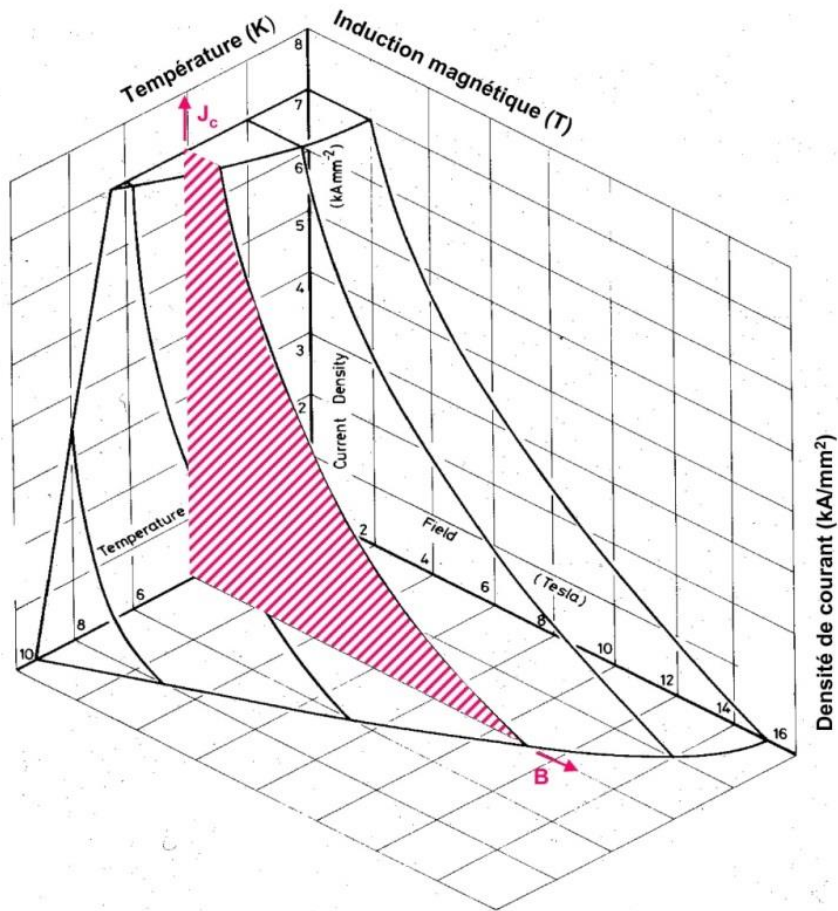
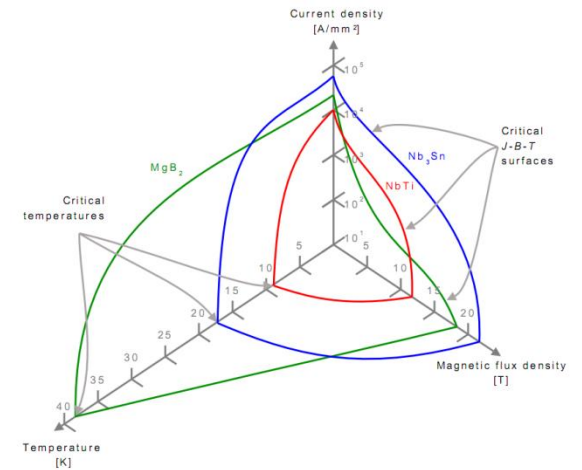
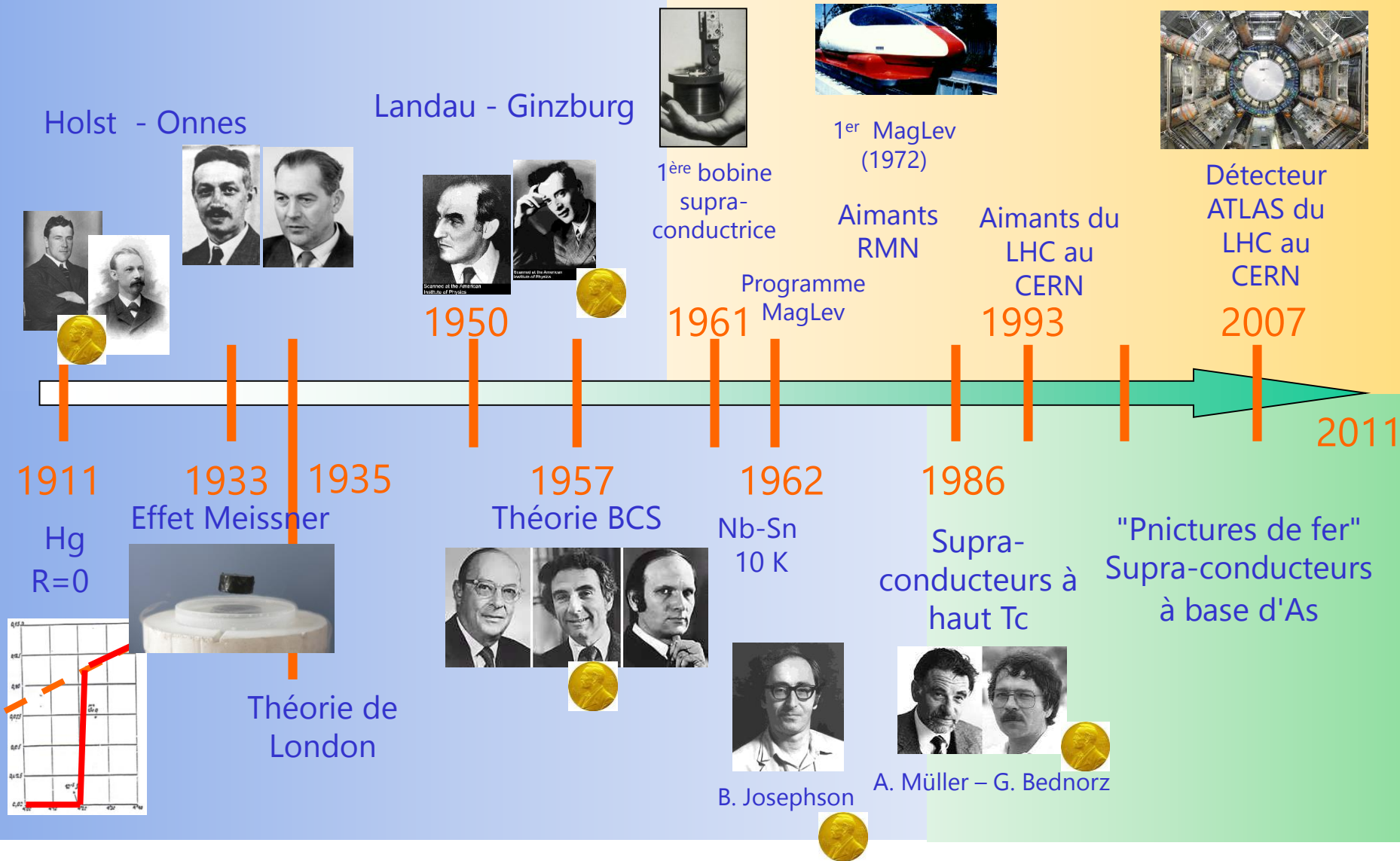


Fig. 1.2 Critical curves for the two common technological superconductors, niobium titanium and niobium tin, at a constant temperature of 4.2 K. Superconductivity prevails below the curves and normal resistivity above. Shaded area at bottom left illustrates the usual operating range for conventional electromagnets.



# 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  $\Rightarrow$  Non Supraconducteurs

Supraconducteurs  $\Rightarrow$  Mauvais métaux

Supraconducteurs sous pression

## La théorie BCS - 1957



John Bardeen



Léon Cooper



Robert Schrieffer

# Intérêt des supraconducteurs

## ❑ Fortes densités de courant sous induction

- Gain en encombrement

## ❑ Pertes nulles en continu

- Coût énergétique
- Possibilité stockage énergie (*SMES*)
- Suspension magnétique

## ❑ Transition supra-normal

- Limitation des courants de défaut (*Limiteurs de courant*)

# Supraconductivité : une industrie

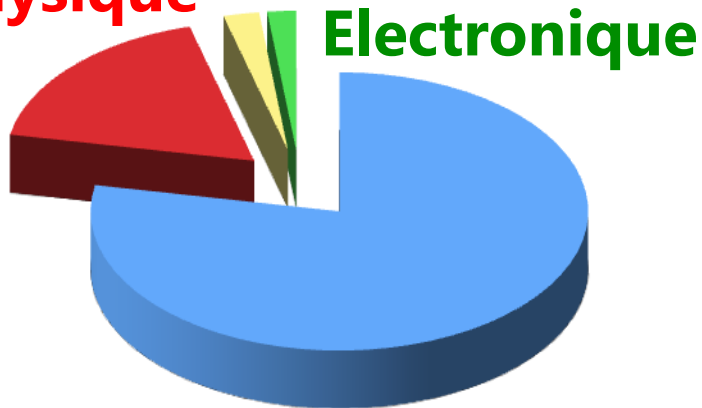
## *Marché de niche, mais marché industriel*

- ❑ **Imagerie médicale** (2500 imageurs par an, 26 000 en service)
  - Technique non invasive extrêmement utile
  - “**MRI** (Magnetic Resonance Imaging) has transformed super-conductivity from scientific laboratory to everyday use; **Superconductivity** made MRI a commercial reality” M. Parizh (Phillips).
  
- ❑ **Spectroscopie RMN haute résolution**
  - Outil d’analyse indispensable et incomparable
  
- ❑ **Fusion thermonucléaire** (ITER)
  - L’énergie du soleil comme énergie de demain
  
- ❑ **Physique des hautes énergies** (LHC)
  - Origines de l’univers

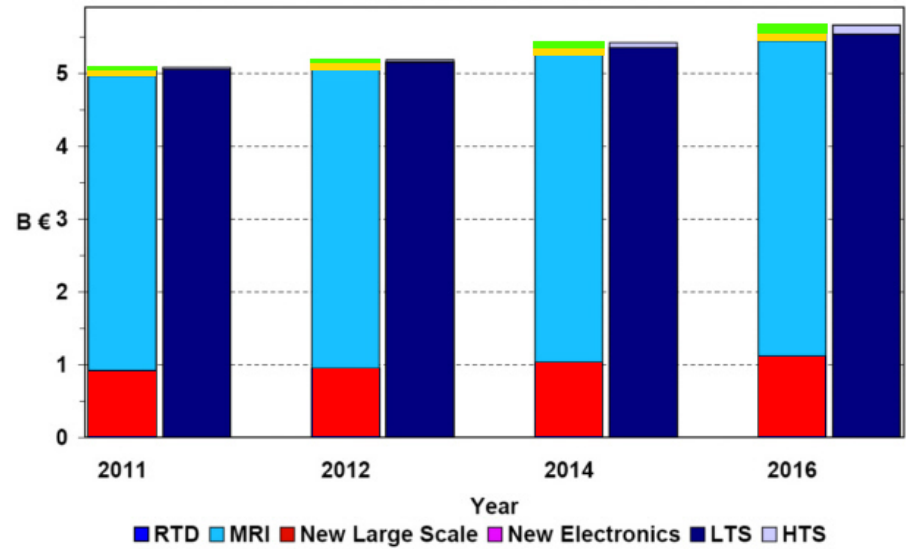


# Marché de la supraconductivité

**Instruments de physique** **Electrotechnique**



**IRM + RMN**



**Total : 5,4 Milliards € (2014)**

Prévisions de 2012 par conectus.org



- La **Supraconductivité**
- Les **conducteurs** « supra »
- Aimants **d'accélérateurs et détecteurs** : le **LHC**
- Aimants pour le **médical** : **NEUROSPIN**
- Aimants pour la **fusion** thermonucléaire : **ITER**
- Le **futur**... les « **HTc** »
- Autres applications

# Les conducteurs supra

- Notions de **stabilité** (thermique) et de **protection** (« quench »)
- **Mécanique** (Forces de Laplace  $F=I*B$ )
- **Cryogénie** (T#4 K voire 1,9 K – *rappel*  $273 K = 0^{\circ} C$ )
- **Fabrication**

# Stabilité

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

## $\Delta H$ : marge enthalpique du conducteur

Énergie volumique minimale nécessaire pour faire transiter le conducteur

### Quelques ordres de grandeur

Composite NbTi – Cu avec Cu/NbTi = 2

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

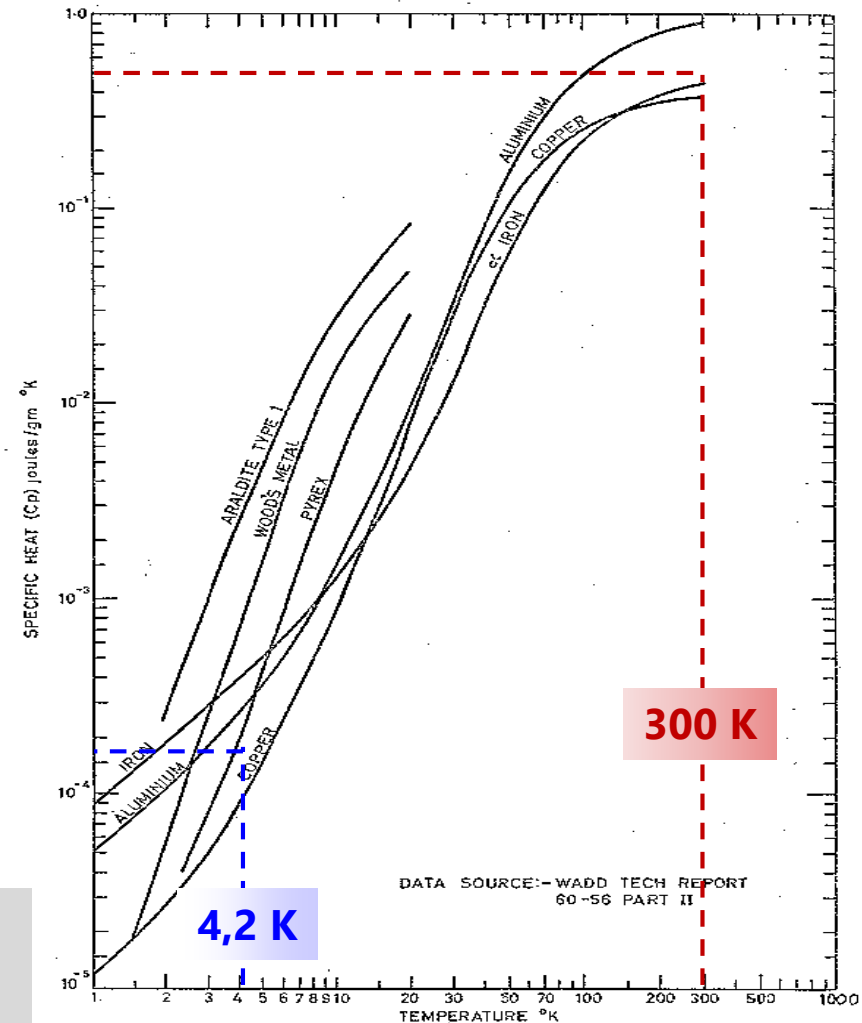
$T_0 = 1,8 \text{ K}$  et  $\Delta T = 1,2 \text{ K}$  :  $\Delta H = 500 \text{ J/m}^3$

$\Delta H \approx 1000 \text{ J/m}^3$  (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 température

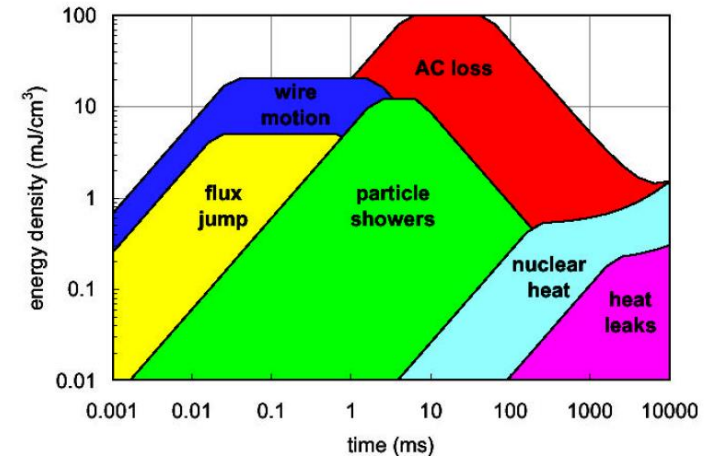
$\Delta T = T_{cs} - T_0$  : marge de température entre la température de transition de l'état supraconducteur vers l'état normal,  $T_{cs}$ , et la température de fonctionnement,  $T_0$ .



# Stabilité : 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).



## Spectre des perturbations (espace et temps)

	Distribuées et quasi-stationnaires (W/m <sup>3</sup> )	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**)

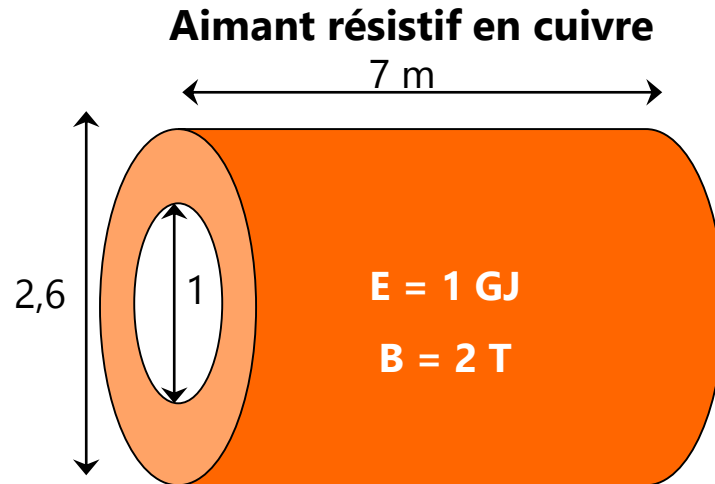
Perturbations **accidentelles** (objets des **études de stabilité**)

# Protection des aimants supraconducteurs

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



**Pourquoi doit-on protéger un aimant supraconducteur ?**



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

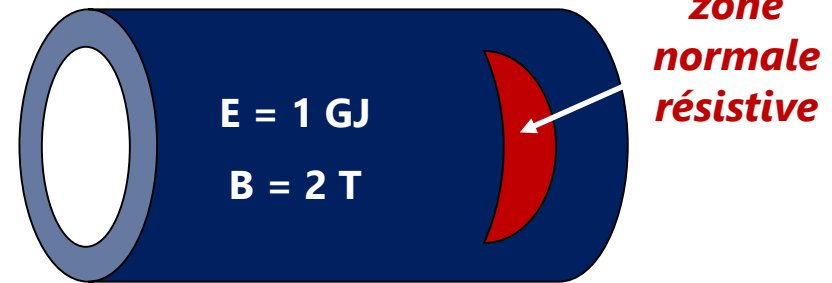
$$V_{\text{tot}} = \pi (1,3^2 - 0,5^2) 7 = 32 \text{ m}^3$$

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



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

**Aimant supraconducteur**



$$j_{\text{bob}} = j_{\text{Cu}} \times 10 \Rightarrow \text{épaisseur} / 10$$

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

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

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

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

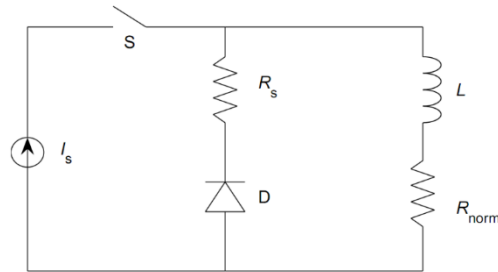


$$T = 1400 \text{ K}$$

# Schémas typiques de protection

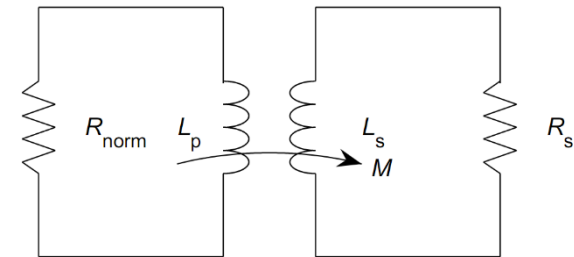
**But** : dissiper le **plus rapidement** possible et dans le **plus grand volume possible** l'énergie emmagasinée afin de diminuer la température maximale et les gradients thermiques (sources de contraintes mécaniques).

*Protection par résistance externe*

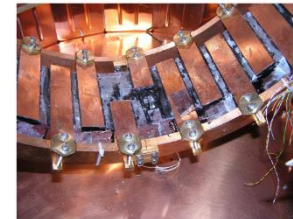
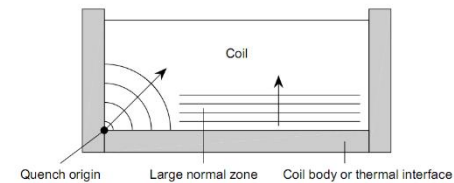


En fin de décharge, toute l'énergie électromagnétique initiale est dégradée en chaleur dans la résistance  $R_s$  (et dans  $R_{norm}$ ) :

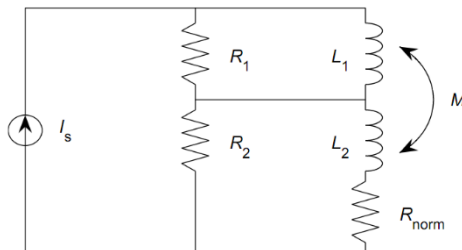
*Protection par un couplage secondaire*



*Protection par quench-back (« rétropropagation de transition »)*



*Protection par subdivision*



# Contraintes mécaniques

$$\sigma \sim JBR$$

 *Contrainte d'une boucle de rayon 200 mm, portant 150 A/mm<sup>2</sup>, dans 10 T :*

$$\sigma_q = JBR = 1.5 \cdot 10^8 * 10 * 0.2 = 300 \text{ MPa}$$

- ✓ **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.*

# Contraintes cryogéniques

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

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

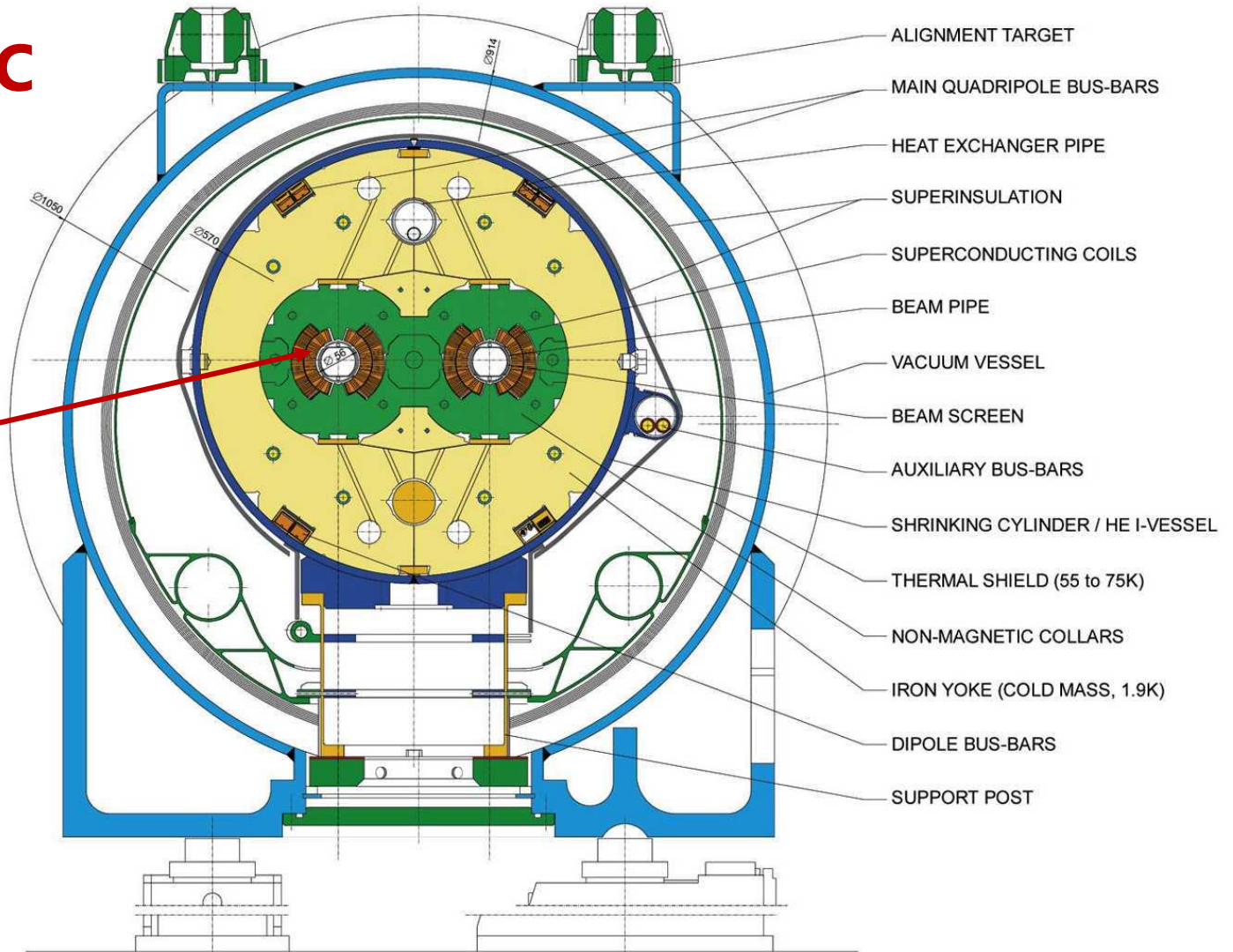
- ✓ Refroidissement **direct dans un bain**
- ✓ Refroidissement **indirect par conduction** à travers le bobinage
- ✓ **Circulation forcée d'hélium** dans le conducteur



# Refroidissement direct

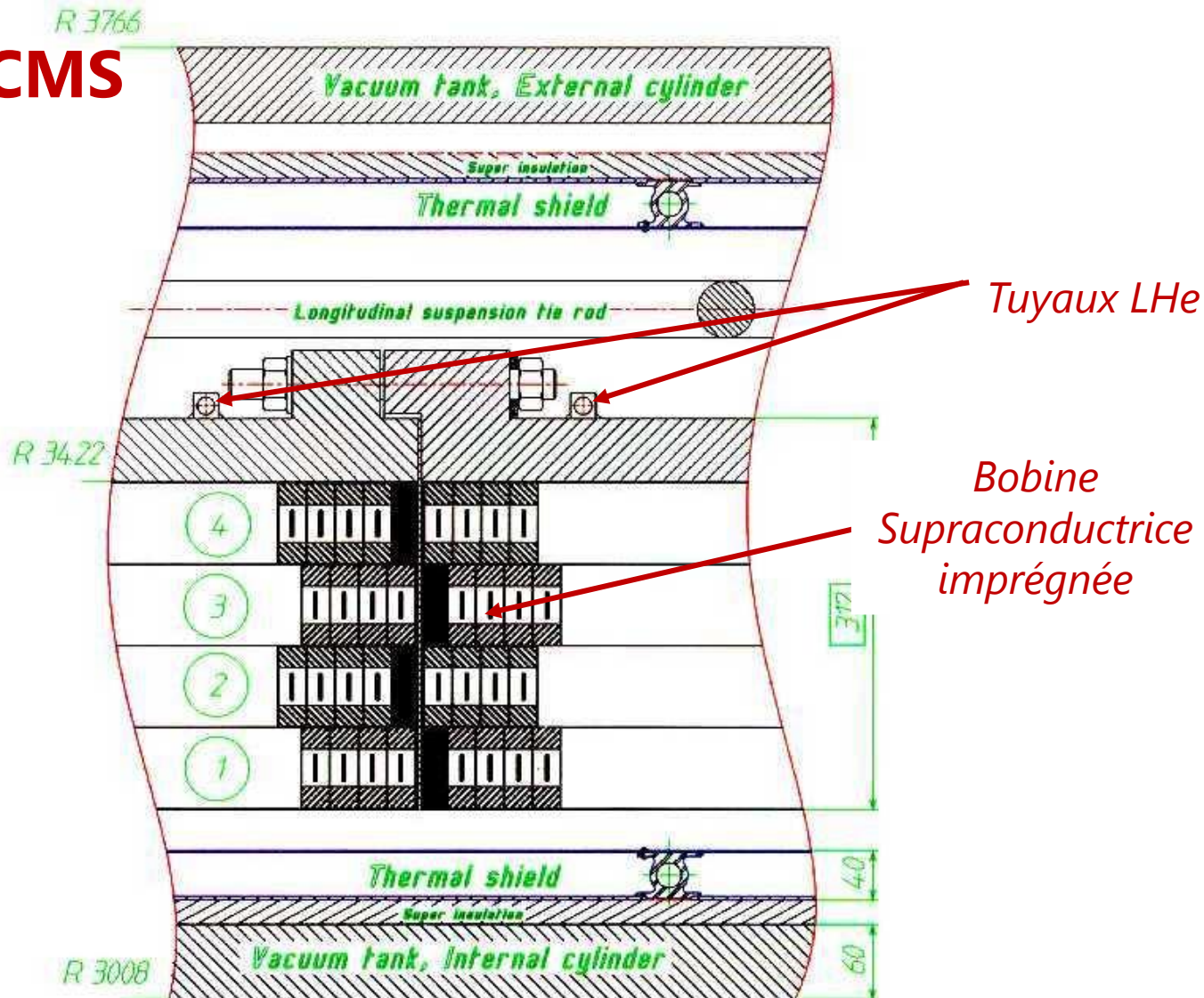
## Dipole LHC

*Aimants SC  
en bain LHe*



# Refroidissement indirect

## Solénoïde CMS

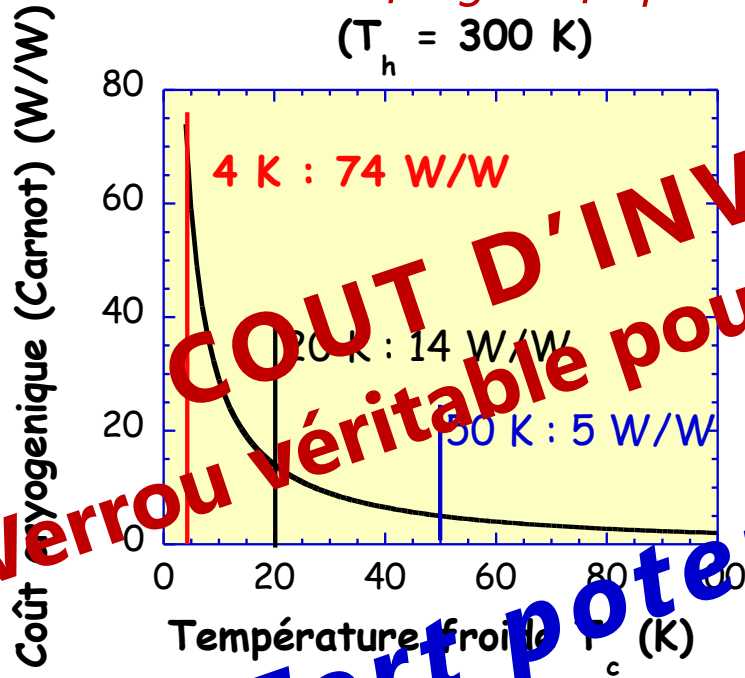


# Coûts cryogéniques

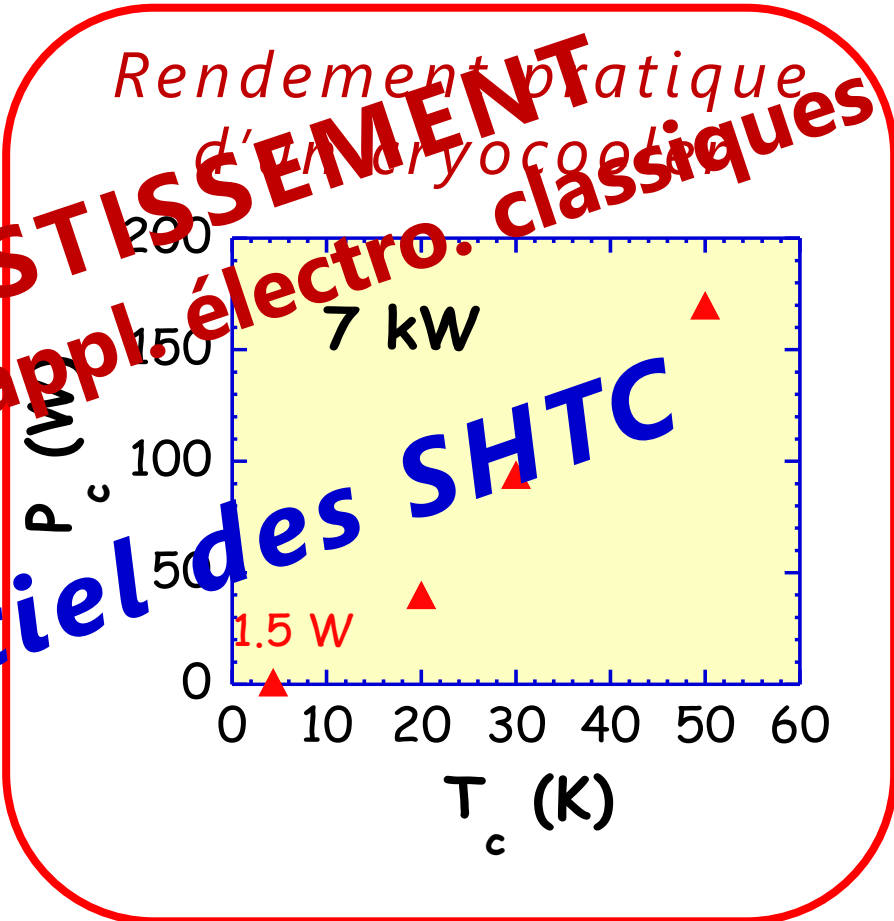
Rendement théorique  
de Carnot

Machine frigorifique

( $T_h = 300 \text{ K}$ )



Rendement pratique  
d'un cryocooler



**COÛT D'INVESTISSEMENT**  
**Verrou véritable pour appl. électro. classiques**  
**Fort potentiel des SHTC**

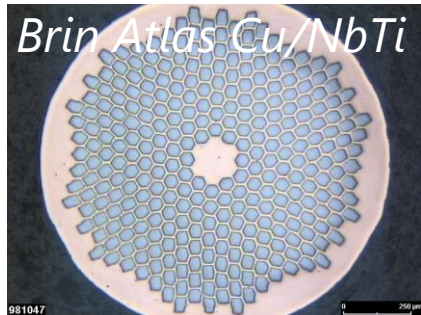
$$\left( \frac{W_{\min}}{Q_c} \right)_{\text{Carnot}} = \frac{T_h - T_c}{T_c}$$

~30k€ + 1€/h



# 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.



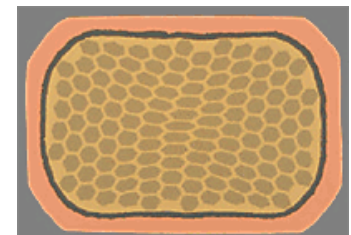
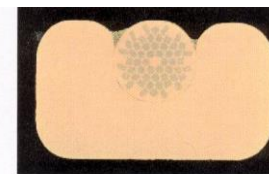
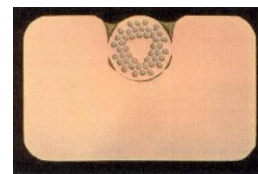
Câble Rutherford pour le dipole LHC



conducteur ATLAS



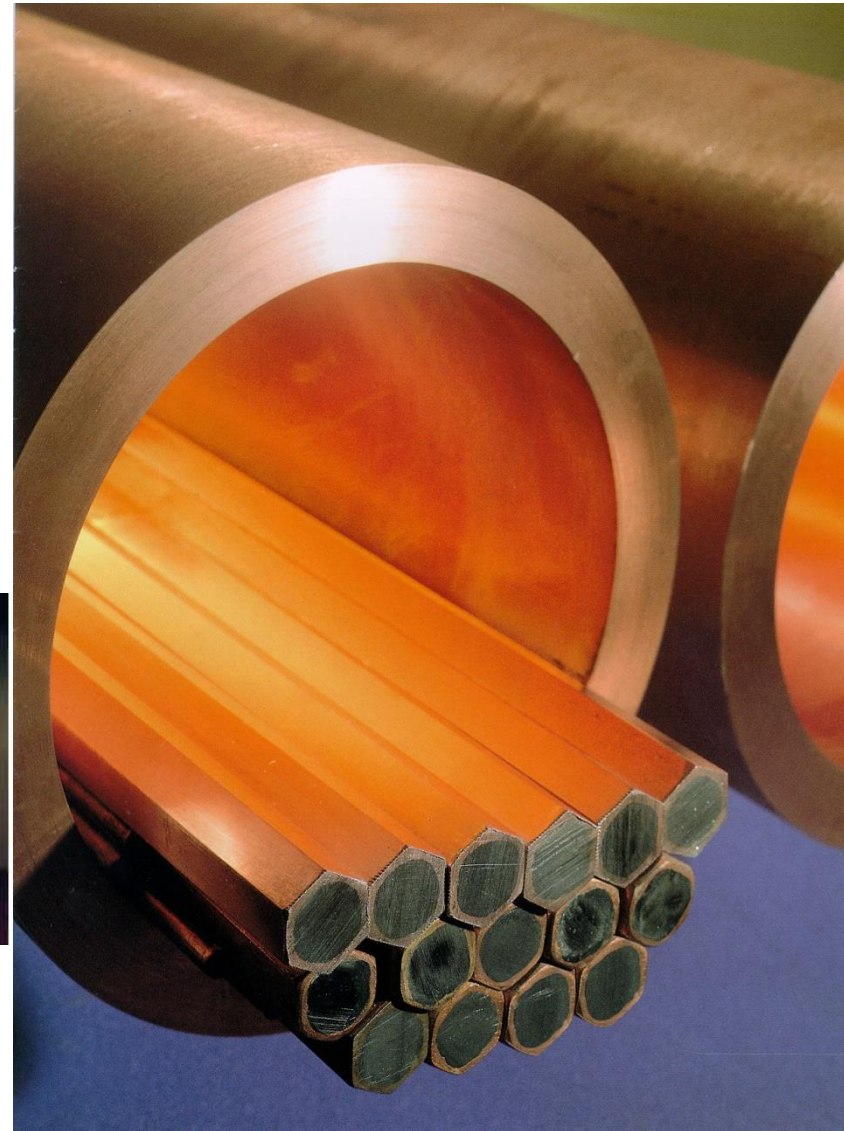
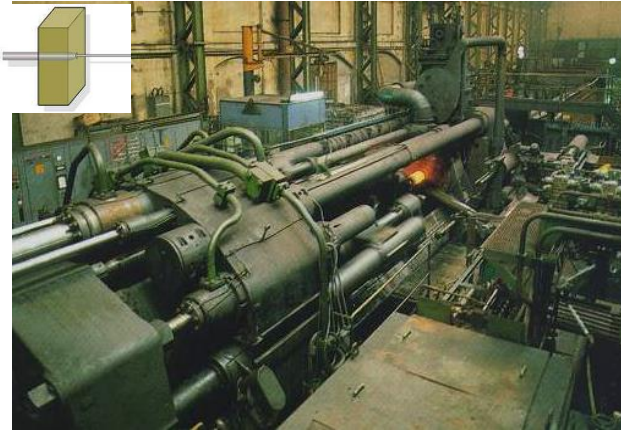
Conducteurs d'IRM-RMN



Wire in Channel

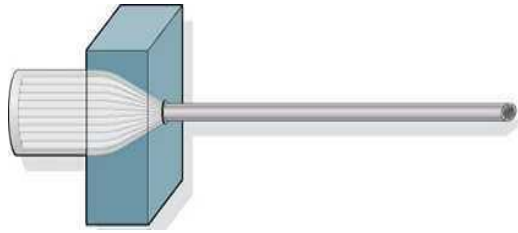
$a \times b = 1.10 \times 1.70 \text{ mm}^2 ; 2.15 \times 4.25 \text{ mm}^2$ , Cu : NbTi ratio 10 to 20

# Fabrication des biellettes

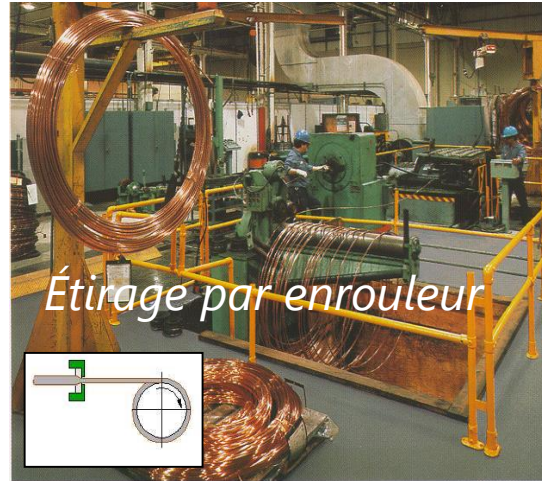




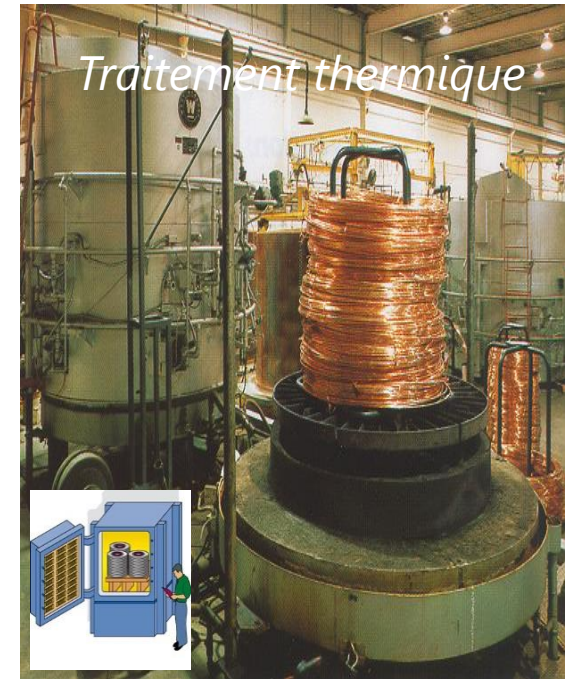
# Fabrication des brins



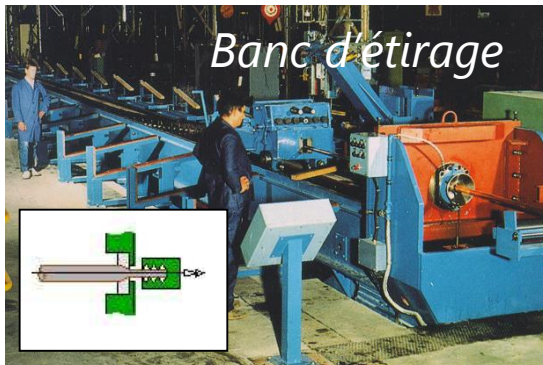
*Extrusion des billettes*



*Étirage par enrouleur*



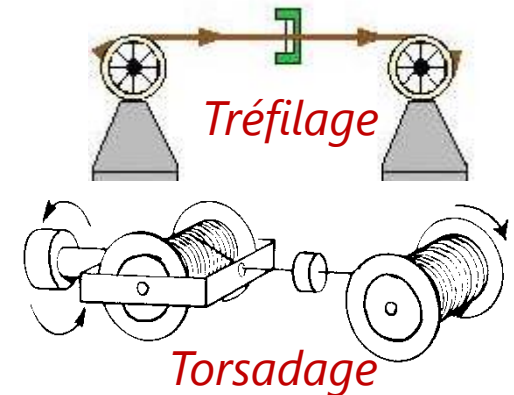
*Traitement thermique*



*Banc d'étirage*



*Stockage*

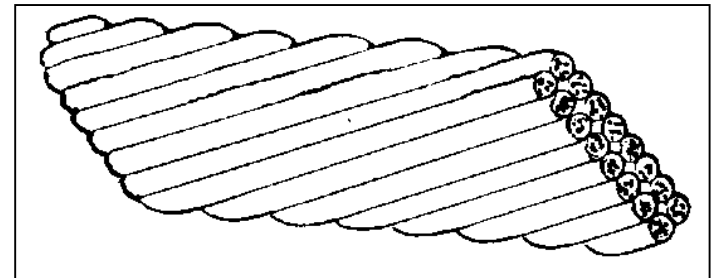
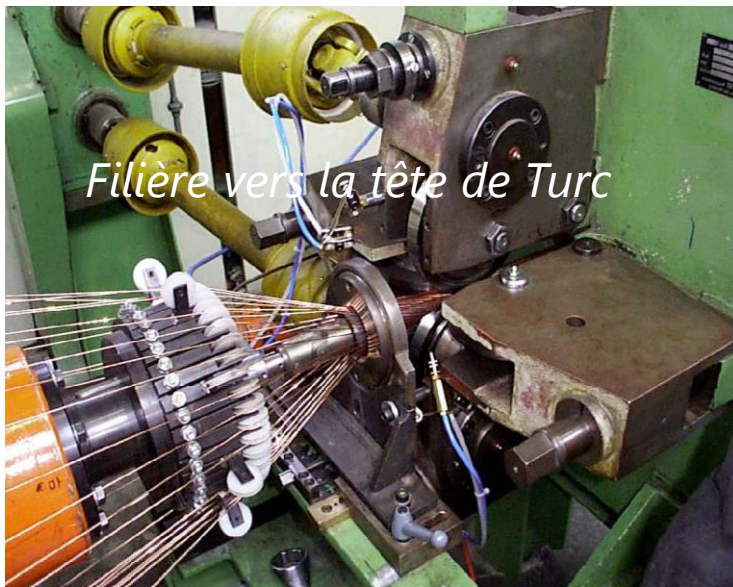
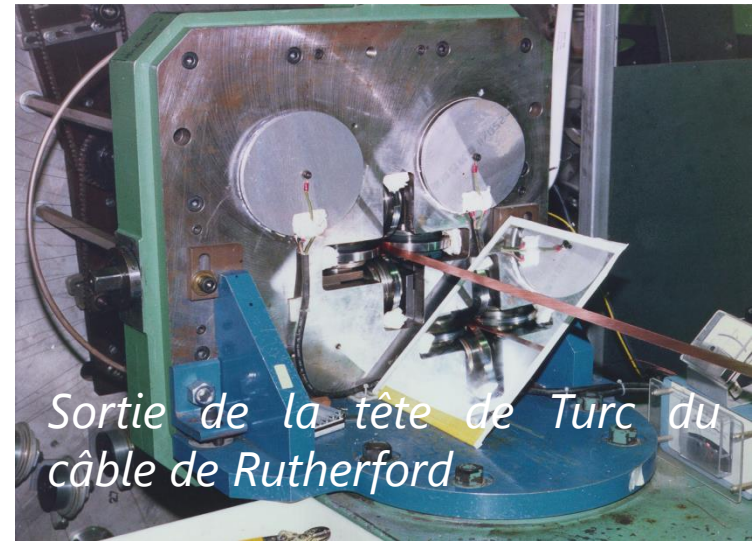


*Tréfilage*

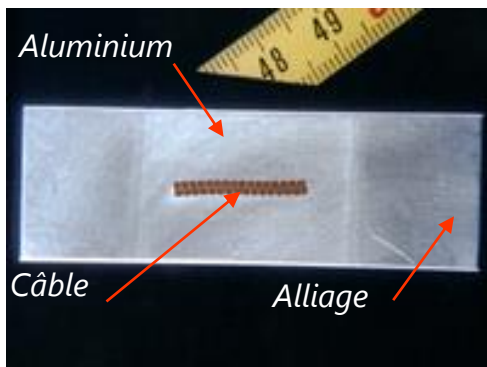
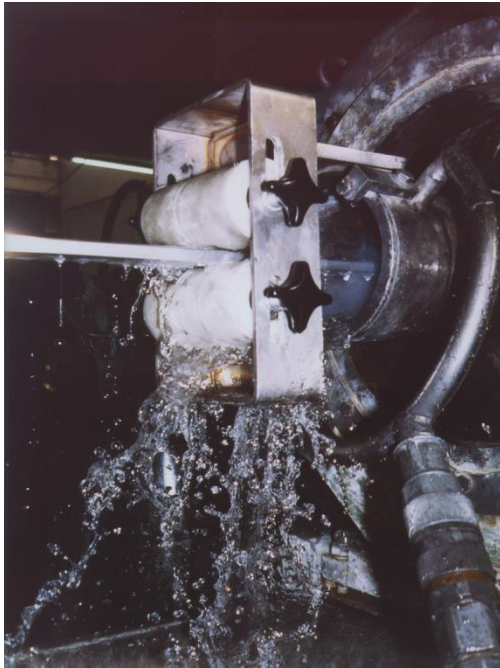
*Torsadage*



# Fabrication du câble



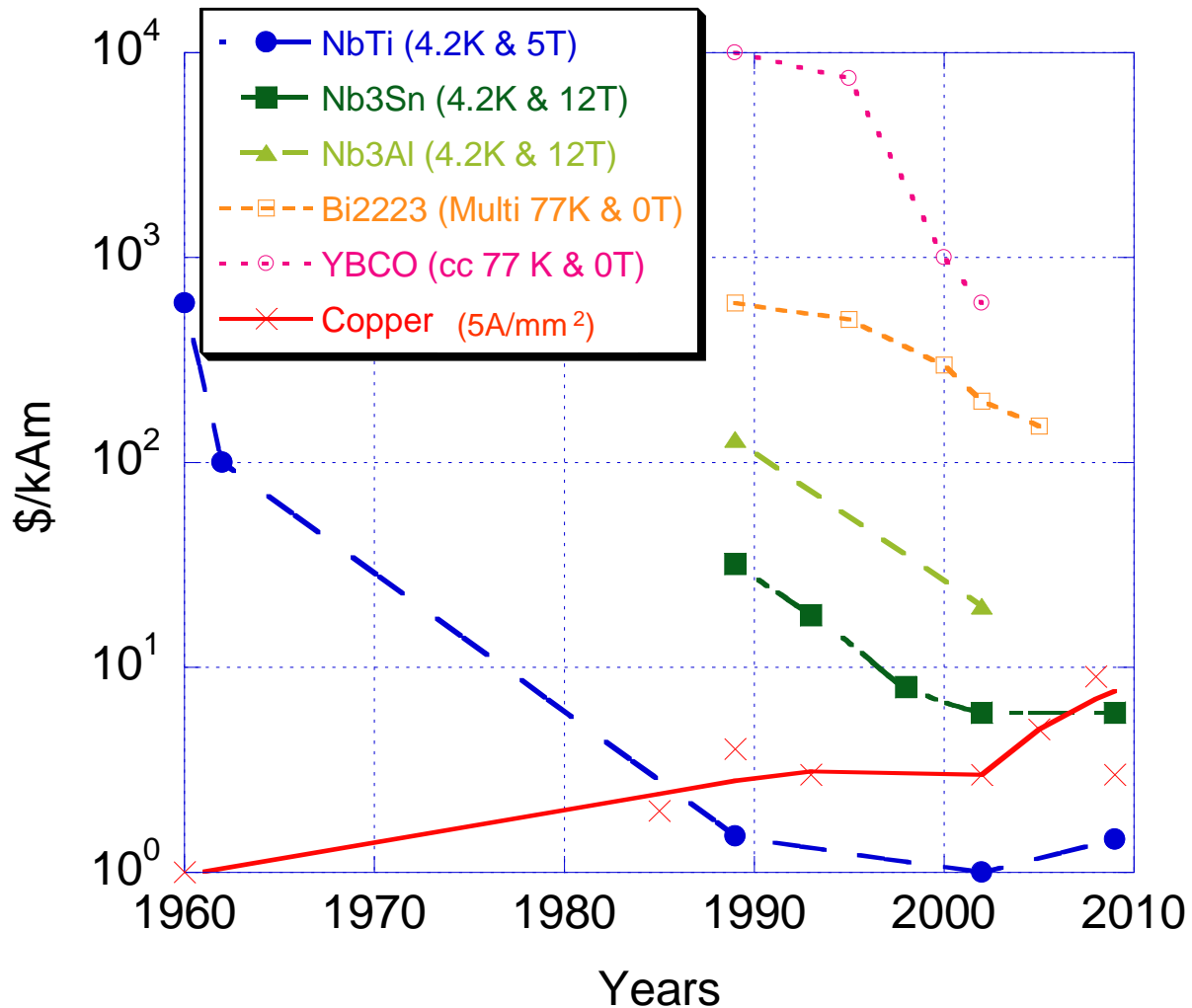
# Fabrication du conducteur





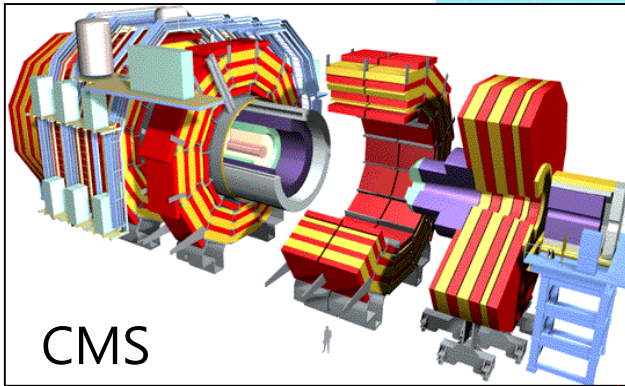
# Coût des câbles supraconducteurs

**US\$ 150/kg** ↔ **~1 \$/kAm**

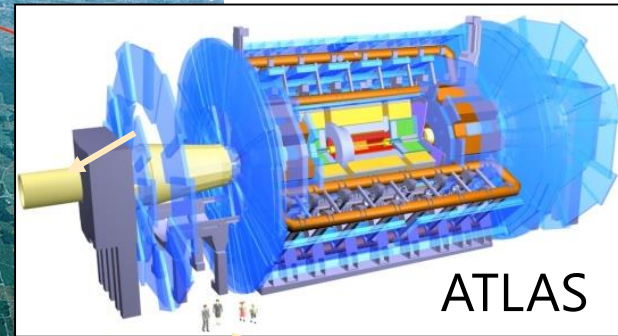


- La **S**upra**c**onductivité
- Les **c**onducteurs « supra »
- **A**imants **d'**accélérateurs et détecteurs : le **LHC**
- Aimants pour le **m**édical : **NEUROSPIN**
- Aimants pour la **f**usion thermonucléaire : **ITER**
- Le **f**utur... les « **HTc** »
- Autres applications

# Gigantesques Instruments Supra: Le LHC



**Découverte du boson de Higgs  
Juillet 2012**



**7000 km de câble NbTi**

**23 km d'aimants SC :**

1232 dipôles,  
474 quadripôles,  
7612 bobines de corrections.

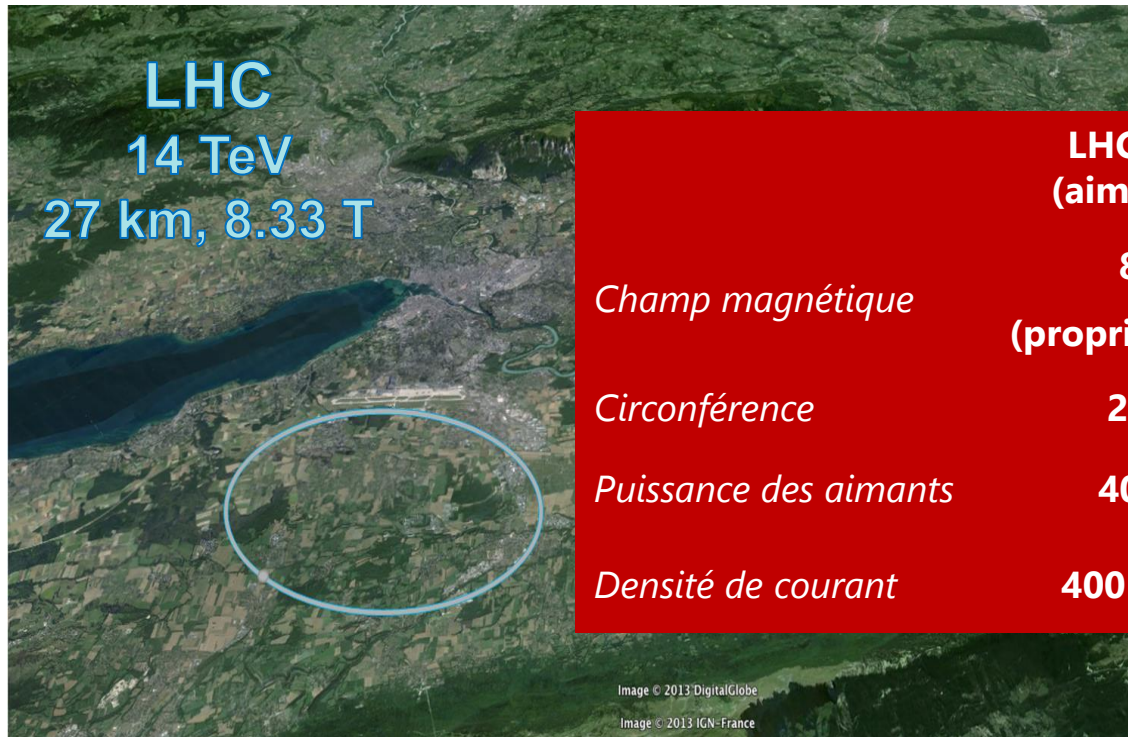


*Refroidissement à 1,9 K en He superfluide.*

# Supraconductivité et aimants d'accélérateurs

$$E[\text{TeV}] = 0,3 \times B[\text{T}] \times r[\text{km}]$$

Energie du faisceau      Champ magnétique      Rayon de courbure

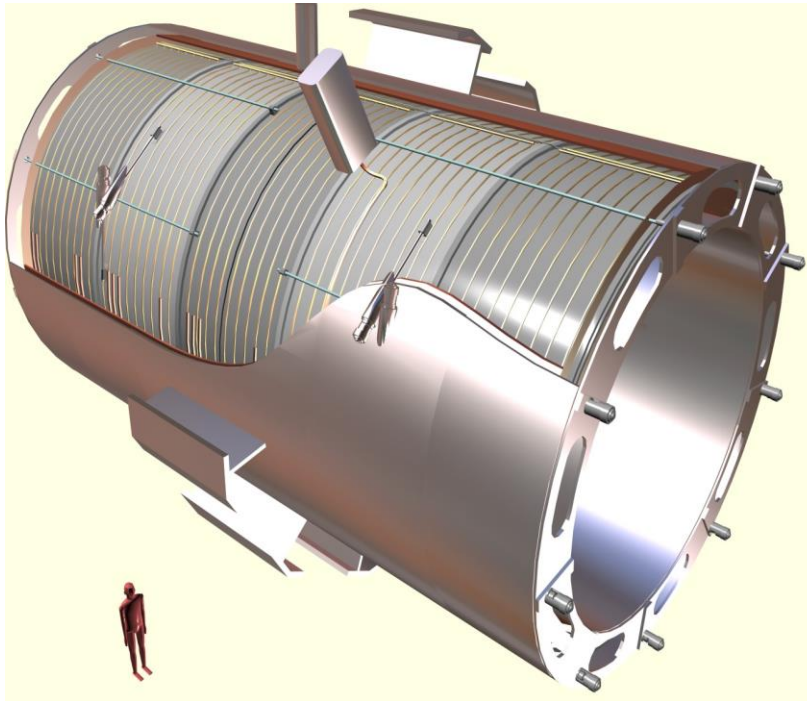


	LHC actuel (aimants SC)	LHC à aimants résistifs
Champ magnétique	8.3 T (propriétés NbTi)	1.8 T (fer)
Circonférence	27 km	125 km
Puissance des aimants	40 MW	900 MW
Densité de courant	400 A/mm <sup>2</sup>	10 A/mm <sup>2</sup>

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

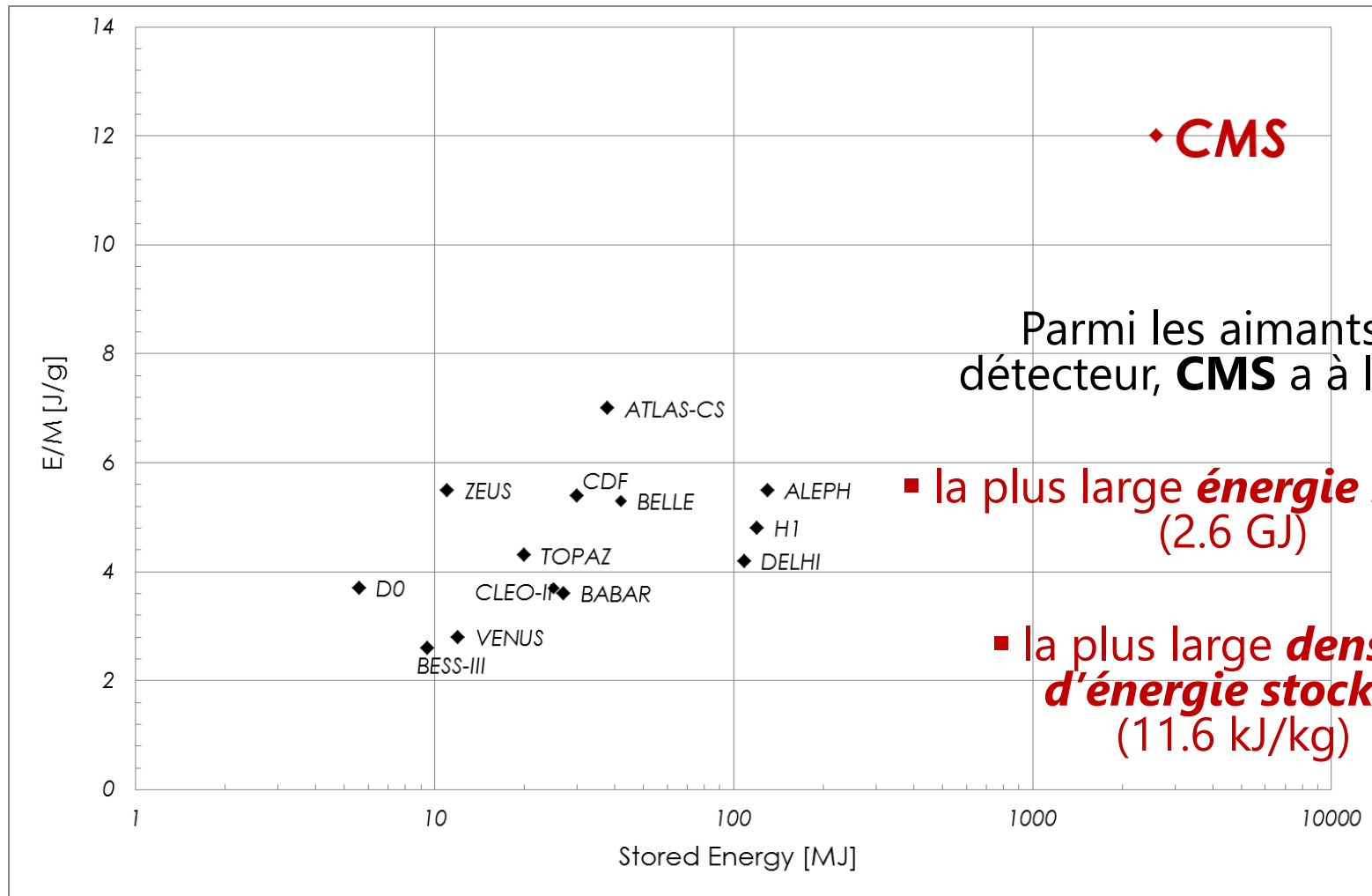


# Solénoïde CMS (Compact Muon Solenoid)



<b>Champ Magnétique Central</b>	<b>4.0 T</b>
<b>Champ « Maximum »</b>	<b>4.6 T</b>
Ampères tours totaux	42-51 MAt
<b>Courant nominal</b>	<b>19500 A</b>
<b>Énergie stockée</b>	<b>2.67 GJ</b>
<b>Longueur magnétique</b>	<b>12,5 m</b>
<b>Diamètre moyen du bobinage</b>	<b>6,6 m</b>
Épaisseur du bobinage	262 mm
Épaisseur du cylindre support	50 mm
<b>Masse froide totale</b>	<b>225 tonnes</b>

# Energie de CMS

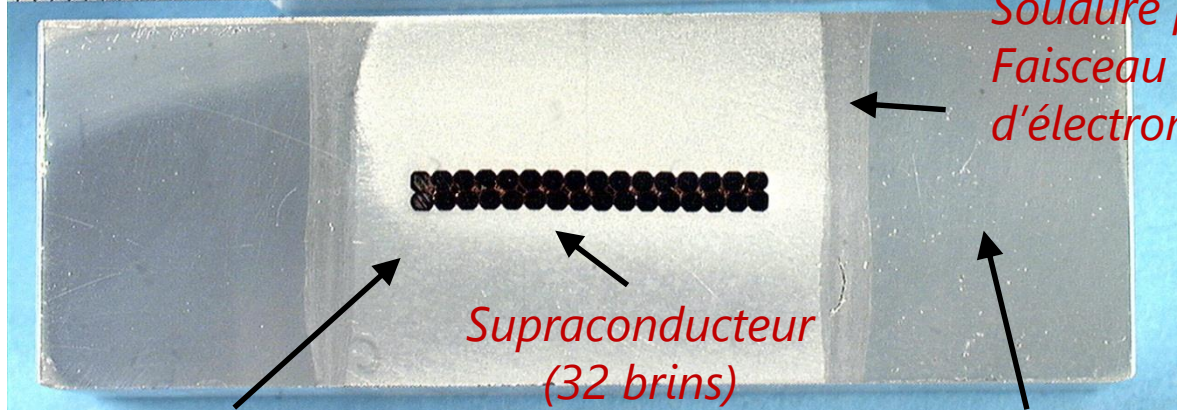
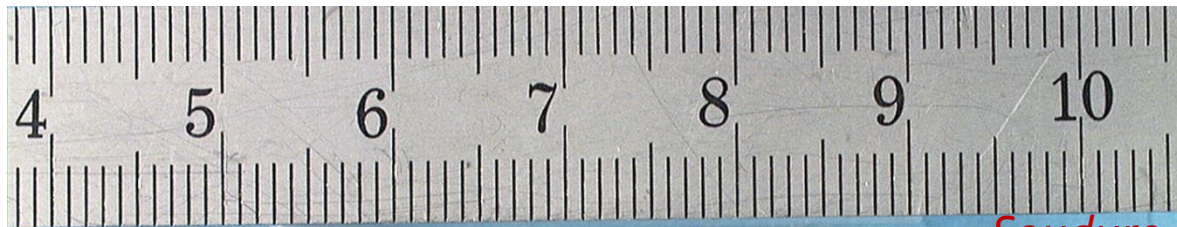


Parmi les aimants de détecteur, **CMS** a à la fois :

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

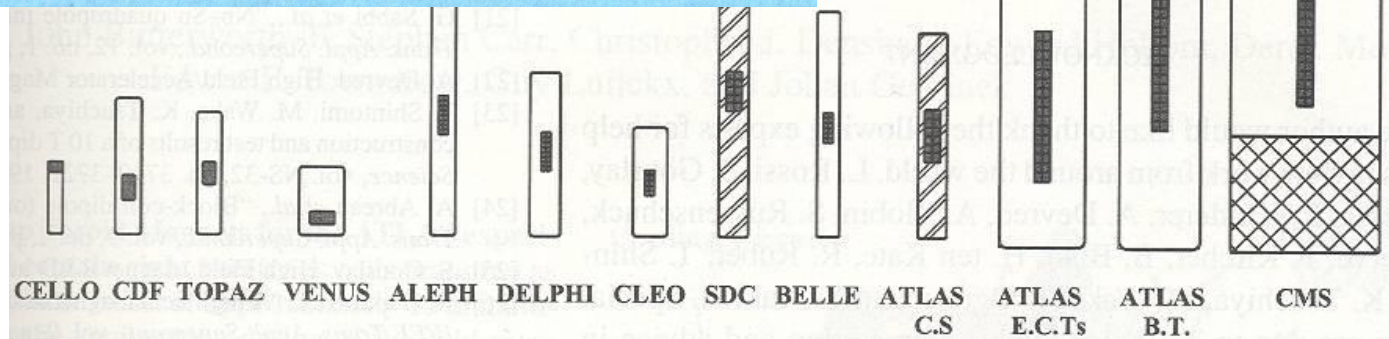
▪ la plus large **densité d'énergie stockée** (11.6 kJ/kg)

# Conducteur du solénoïde CMS



*Stabilisant thermique:  
Aluminium très haute  
pureté: 99.998%*

*Renfort mécanique:  
Alliage d'aluminium 6082  
T5*



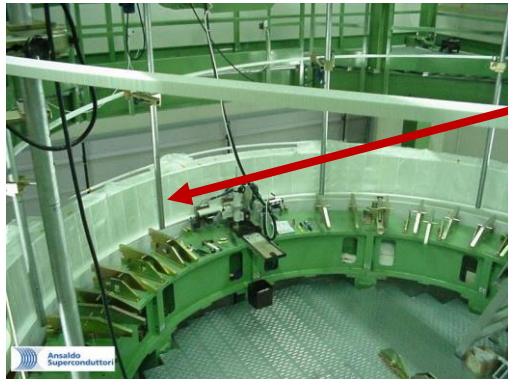


# Réalisation des modules



*Polymérisation  
CB-1*

*Finition CB0*

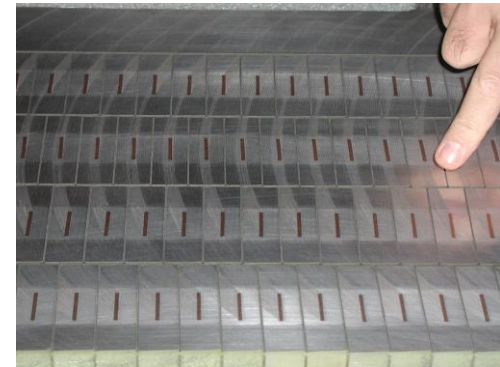


*Bobinage  
CB+1*

*Réalisation  
cylindre CB+2*



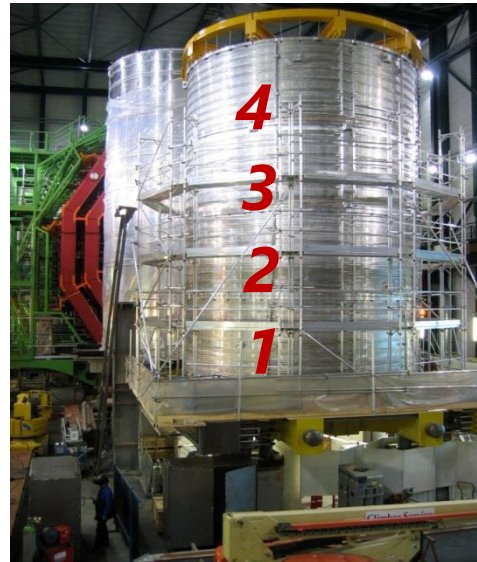
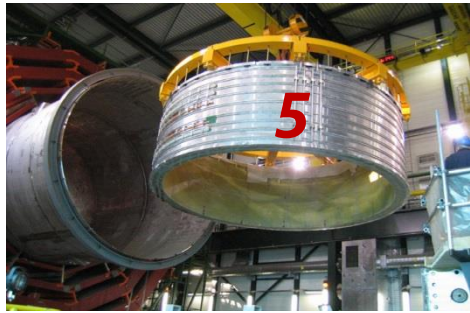
*Coupe du bobinage*



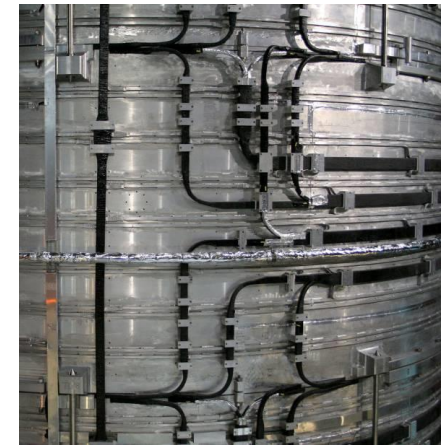


# Assemblage

*Assemblage vertical de la bobine :  
permet un couplage mécanique  
précis*



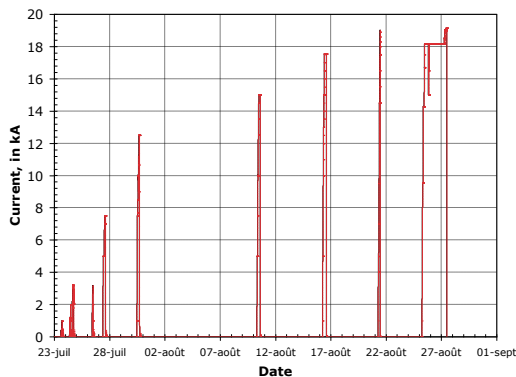
*Jonctions*



*Retournement et insertion*

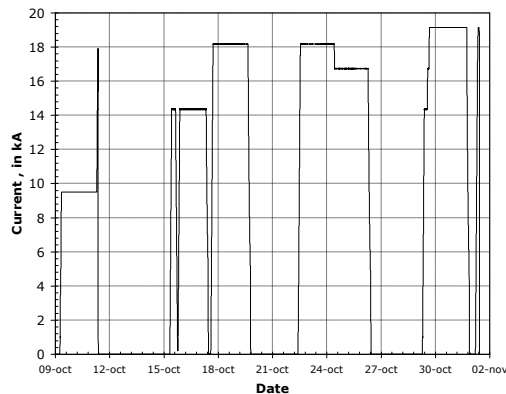


# Tests



## 1<sup>ère</sup> campagne

- 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

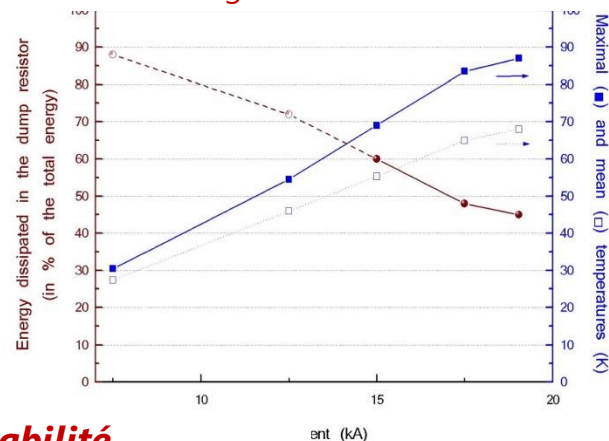


## 2<sup>ème</sup> campagne

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

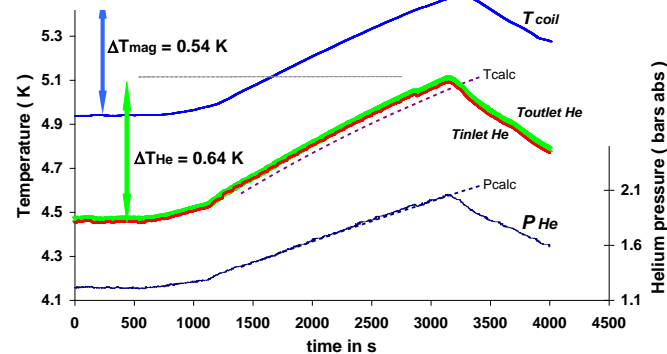
## Protection

- Pas de transition naturelle, mais effet de quench-back au dessus de 7,5 kA
- Au courant nominal,  $T_{max} = 85$  K, 45 % de l'énergie stockée est extraite



## Stabilité

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

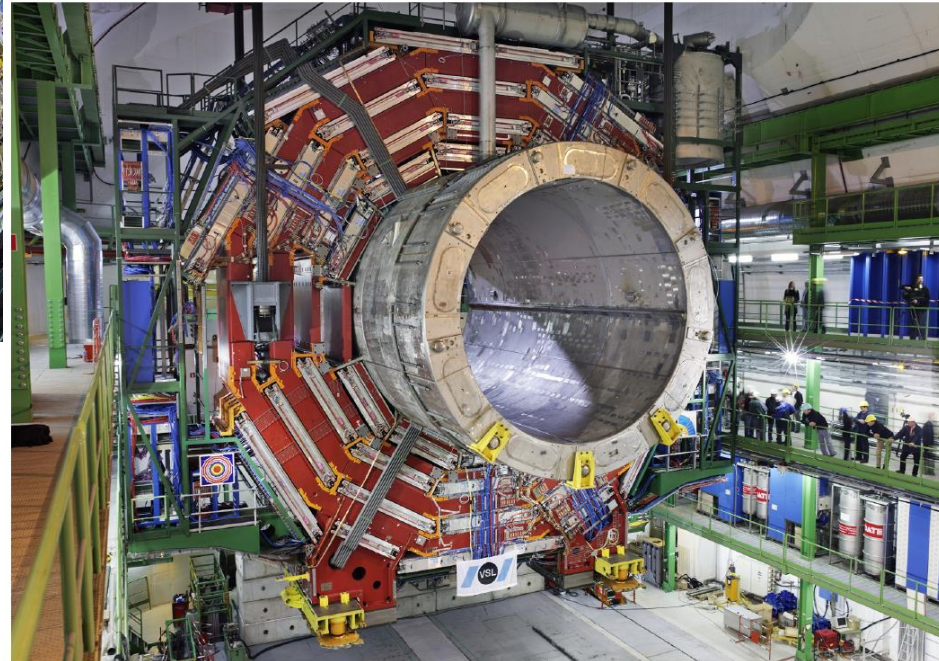




# Descente de la bobine en caverne



*Début de la descente*

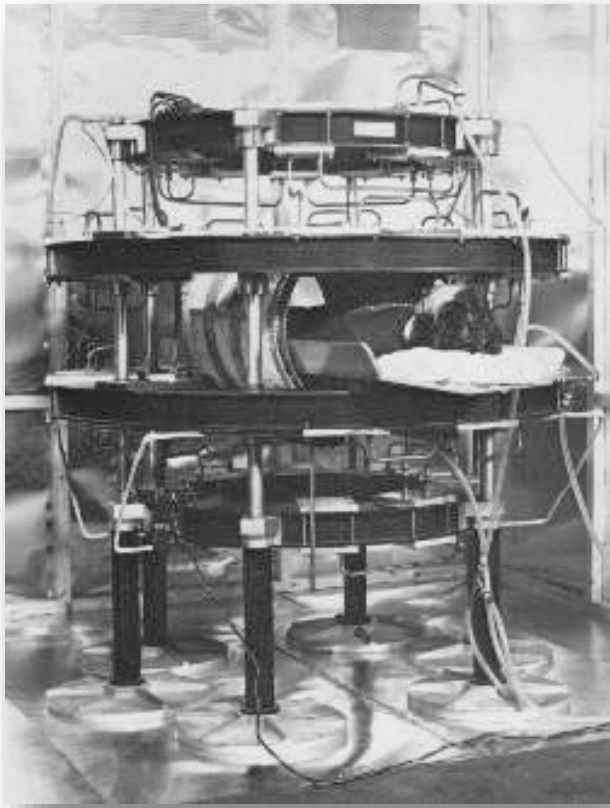


YB0 landing in the CMS experiment hall

*Atterrissage en caverne ....  
10 h après*

- La **Supraconductivité**
- Les **conducteurs** « supra »
- Aimants **d'accélérateurs et détecteurs** : le **LHC**
- Aimants pour le **médical** : **NEUROSPIN**
- Aimants pour la **fusion** thermonucléaire : **ITER**
- Le **futur**... les « **HTc** »
- Autres applications

# I.R.M., une technique récente



**Les premiers essais datent des années 70**

# Aimants d'IRM et RMN

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

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

**Le corps humain est composé à plus de 60% d'hydrogène.**

**L'IRM est l'imagerie du noyau de l'atome d'hydrogène : un proton.**

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

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

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

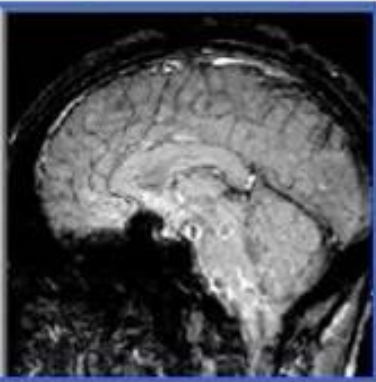
La qualité du signal RMN est relié :

- ✓ **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** :  $\varnothing 5\text{mm} \times \text{H}10\text{mm}$  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)

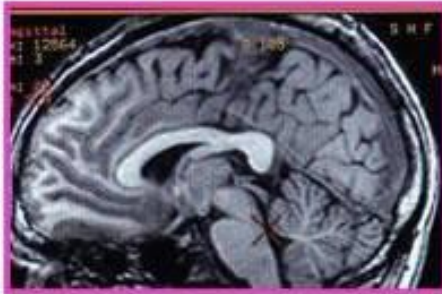


# Influence de la valeur du champ – IRM

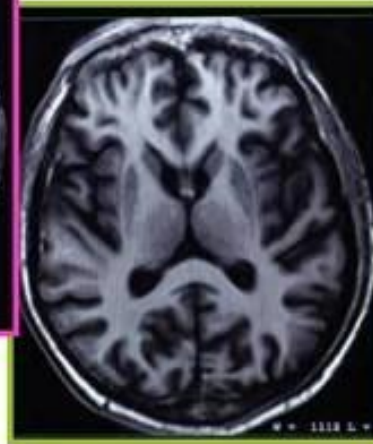
0.23 T



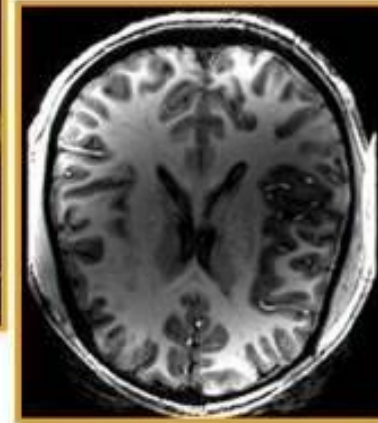
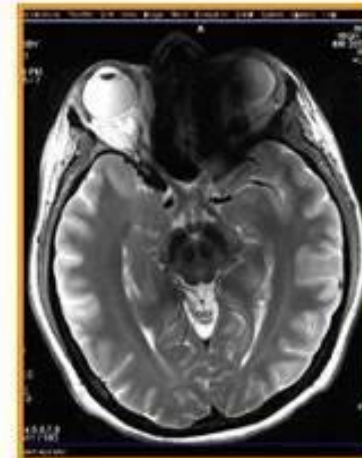
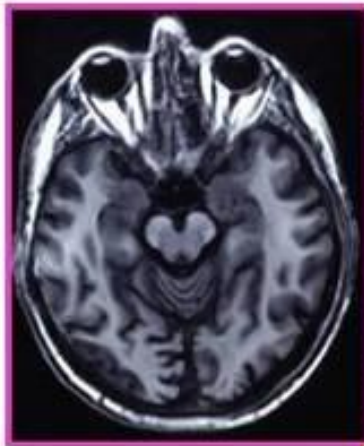
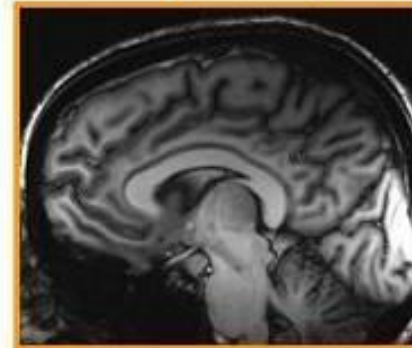
1.5 T



3 T

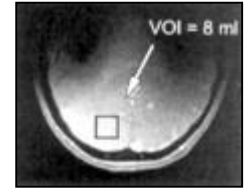


7 T

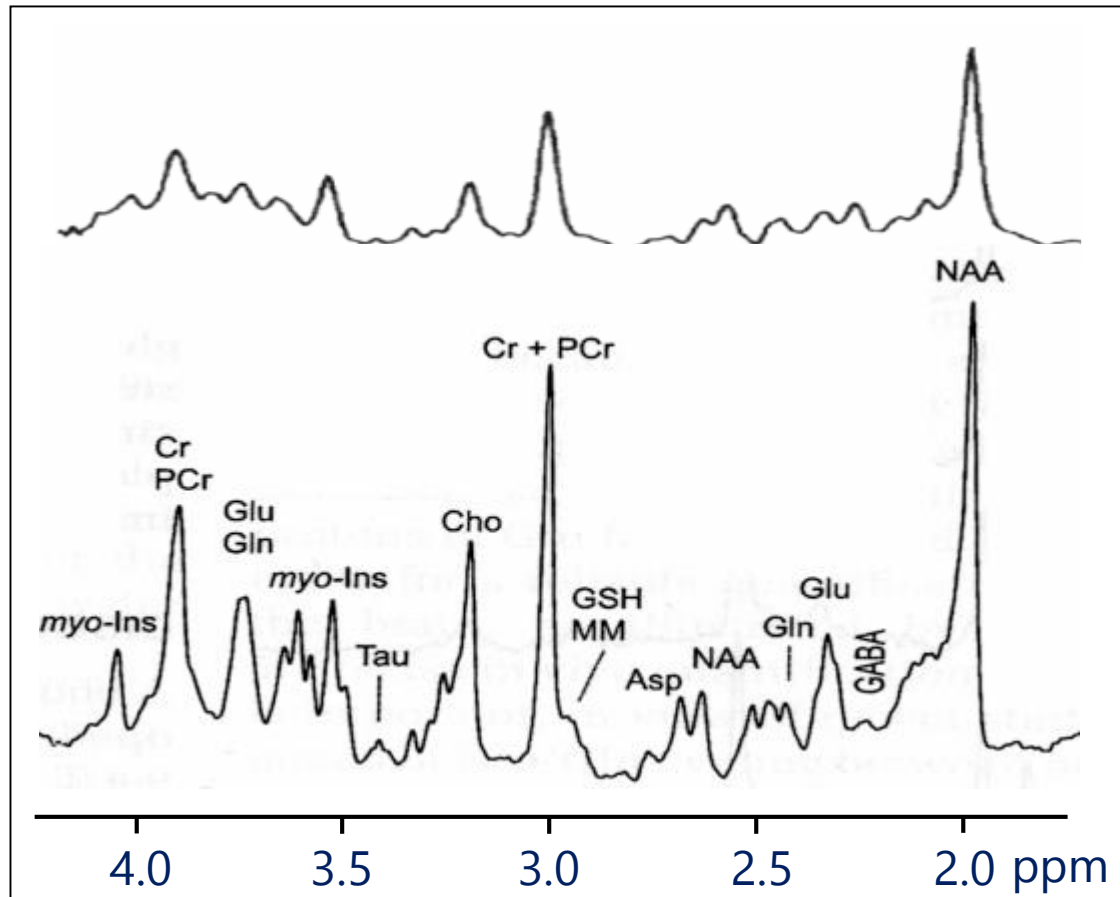


# Résolution spectrale - RMN

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



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



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



# Quelques précautions ...



# Caractéristiques d'un système IRM

La **résonance du proton** est utilisé.

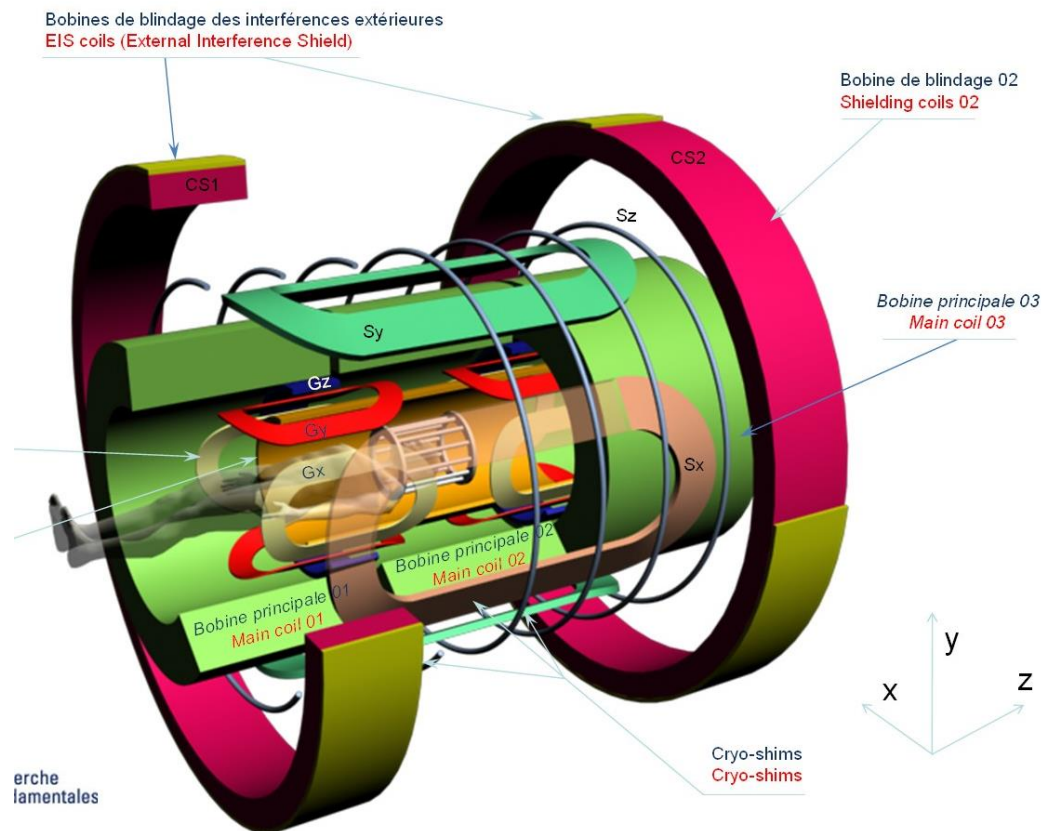
Pour produire une image des **bobines additionnelles** sont nécessaires pour produire un gradient contrôlé d'environ  $10^{-3}$  du champ principal. Ce bobinage de **gradient** doit être écrané pour éviter les courants induits dans le cryostat.

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

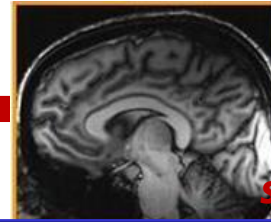
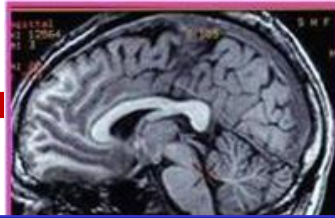
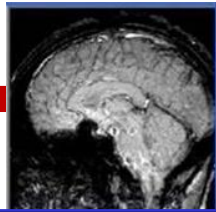
**L'aimant est shimé** avec des pièces en acier doux et/ou des petites bobines résistives ou supra pour prendre en compte toutes les sources locales de perturbations magnétiques.

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



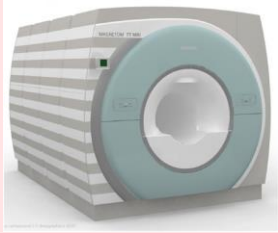
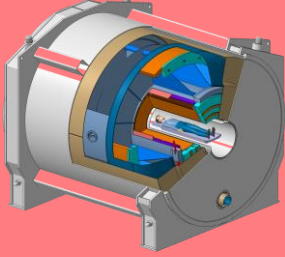
## Les « bobinages » d'un IRM



# IRM « corps entiers » typiques



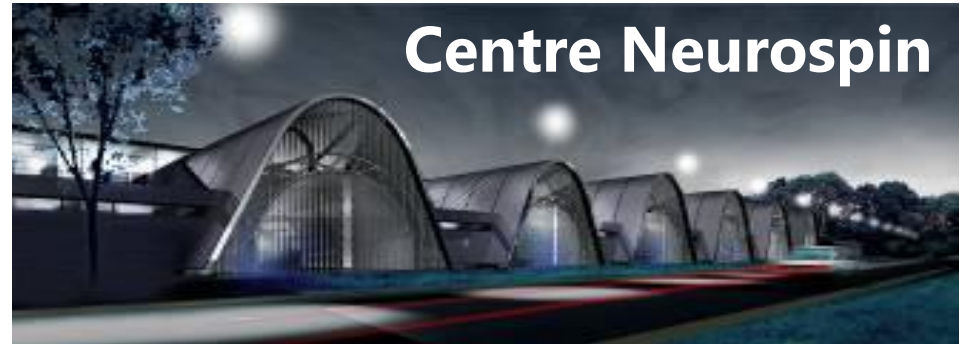
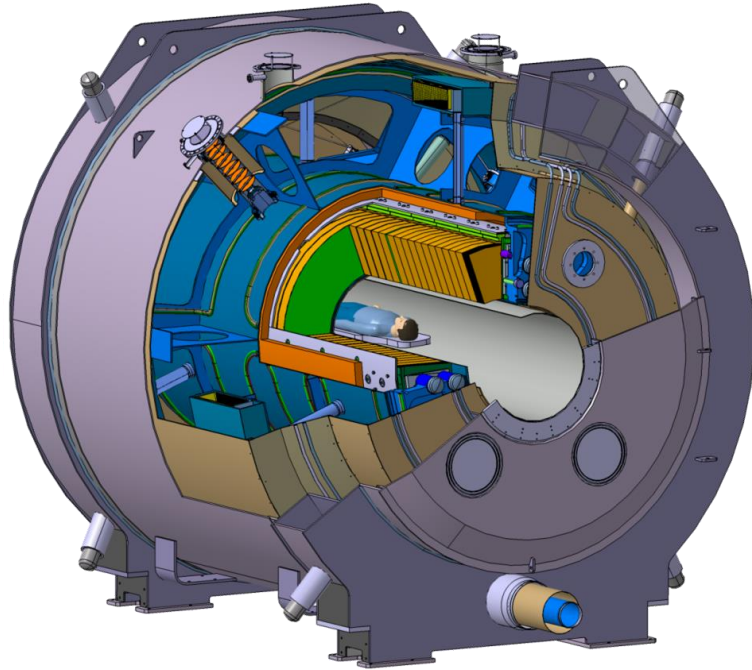
Augmentation de la  
résolution  
spatiale et temporelle

Champ	1,5 T	3 T	7 T	11,7 T
				
	<i>GE-SHFJ/CEA</i>	<i>Siemens</i>	<i>Siemens</i>	<i>Iseult</i>
<i>Longueur (m)</i>	1,25 - 1,7	1,6 - 1,8	~ 3	4
<i>Diamètre (m)</i>	1,9 - 2,1	1,90 - 2,1	> 2,50	4,6
<i>Poids (tonnes)</i>	~ 5	~ 8	~ 25	~ 125

**1 tesla = 10 000 gauss – Champ magnétique terrestre à Paris = 0,5 gauss**

# Aimant « Iseult » 11,7 T Corps entier

Neurosciences (cea/drif#dsm+dsv)

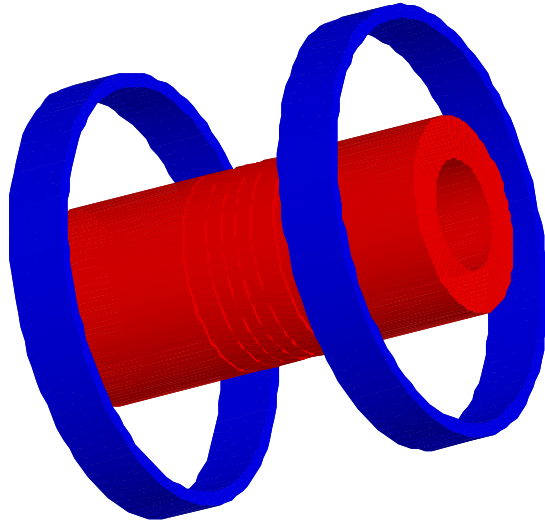


## Objectifs, observer :

- ✓ 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

Operating current

Temperature margin

Winding volume (Cable + Hell + Spacers)

Winding pack length

Winding inner diameter

Winding outer diameter

Current density inside winding

Estimated magnet weight

**338 MJ**

1483 A

1 K

**9.7 m<sup>3</sup>**

4.m

1.m

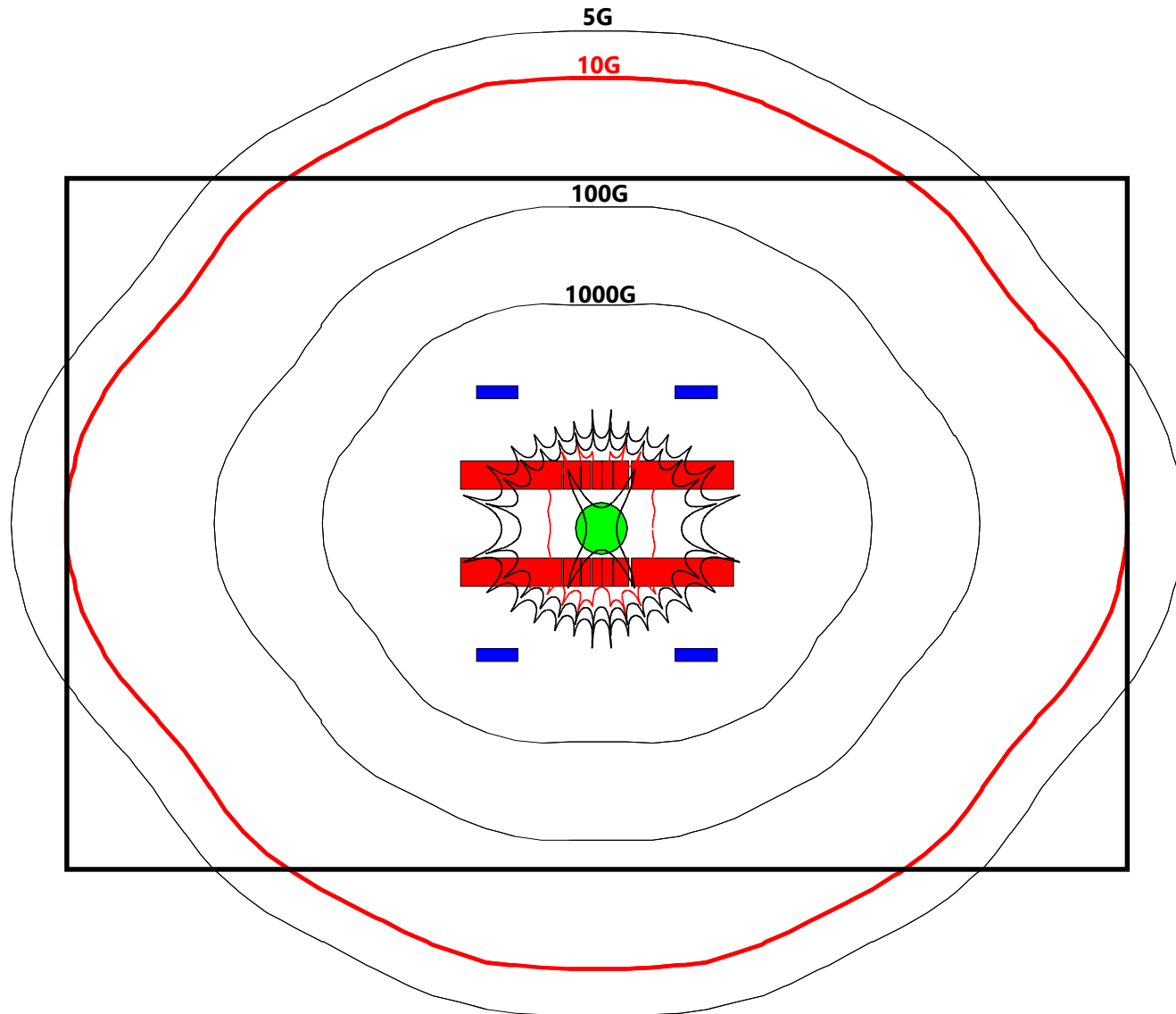
4.m

**28 A/mm<sup>2</sup>**

**150 tons**



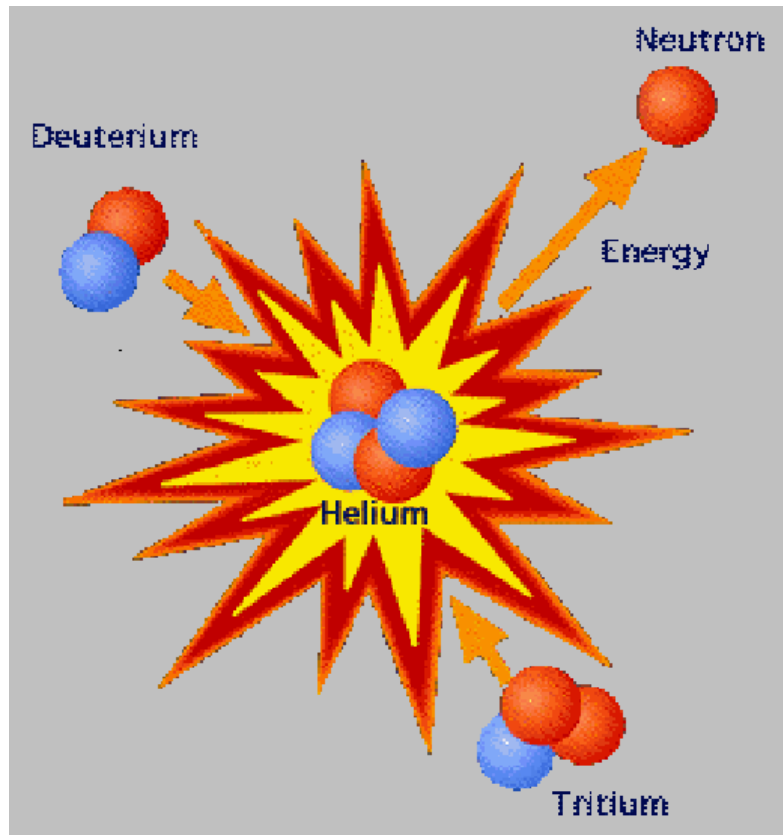
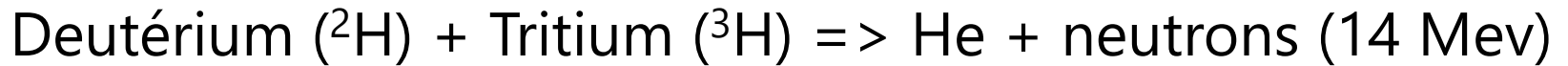
# Blindage actif et homogénéité



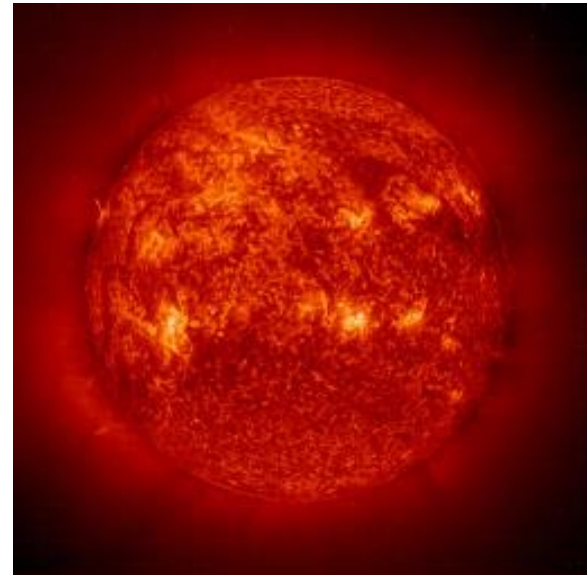
- La **Supraconductivité**
- Les **conducteurs** « supra »
- Aimants **d'accélérateurs et détecteurs** : le **LHC**
- Aimants pour le **médical** : **NEUROSPIN**
- Aimants pour la **fusion** thermonucléaire : **ITER**
- Le **futur**... les « **HTc** »
- Autres applications

# Fusion thermonucléaire contrôlée

## Réaction de fusion :



- ❑ **Deutérium** : 33 g/m<sup>3</sup> 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

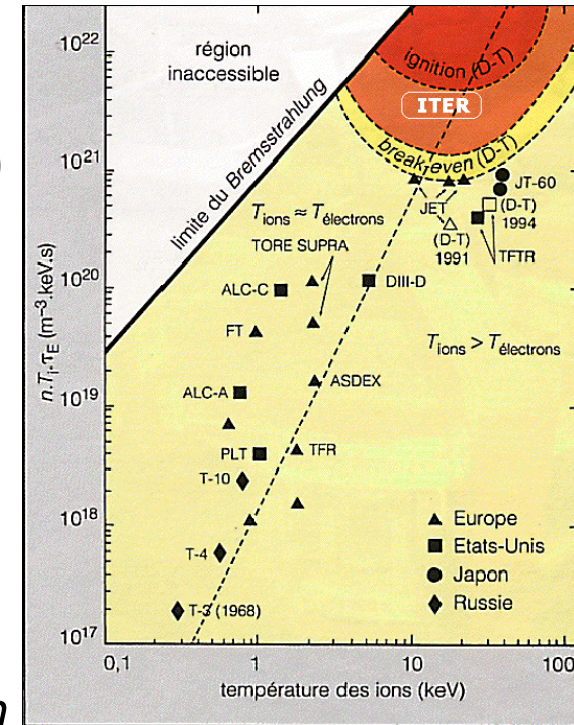
- Maintien du plasma par une induction magnétique
- Forte induction dans volume important : aimants SC

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

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

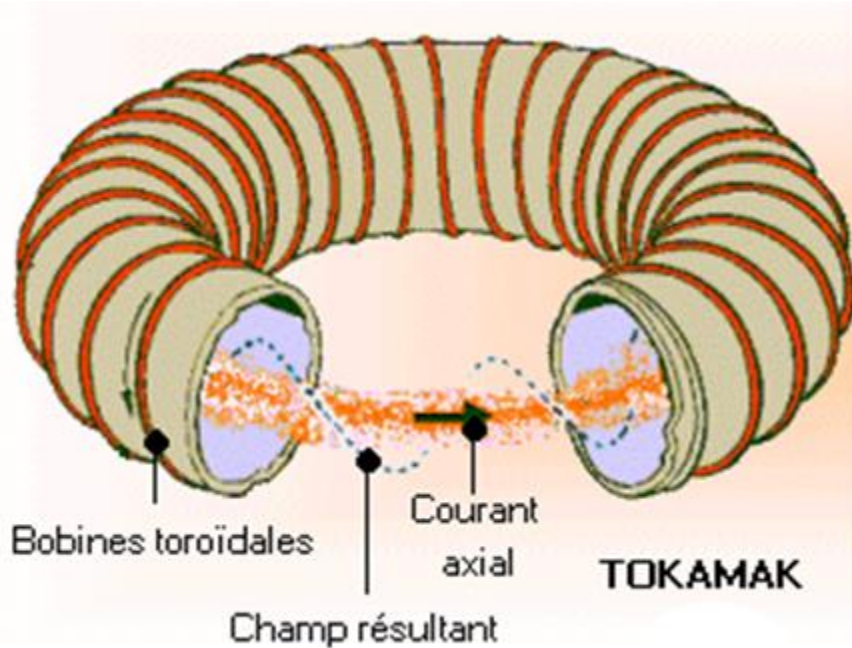
(N : densité de noyau ; W : énergie (température) ;  $\tau$  : temps de confinement)

Concentration en noyaux forte, Temps de confinement longs.



# Confinement magnétique

- ✓ Plasma : particules chargées
- ✓ Confinement optimal :



- ✓ Solutions :
  - tore + courant plasma
  - bobines en hélice

*Action de B*  
*Induction hélicoïdale*



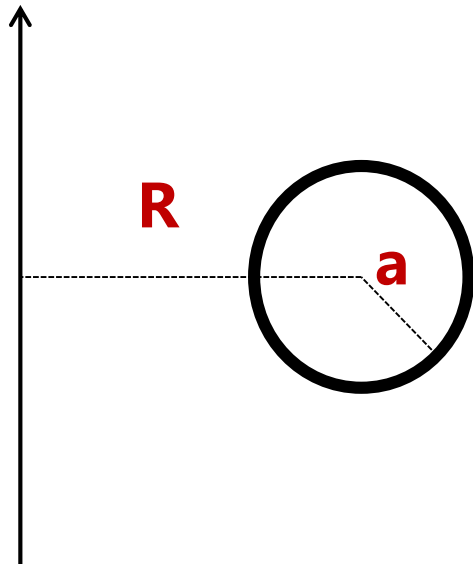
STELLARATOR



*TOKAMAK*  
*STELLARATOR*



# Paramètres importants



## Puissance de fusion

$$P_{\text{LH}} = 2.84 M^{-1} B_{\text{T}}^{0.82} n_{\text{e}}^{0.58} R a^{0.81}$$

## Temps de confinement du plasma

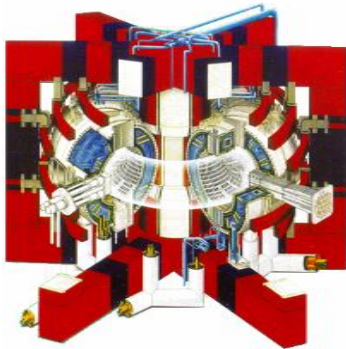
$$t_{\text{E,th}} = 0.0562 I_{\text{p}}^{0.93} B_{\text{T}}^{0.15} P^{-0.69} n_{\text{e}}^{0.41} M^{0.19} R^{1.97} e^{0.58} k_{\text{a}}^{0.78}$$

# Fusion : nécessité des supraconducteurs

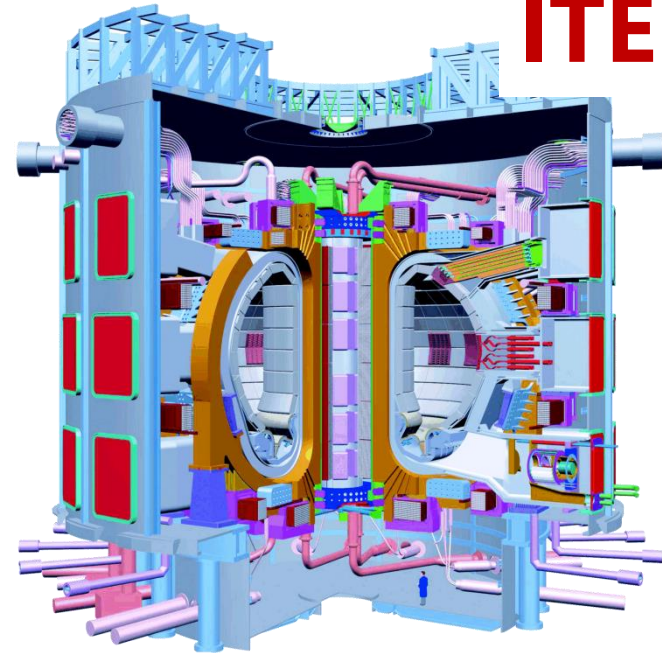
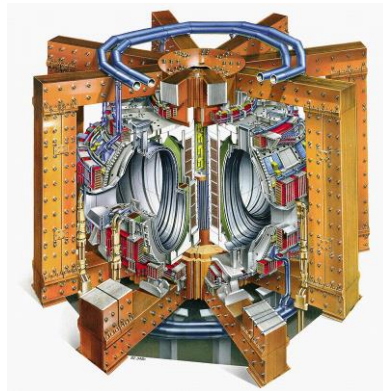
$$Q = P_{\text{fus}} / P_{\text{inj}}$$

**ITER** (SC)

**Tore Supra**  
(partly SC)



**JET** (conv.)

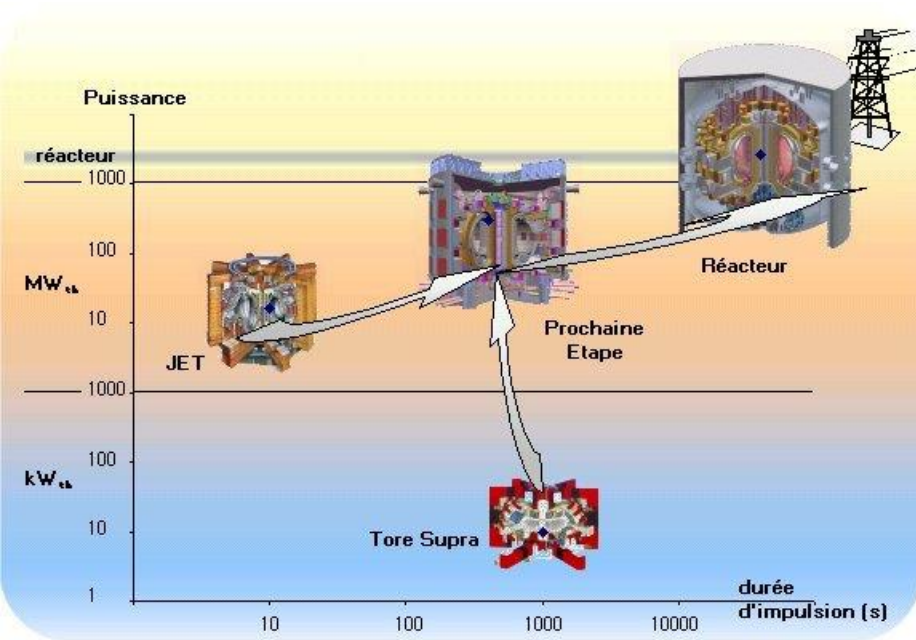


$V_{\text{plasma}}$  25 m<sup>3</sup>  
 $P_{\text{fusion}}$  ~ 0  
 $t_{\text{plasma}}$  ~ 400 s  
 $I_{\text{plasma}}$  1.5 MA  
 $B_{\text{Toroïdal}}$  4.2 T  
 $Q$  0

$V_{\text{plasma}}$  80 m<sup>3</sup>  
 $P_{\text{fusion}}$  ~ 16 MW  
 $t_{\text{plasma}}$  ~ 30 s  
 $I_{\text{plasma}}$  5 MA  
 $B_{\text{Toroïdal}}$  3,5 T  
 $Q$  0,64

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

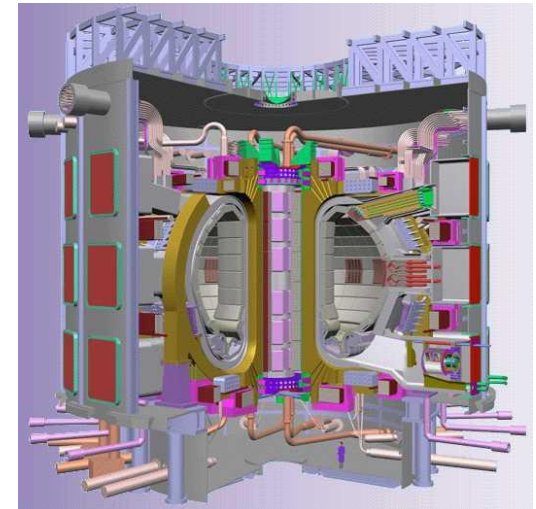
# International Thermonuclear Experimental Reactor



- En construction à **Cadarache**,
- Livraison prévue pour ~~2020~~ **2027** !!,
- Coût **20 G€**

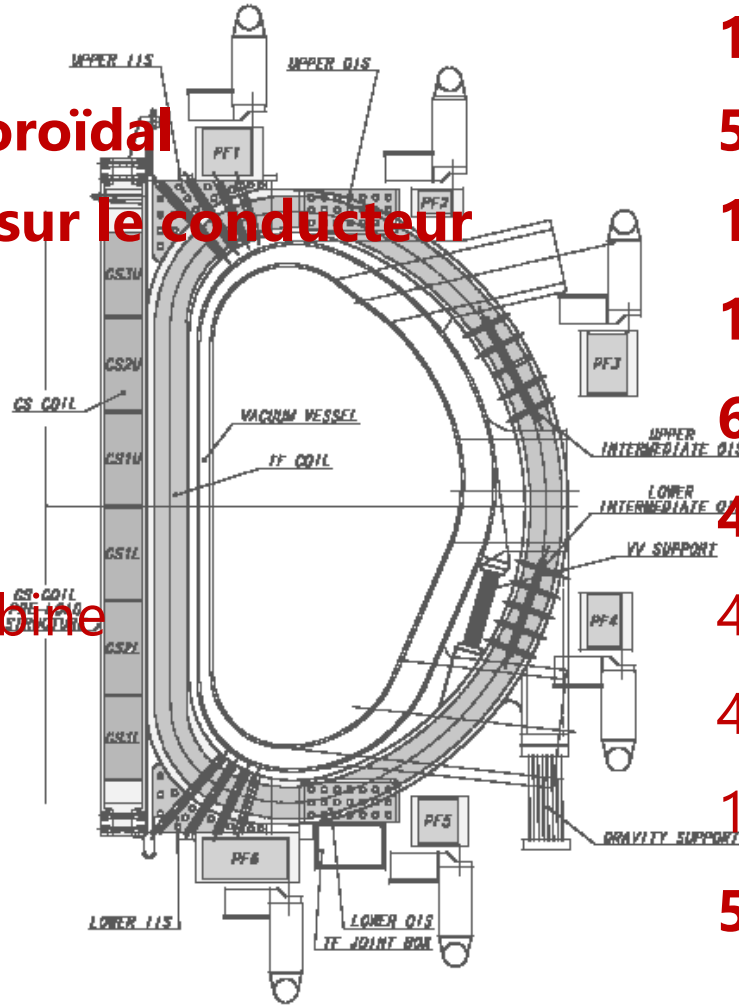
## Objectifs d'ITER

- 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 MAt
- ❖ 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





# La Fusion 2.0

**ITER**  
LE PLUS CONNU

**Nb3Sn**



Première fusion 2029

Investisseurs Union européenne, Suisse, Russie, Inde, Corée du Sud, États-Unis, Japon, Chine

**MIT**  
LE PLUS CRÉDIBLE

**HTS**



Prototype 2025

Investisseur Département de l'Énergie des États-Unis

**LOCKHEED MARTIN**  
LE PLUS MYSTÉRIEUX



Réacteur commercial 2020

Investisseur Lockheed Martin

**GENERAL FUSION**  
LE PLUS SIMPLE



Premier réacteur 2025

Investisseurs Amazon, SpaceX, Expeditions, General Fusion, souverain de Malaisie...

**TRI ALPHA**  
LE PLUS SENSATIONNEL



Pas de date précise

Investisseurs Goldman Sachs, Vulcan Capital, Venrock...

- Développements de **start-up**,
- Réacteurs **plus petits, plus flexibles**,
- Soutien financier des acteurs de **l'économie numérique**,
- **Budgets # 100 M€**

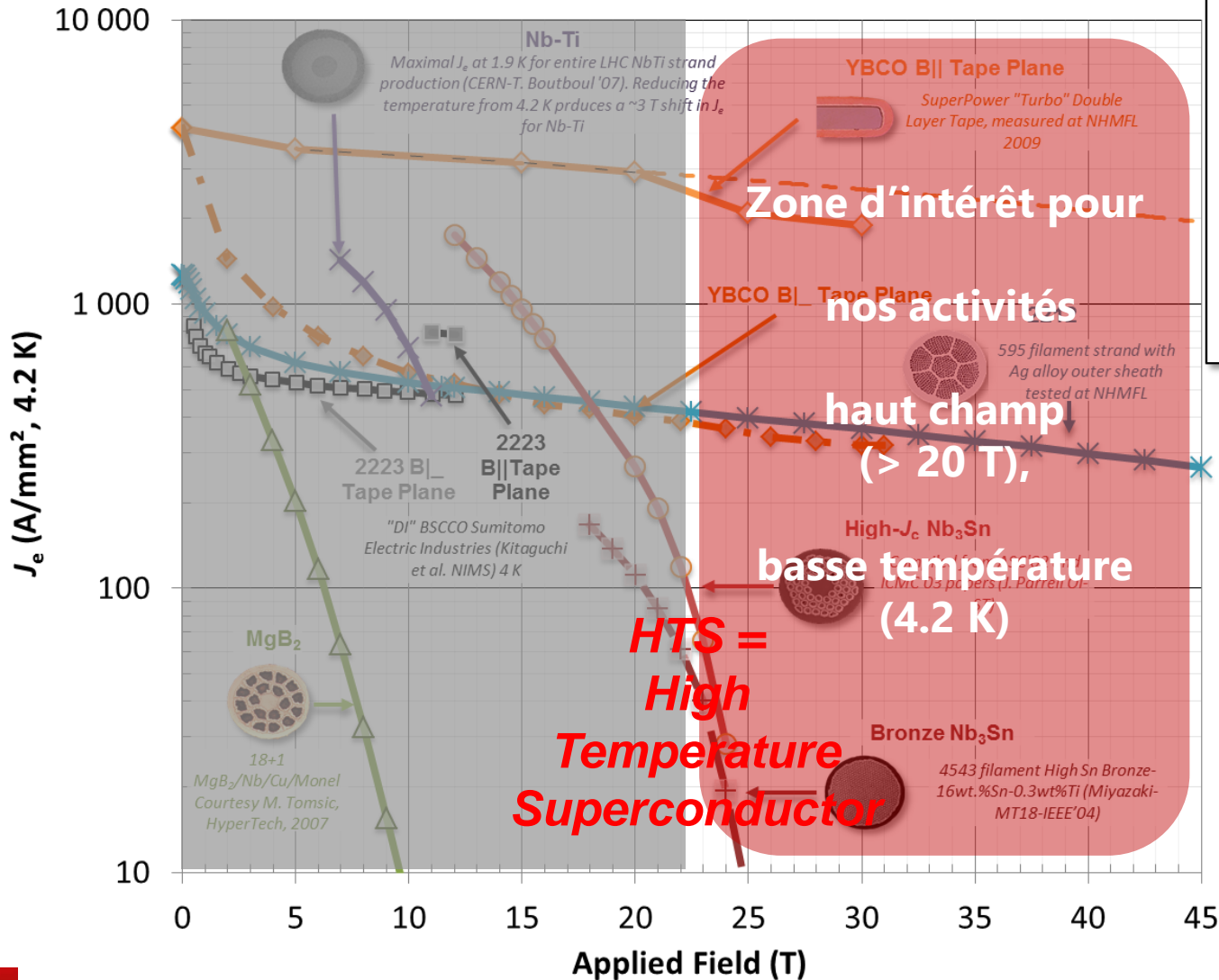
amazon PayPal Microsoft



- La **Supraconductivité**
- Les **conducteurs** « supra »
- Aimants **d'accélérateurs et détecteurs** : le **LHC**
- Aimants pour le **médical** : **NEUROSPIN**
- Aimants pour la **fusion** thermonucléaire : **ITER**
- Le **futur**... les « **HTc** »
- Autres applications

# Capacité de transport de courant à 4,2 K

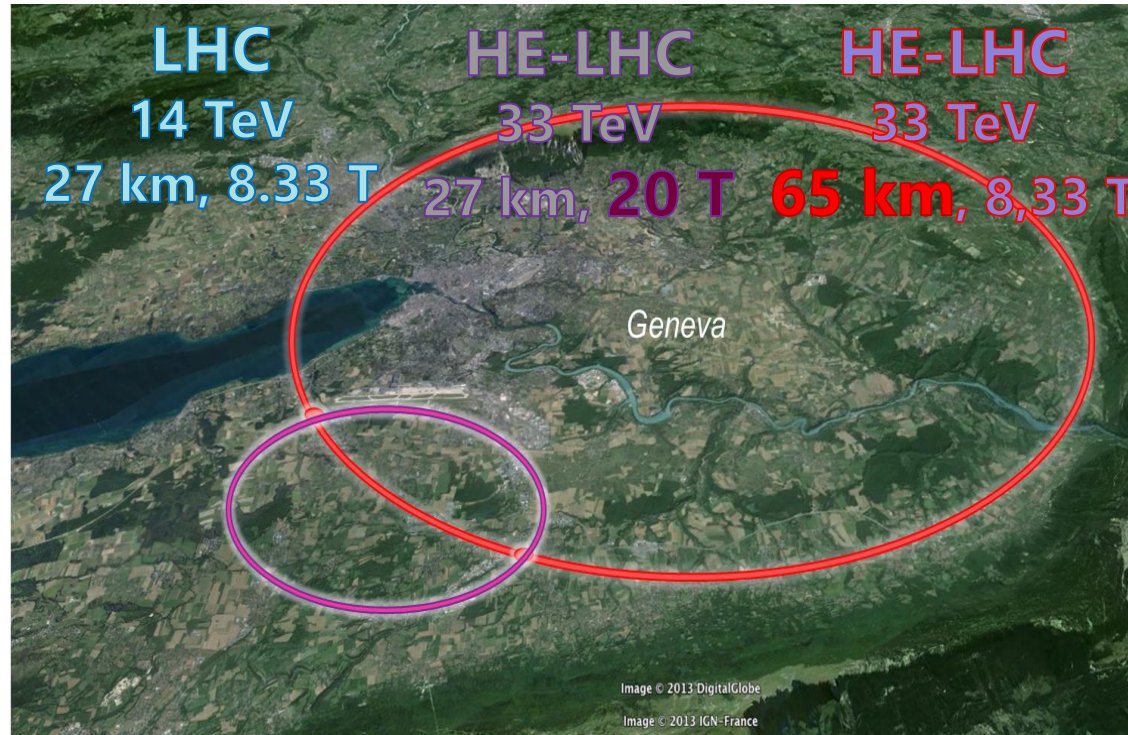
Current Density Across Entire Cross-Section



# Energie du faisceau

$$E[\text{TeV}] = 0,3 \times B[\text{T}] \times r[\text{km}]$$

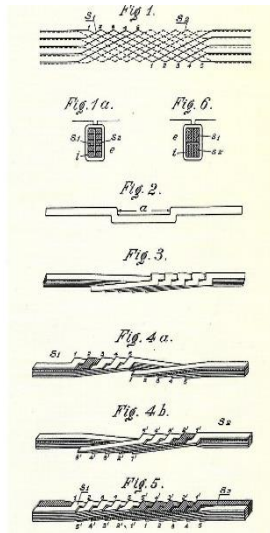
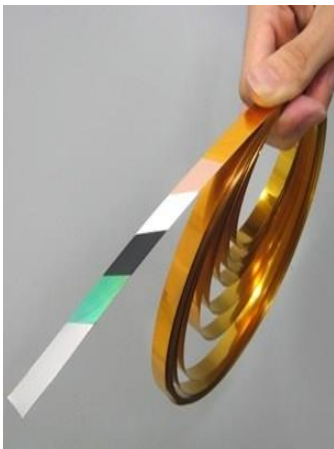
Energie du faisceau      Champ magnétique      Rayon de courbure



# Matériaux HTS : YBCO ou Bi2212 ?

## YBCO

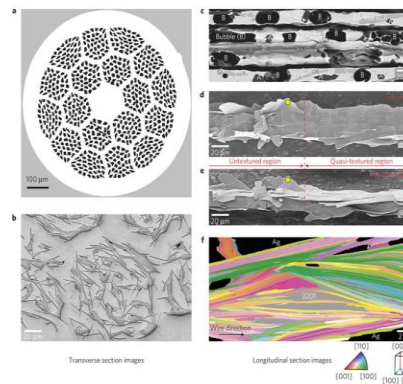
Yttrium  
Barium  
Copper  
Oxide



Câble Roebel



Câble de Rutherford



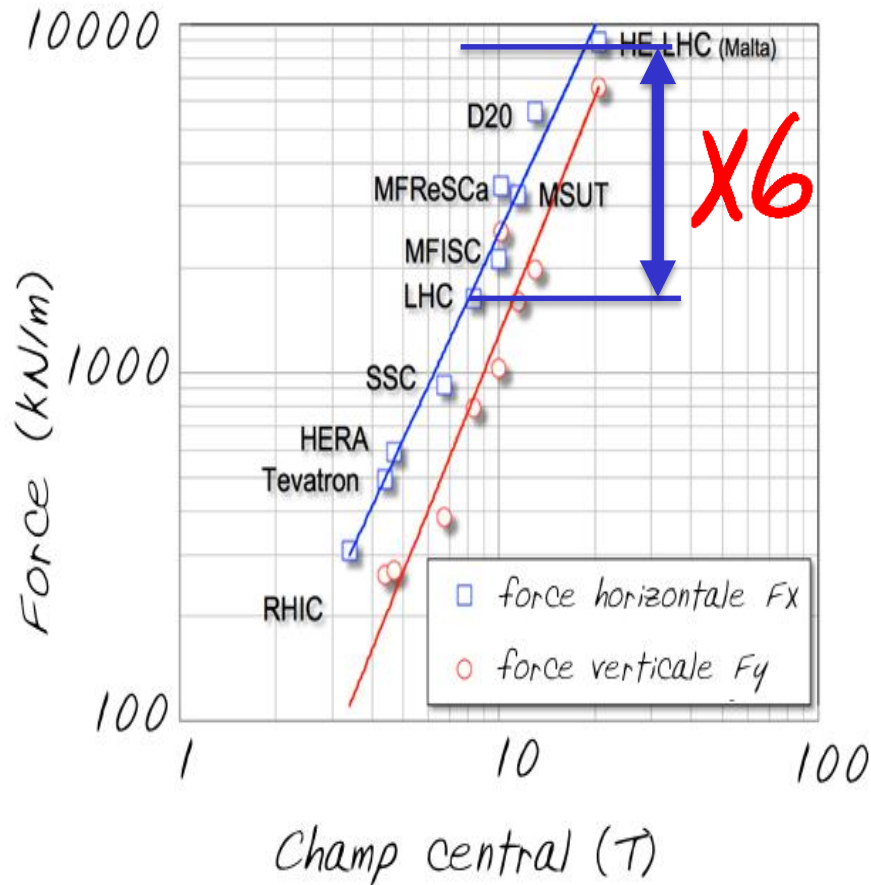
## Bi2212

Bismuth  
Strontium Calcium  
Copper  
Oxide

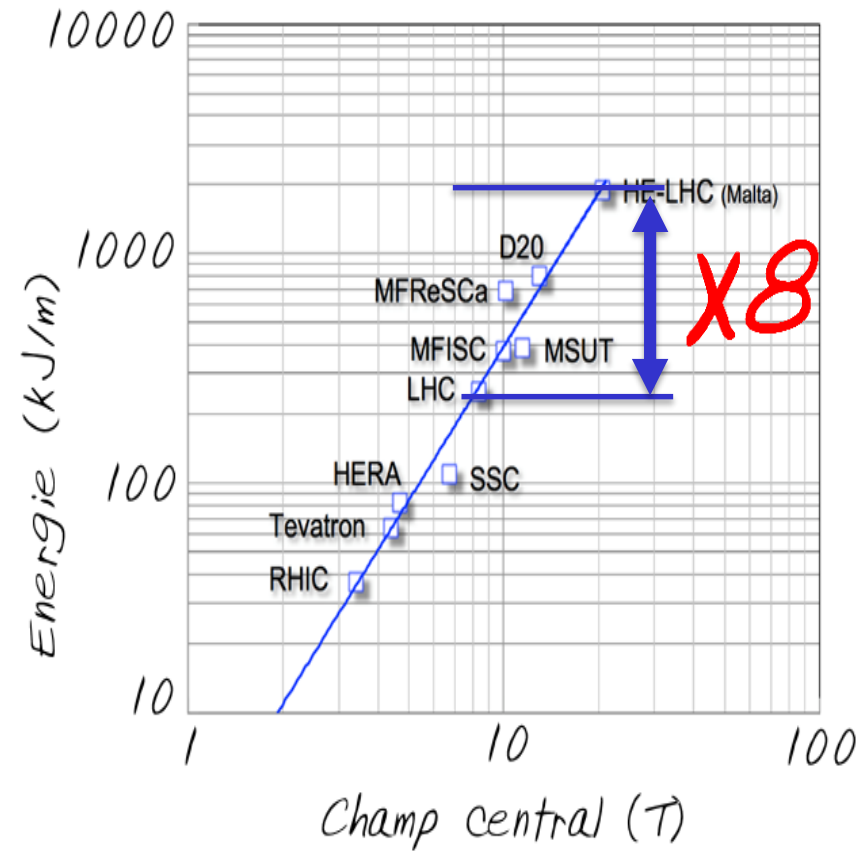


# Conséquences d'un champ élevé ?

## Mécanique

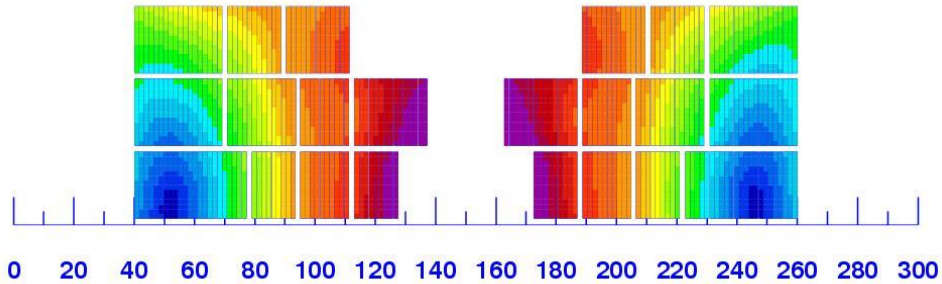
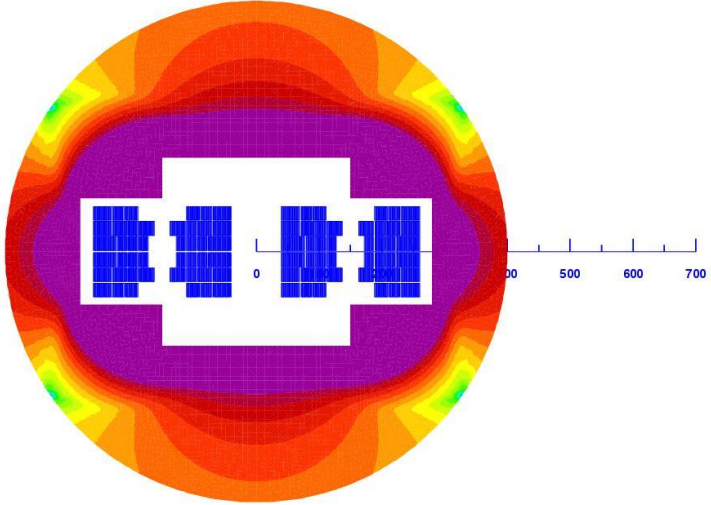


## Protection

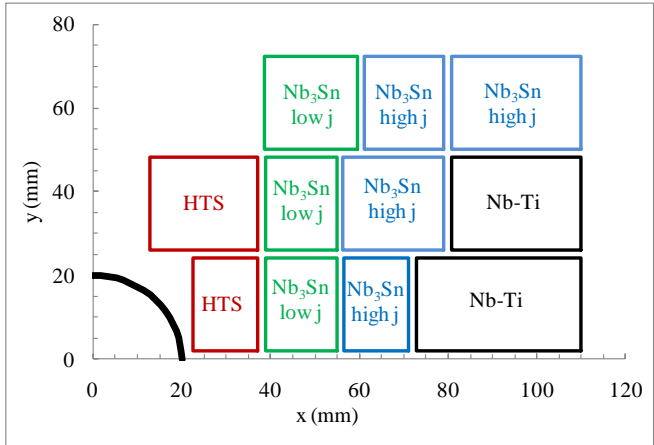




# Exemple d'un futur dipôle 20 T (HE-LHC)



Material	N. turns	Coil fraction	Peak field	$J_{overall}$ (A/mm <sup>2</sup> )
Nb-Ti	41	27%	8	380
Nb3Sn (high Jc)	55	37%	13	380
Nb3Sn (Low Jc)	30	20%	15	190
HTS	24	16%	20.5	380



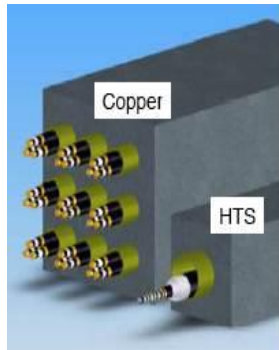
Courtesy L. Rossi & E.Todesco

- La **Supraconductivité**
- Les **conducteurs** « supra »
- Aimants **d'accélérateurs et détecteurs** : le **LHC**
- Aimants pour le **médical** : **NEUROSPIN**
- Aimants pour la **fusion** thermonucléaire : **ITER**
- Le **futur**... les « **HTc** »
- **Autres applications**

# Autres applications des supraconducteurs

## Dispositifs conventionnels

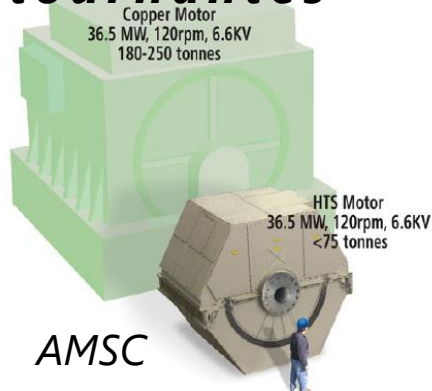
### Câbles



### Distribution d'énergie



### Machines tournantes



### Transfo.

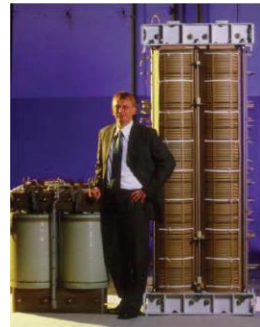


Photo Siemens

## Lévitacion



### Maglev

- Forces de Laplace (Lorentz)
- Electro-aimants
- Aimants permanents
- Aimants SC



### Diamagnétisme

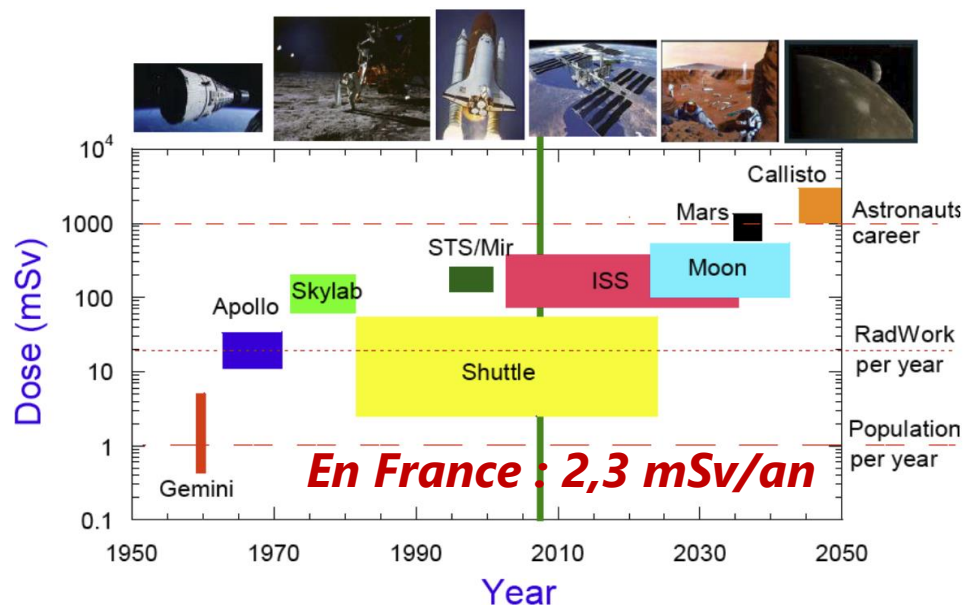
« grad B<sup>2</sup> »

### Effet Meissner

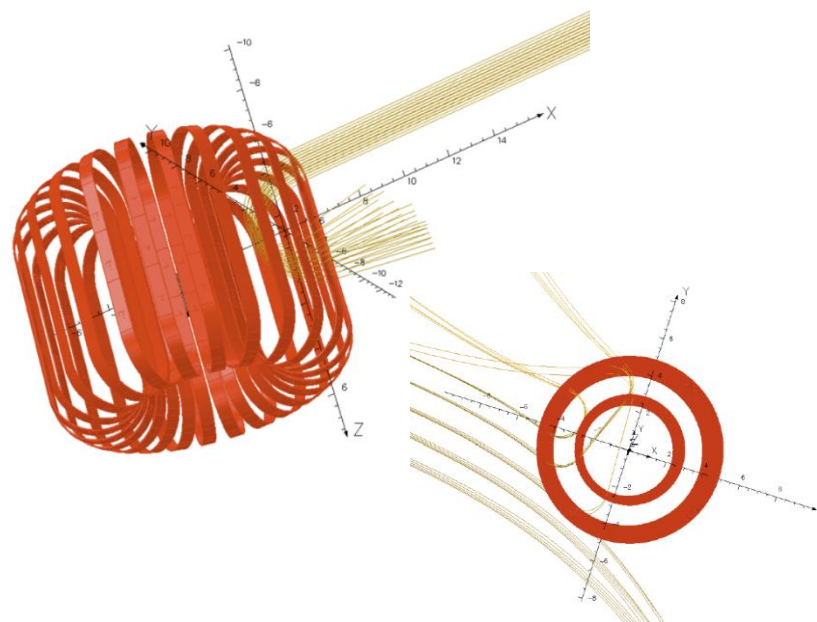
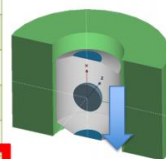
Diamagnétique parfait



# Protection magnétique contre les rayonnements



Conf.	Total	Mat.	Field	Mass [t]	Passive HDPE
A	45%	30%	15%	300	61 %
B1	42%	24%	18%	100	38%
B2	44%	22%	22%	147	44%
MT3	33%	11%	22%	39	34%
<b>MT4</b>	<b>46%</b>	<b>24%</b>	<b>22%</b>	<b>76</b>	<b>36%</b>
MT4 x2	49%	24%	25%	76	36%
MT4 x4	53%	24%	29%	76	36%



# 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
- MOOC « *Des particules aux étoiles* » website France Université Numérique  
<https://www.fun-mooc.fr/>

