

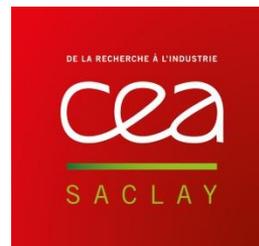
Ecole des **A**ccélérateurs

février 2016

Aimants Supraconducteurs

Philippe Fazilleau

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**



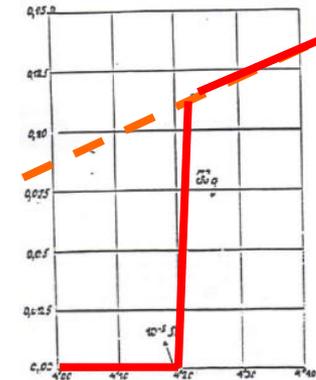
- **La Supraconductivité**
- Les **conducteurs** « supra »
- Aimants **d'accélérateurs et détecteurs** : le **LHC**
- Aimants pour le **médical** : **NEUROSPIN**
- Aimants pour la **fusion** thermonucléaire : **ITER**
- Le **futur**... les « **HTc** »
- Autres applications

La supraconductivité

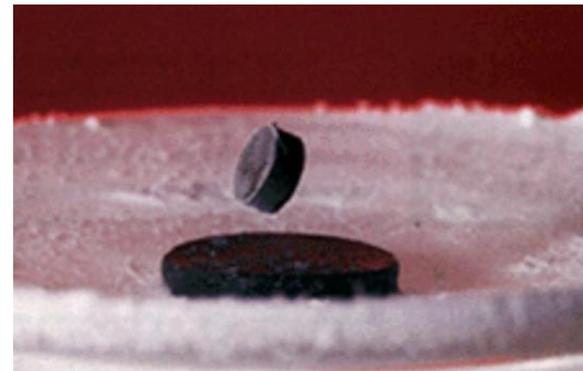
1) Résistivité électrique nulle ($R=0$)



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

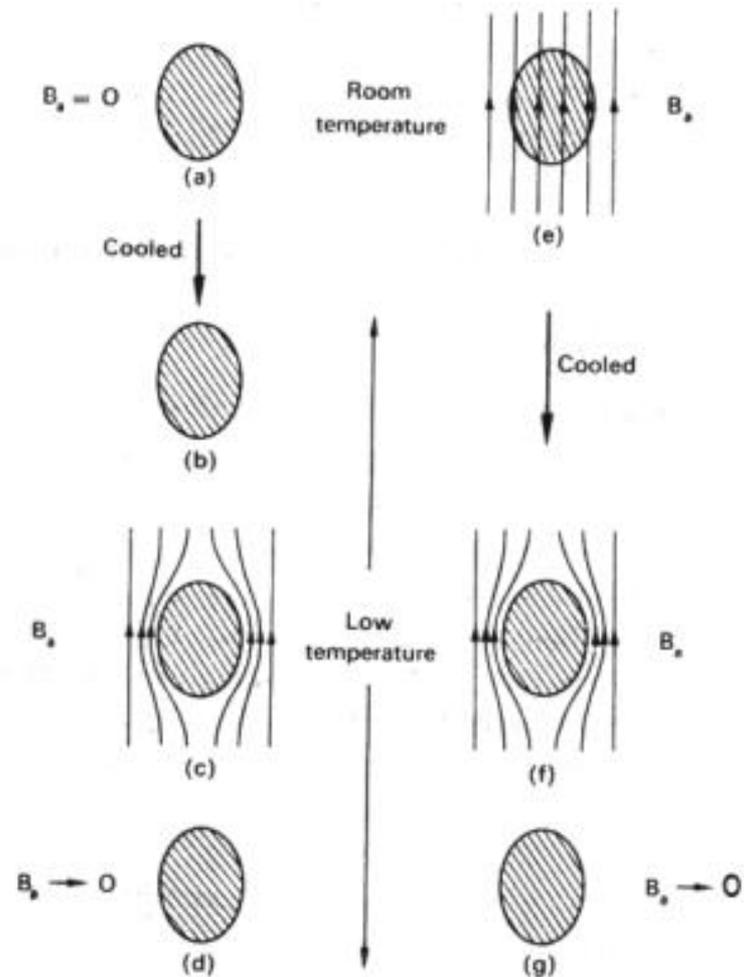
Un supraconducteur refroidi à une température inférieure à sa **température critique** et placé dans un champ magnétique expulse totalement son flux magnétique.

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)

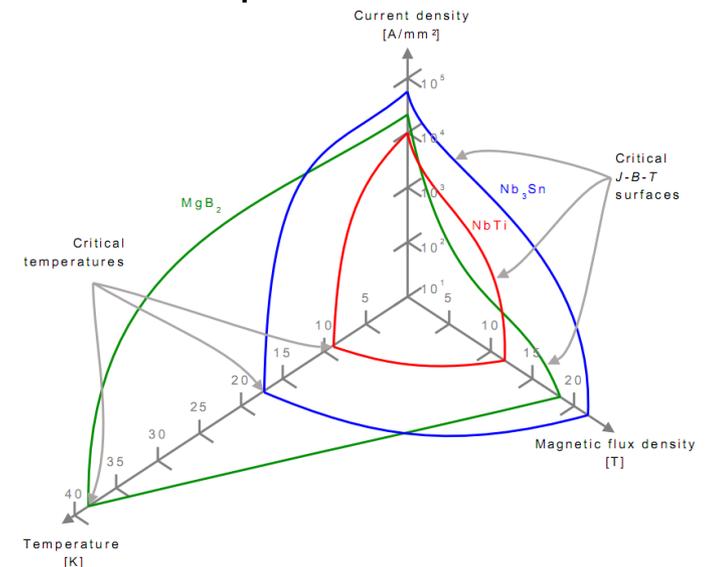
De faibles champs magnétiques détruisent la supraconductivité

⇒ 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

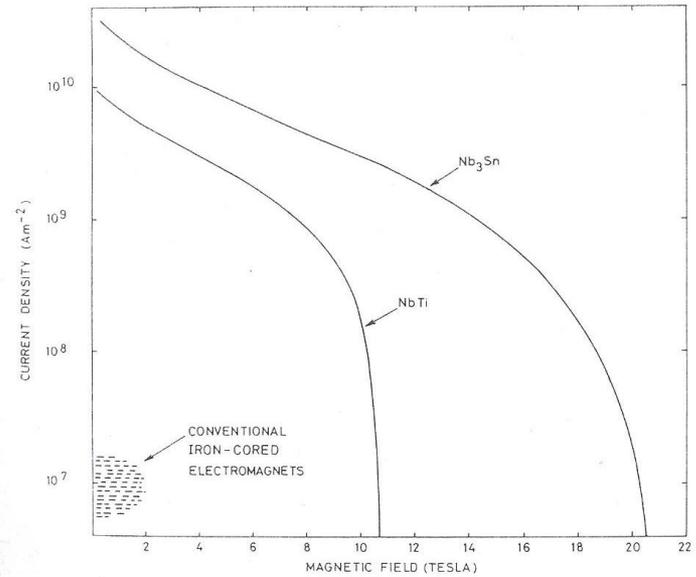
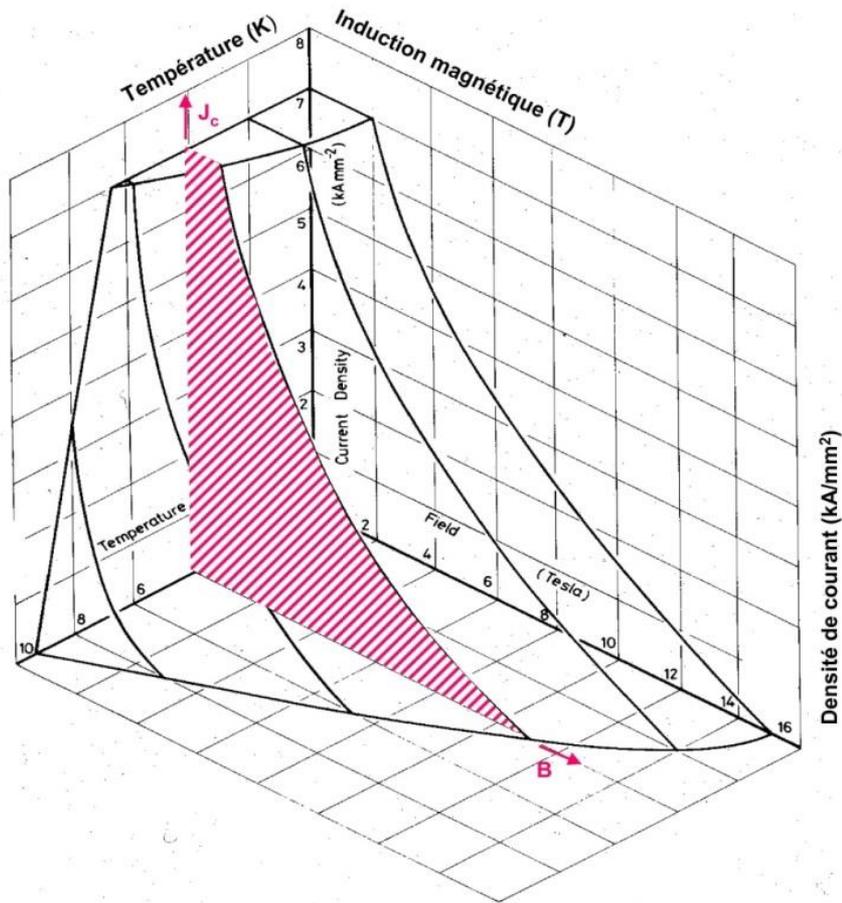
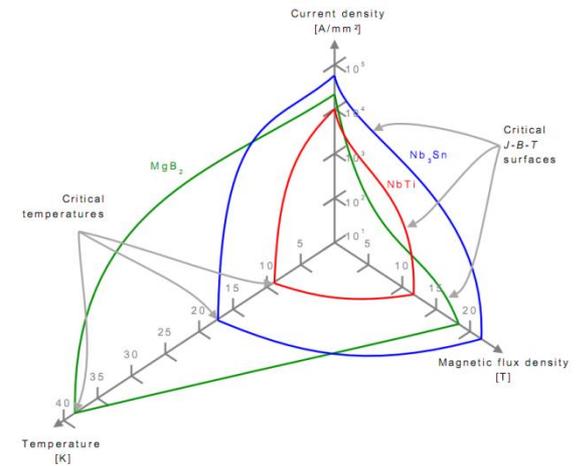


Fig. 1.2 Critical curves for the two common technological superconductors, niobium titanium and niobium tin, at a constant temperature of 4.2 K. Superconductivity prevails below the curves and normal resistivity above. Shaded area at bottom left illustrates the usual operating range for conventional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



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

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).

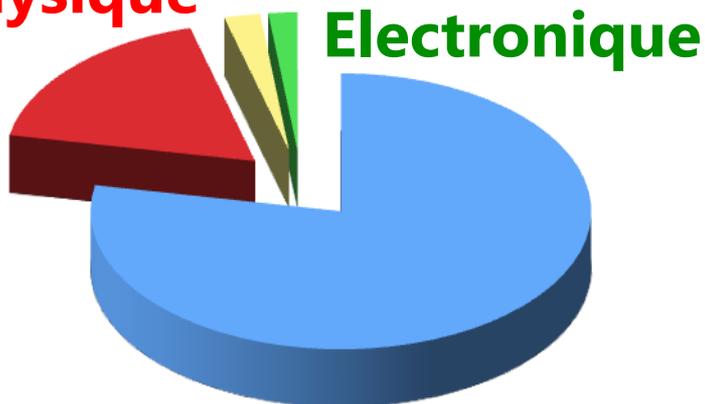
- ❑ **Spectroscopie RMN haute résolution**
 - Outil d’analyse indispensable et incomparable

- ❑ **Fusion thermonucléaire** (ITER)
 - L’énergie du soleil comme énergie de demain

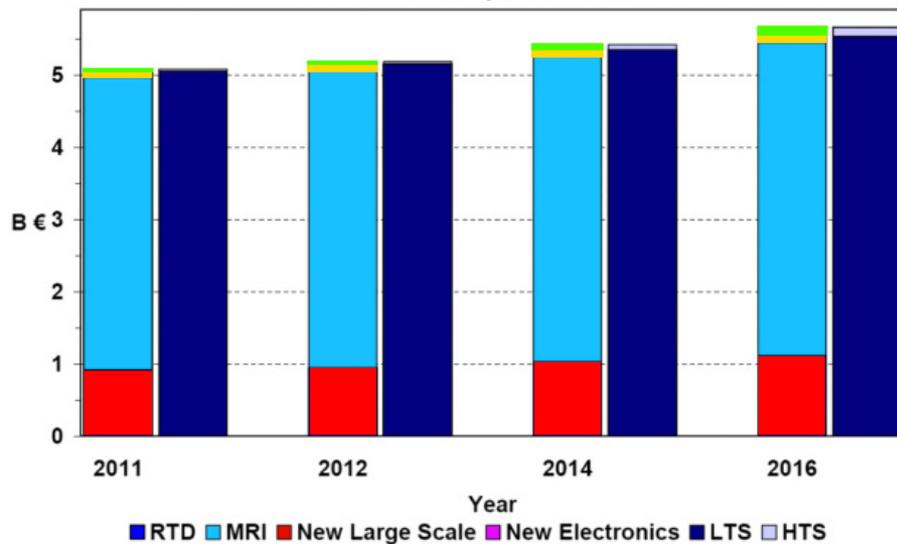
- ❑ **Physique des hautes énergies** (LHC)
 - Origines de l’univers

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*.

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

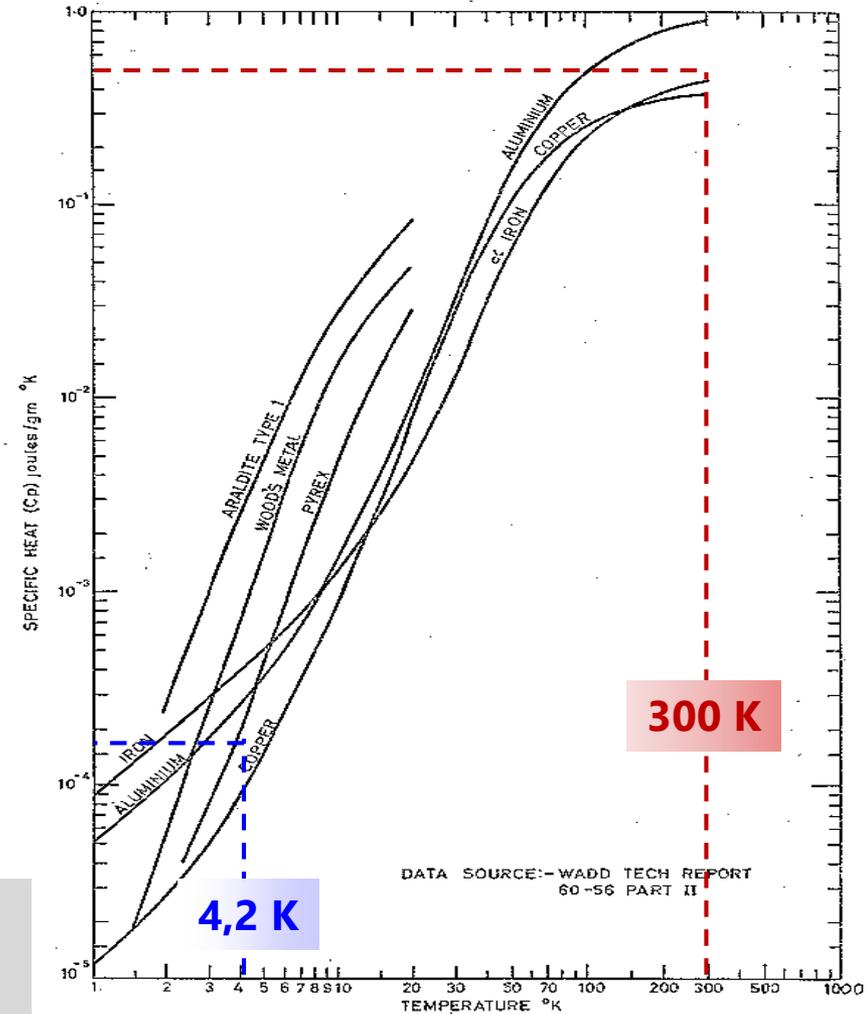
$T_0 = 1,8 \text{ K}$ et $\Delta T = 1,2 \text{ K}$: $\Delta H = 500 \text{ J/m}^3$

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

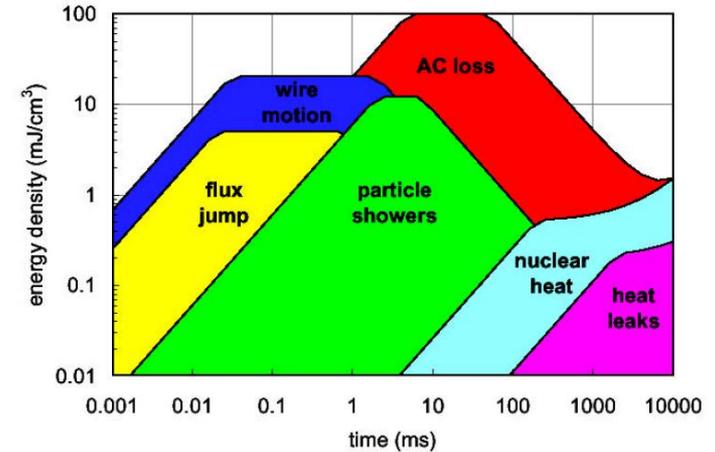
$\Delta T = T_{cs} - T_0$: marge de température entre la température de transition de l'état supraconducteur vers l'état normal, T_{cs} , et la température de fonctionnement, T_0 .



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/m³)	Localisées et stationnaires (W)	Localisées et transitoires (J)
Exemples	<ul style="list-style-type: none"> Pertes AC Flux neutronique Pertes faisceau 	<ul style="list-style-type: none"> Conduction par les supports Jonctions électriques de conducteurs 	<ul style="list-style-type: none"> 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**)

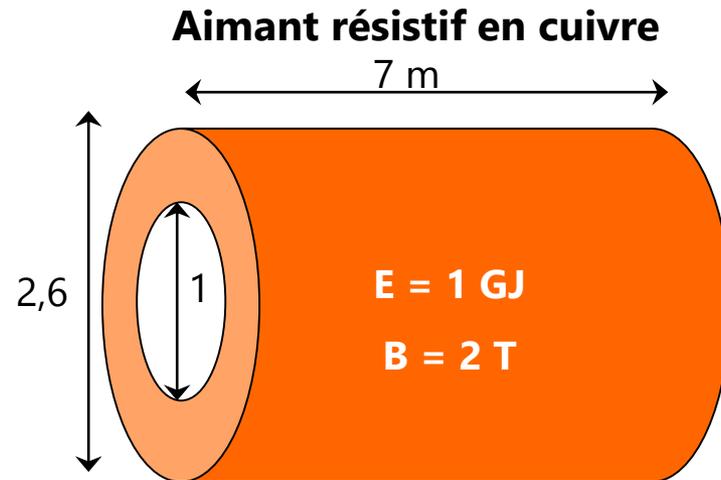
Perturbations **accidentelles** (objets des **études de stabilité**)

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 ?



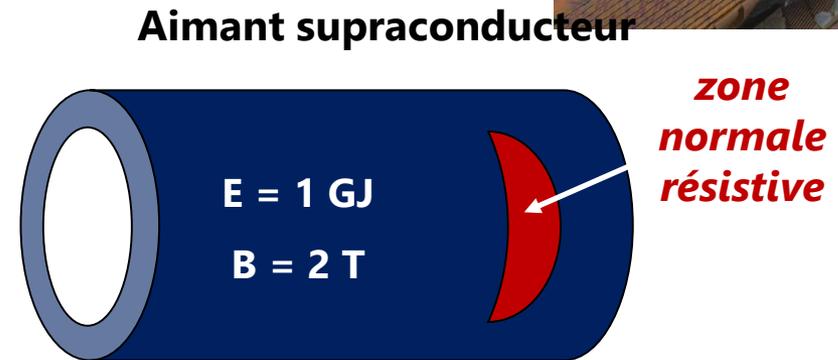
$$j_{\text{Cu}} = 2 \text{ A/mm}^2$$

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

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



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



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

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

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

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

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

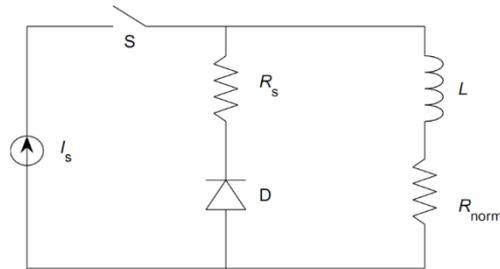


$$T = 1400 \text{ K}$$

Schémas typiques de protection

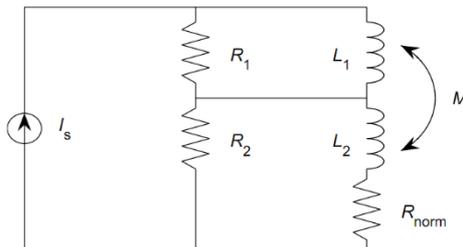
But : dissiper le plus rapidement possible et dans le plus grand volume possible l'énergie emmagasinée afin de diminuer la température maximale et les gradients thermiques (sources de contraintes mécaniques).

Protection par résistance externe

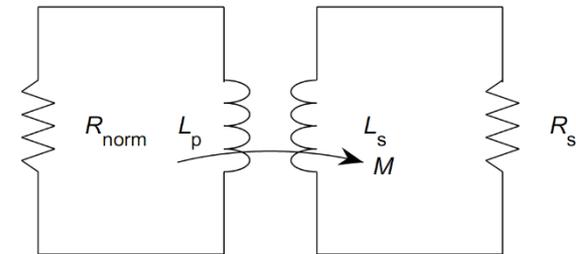


En fin de décharge, toute l'énergie électromagnétique initiale est dégradée en chaleur dans la résistance R_s (et dans R_{norm}) :

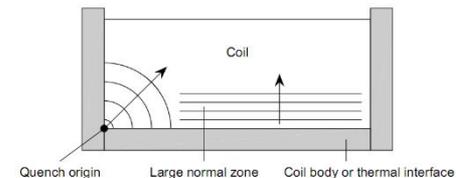
Protection par subdivision



Protection par un couplage secondaire



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



Contraintes mécaniques

$$\sigma \sim JBR$$

 *Contrainte d'une boucle de rayon 200 mm, portant 150 A/mm², 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

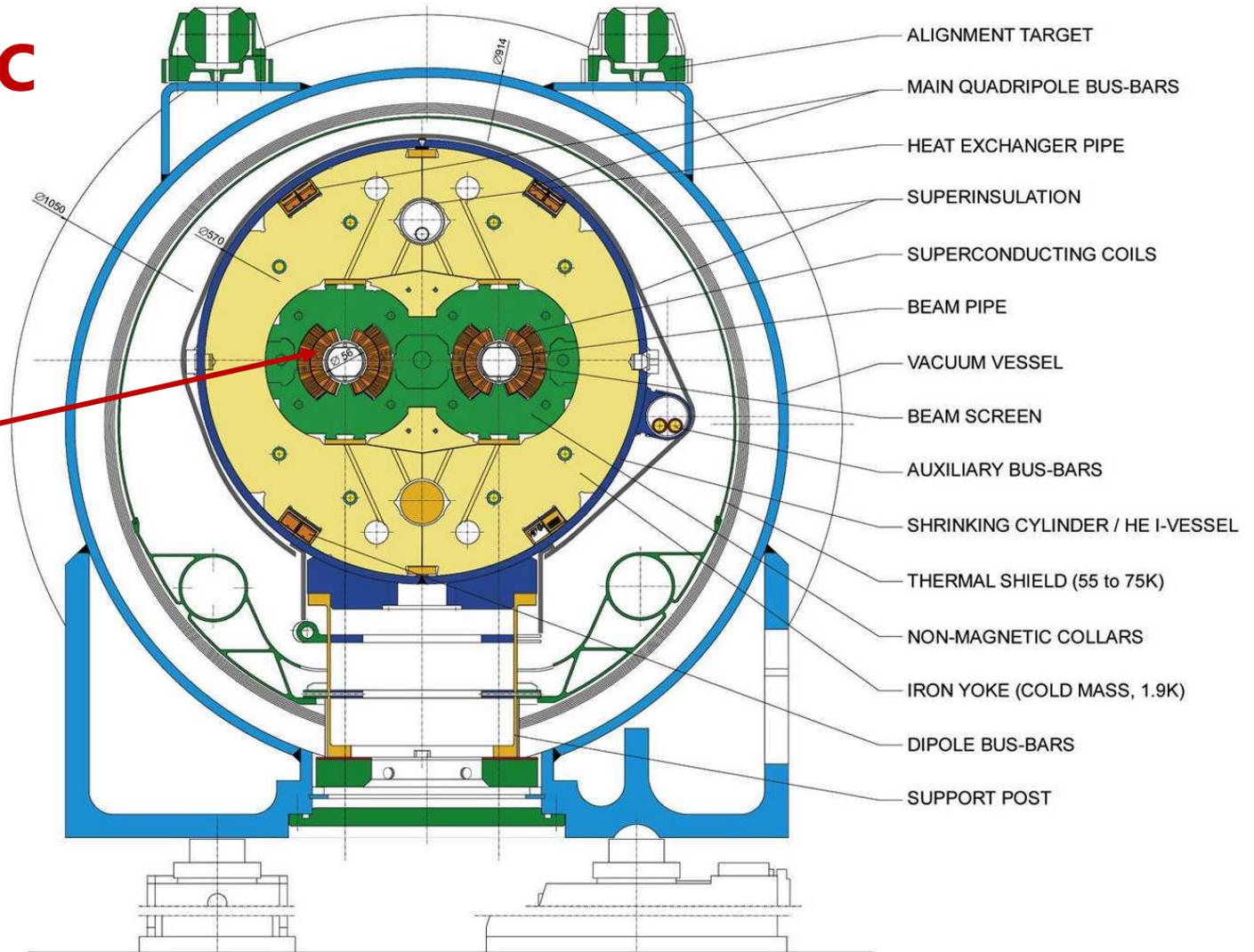
$$Q(rJ^2, \dots) < h P/A (T_c - T_{\text{bain}})$$

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

Refroidissement direct

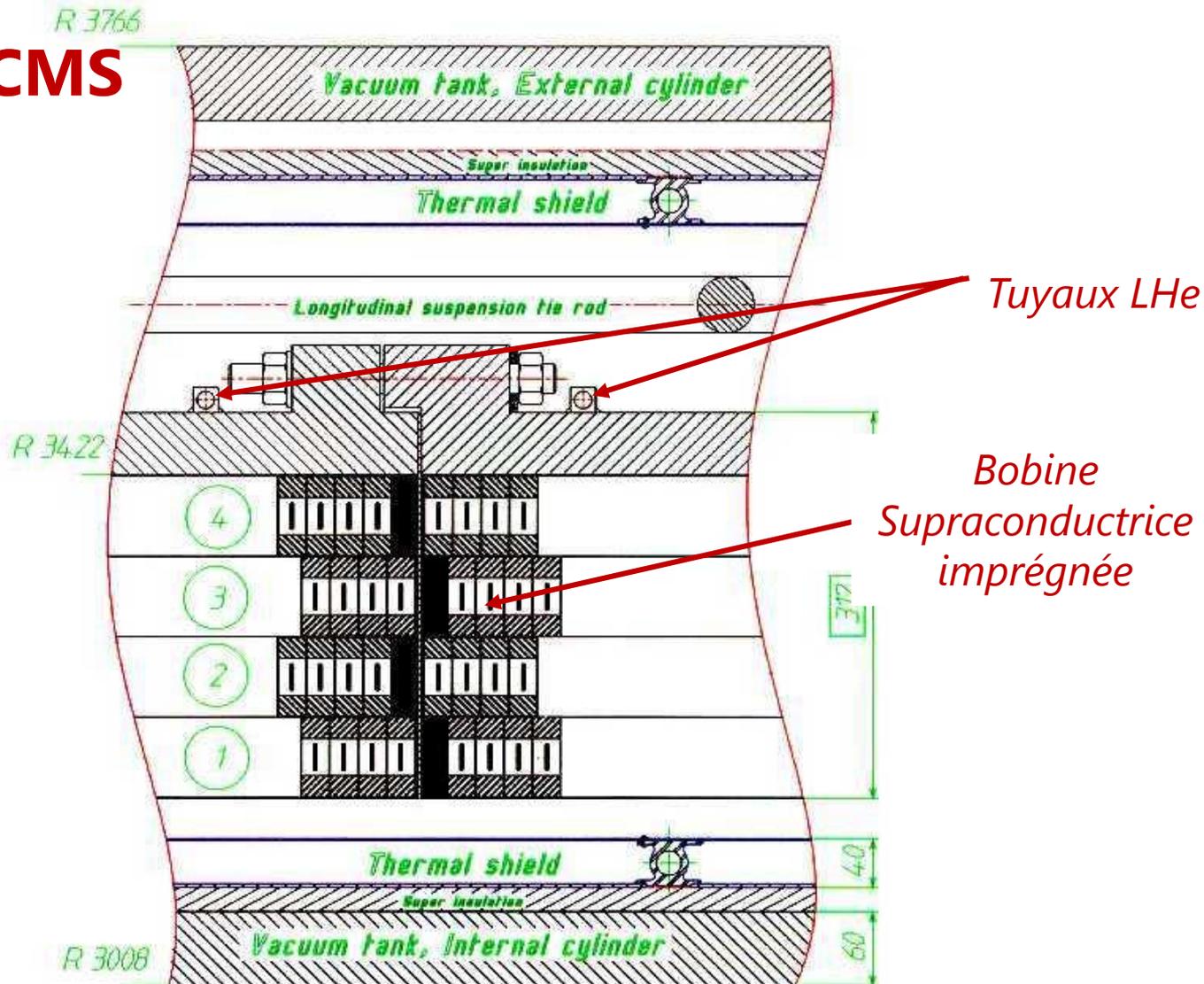
Dipole LHC

*Aimants SC
en bain LHe*



Refroidissement indirect

Solénoïde CMS

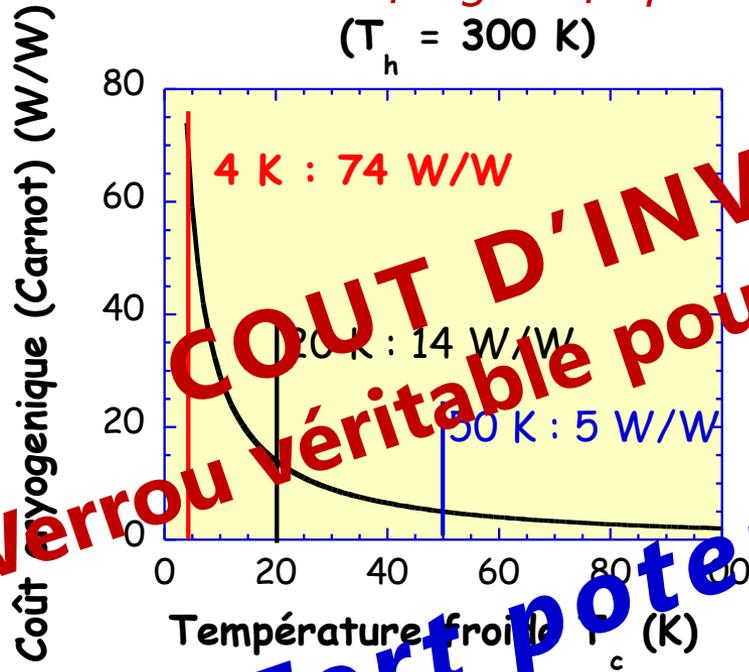


Coûts cryogéniques

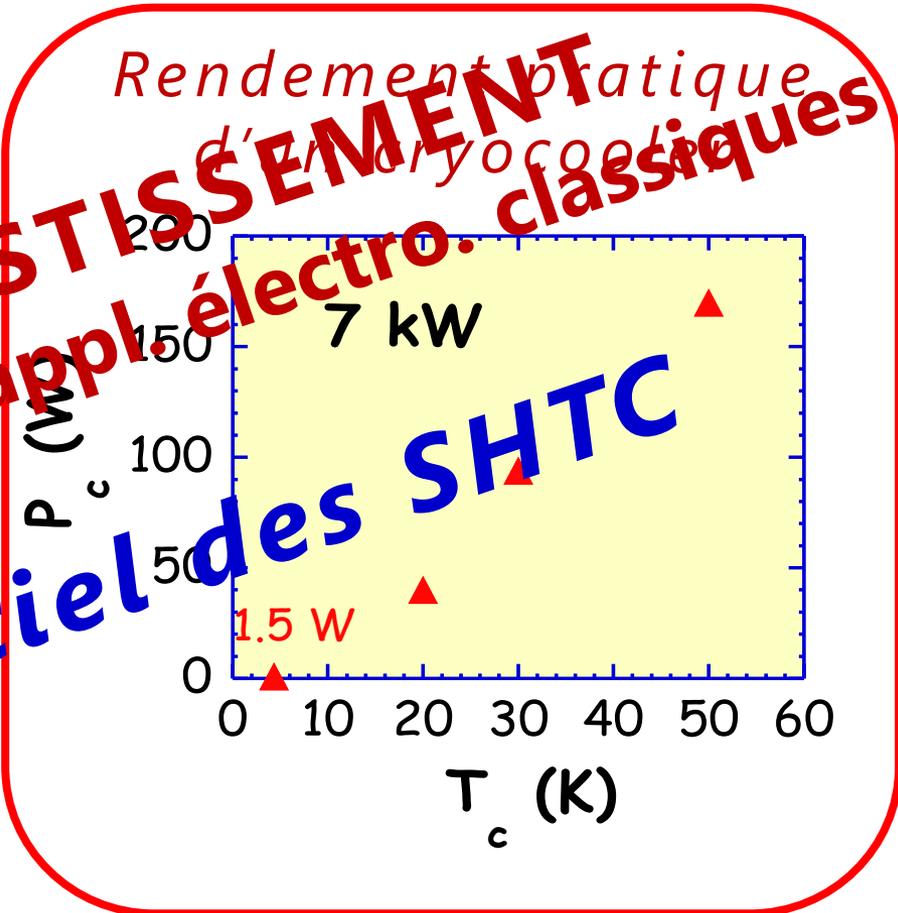
Rendement théorique
de Carnot

Machine frigorifique

($T_h = 300$ K)



Rendement pratique
d'un cryocooler



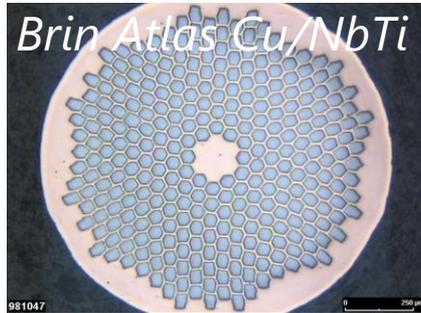
COÛT D'INVESTISSEMENT
Verrou véritable pour appl. électro. classiques
Fort potentiel des SHTC

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

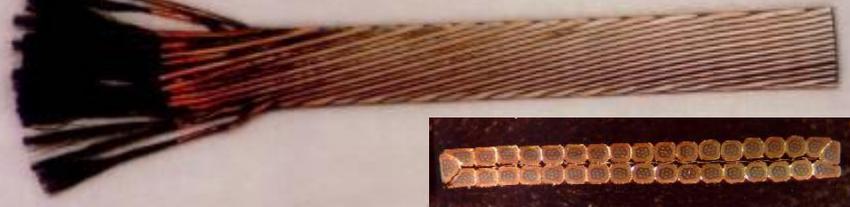
~30k€ + 1€/h

Brins et câbles

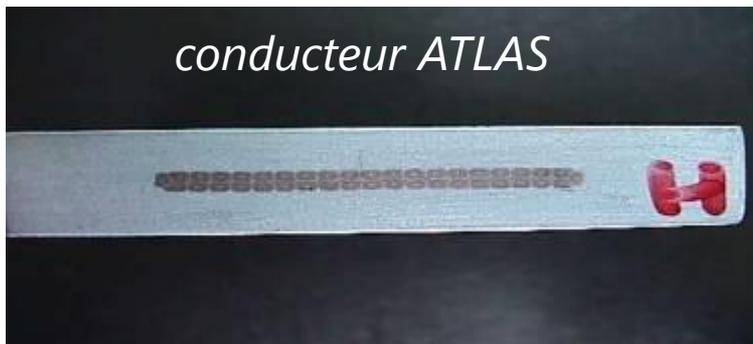
Les supraconducteurs sont formés de **brins multifilamentaires**, où des centaines à **milliers de filaments** sont enrobés dans une **matrice stabilisante**, **twistés** (5-50 mm) pour assurer la **stabilité** en champ variable et champ propre.



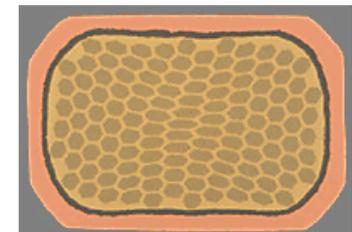
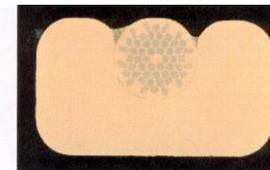
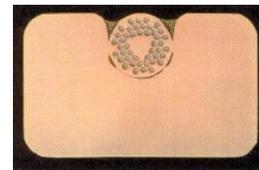
Câble Rutherford pour le dipole LHC



conducteur ATLAS



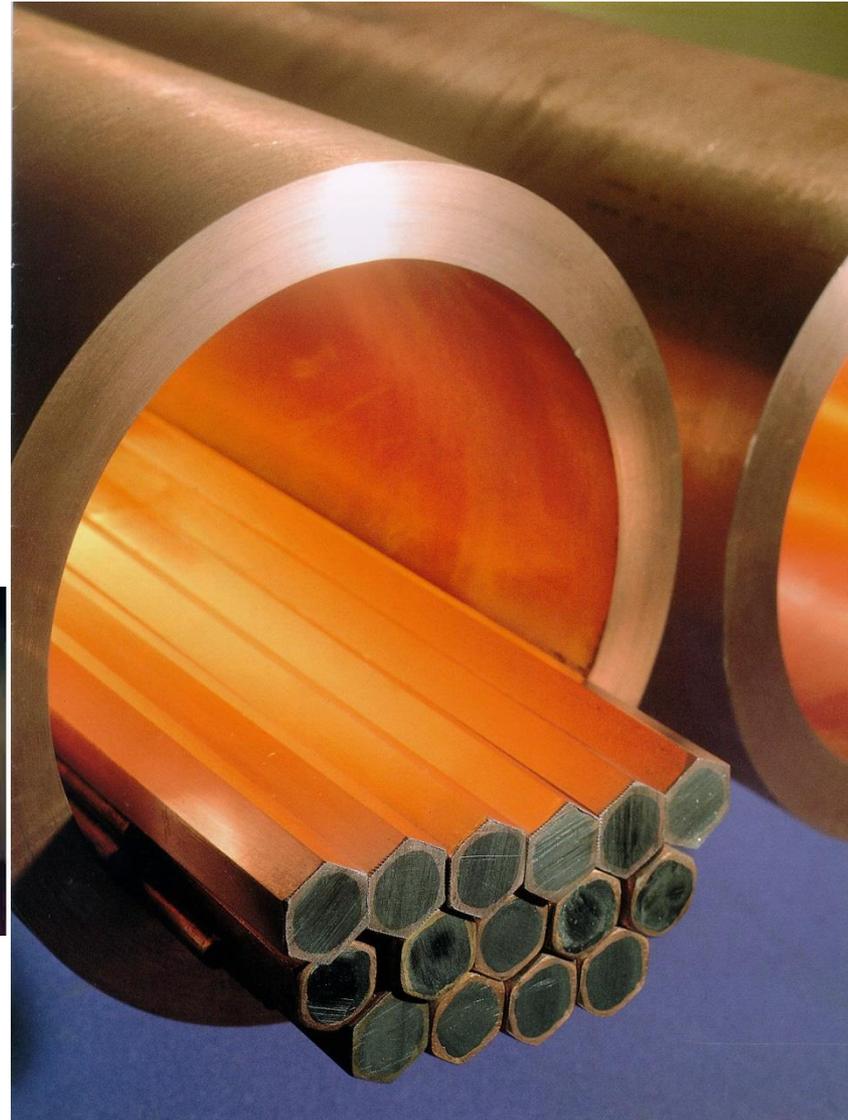
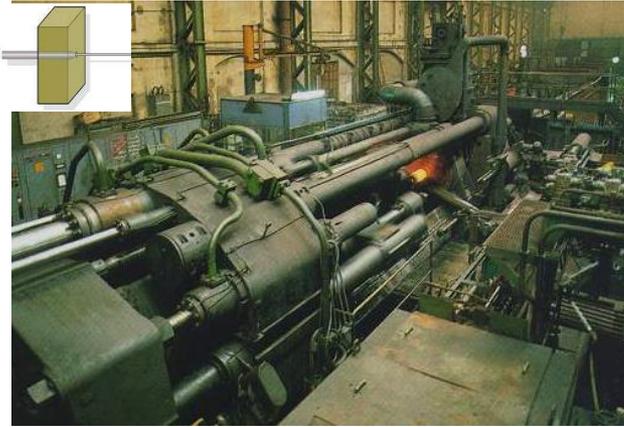
Conducteurs d'IRM-RMN



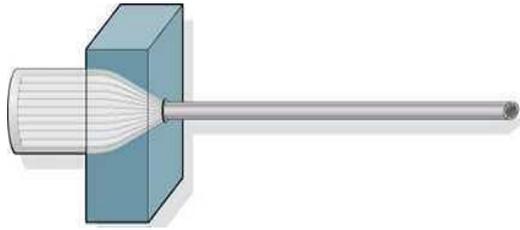
Wire in Channel

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

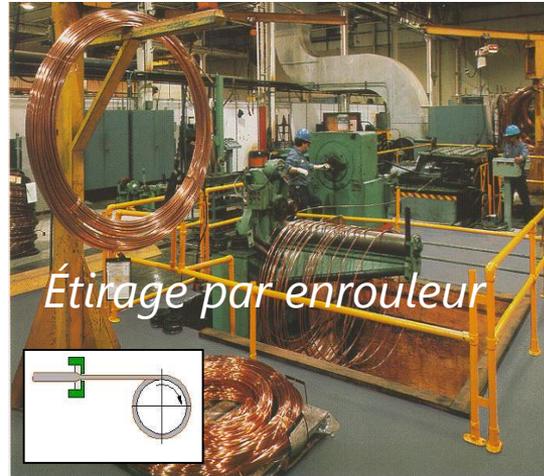
Fabrication des biellettes



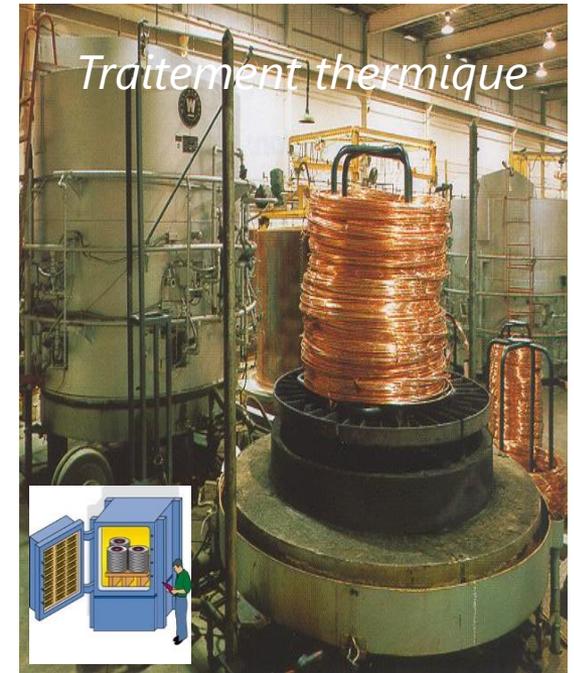
Fabrication des brins



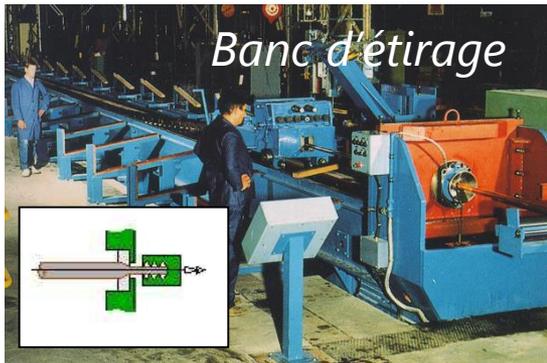
Extrusion des billettes



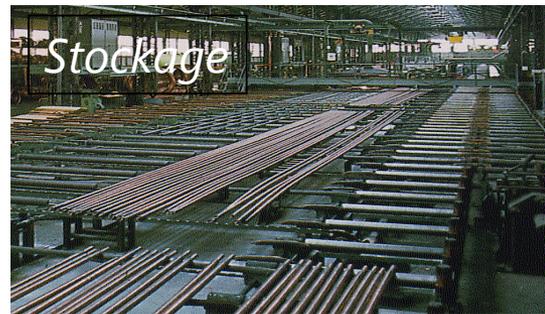
Étirage par enrouleur



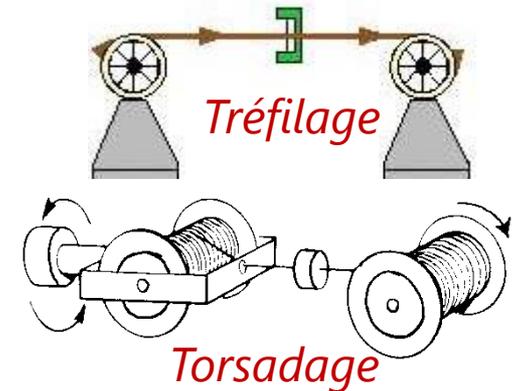
Traitement thermique



Banc d'étirage



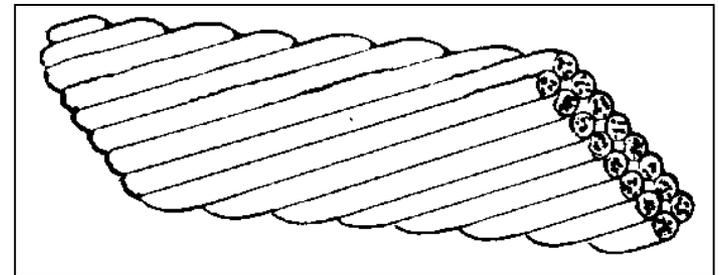
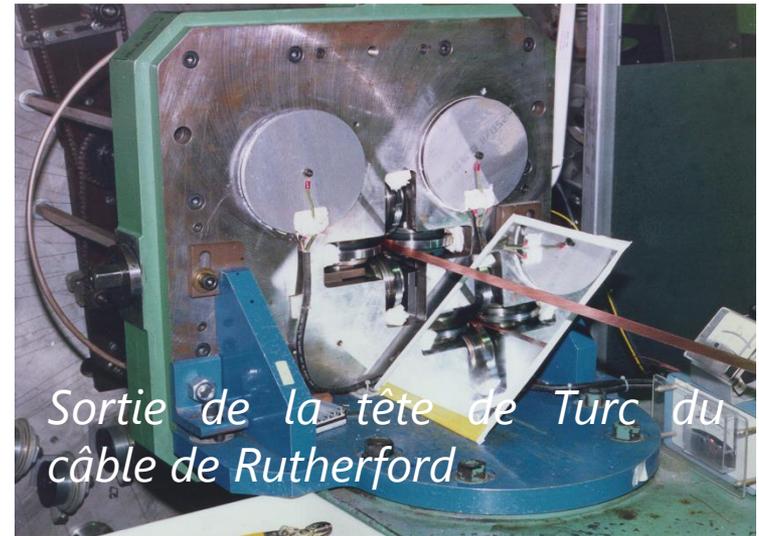
Stockage



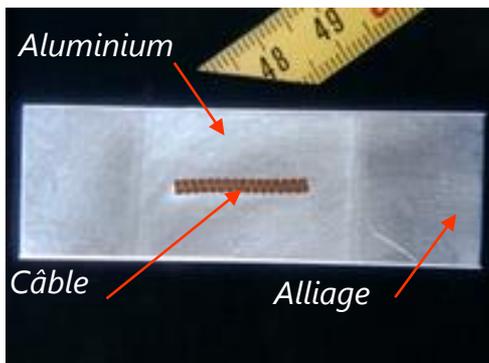
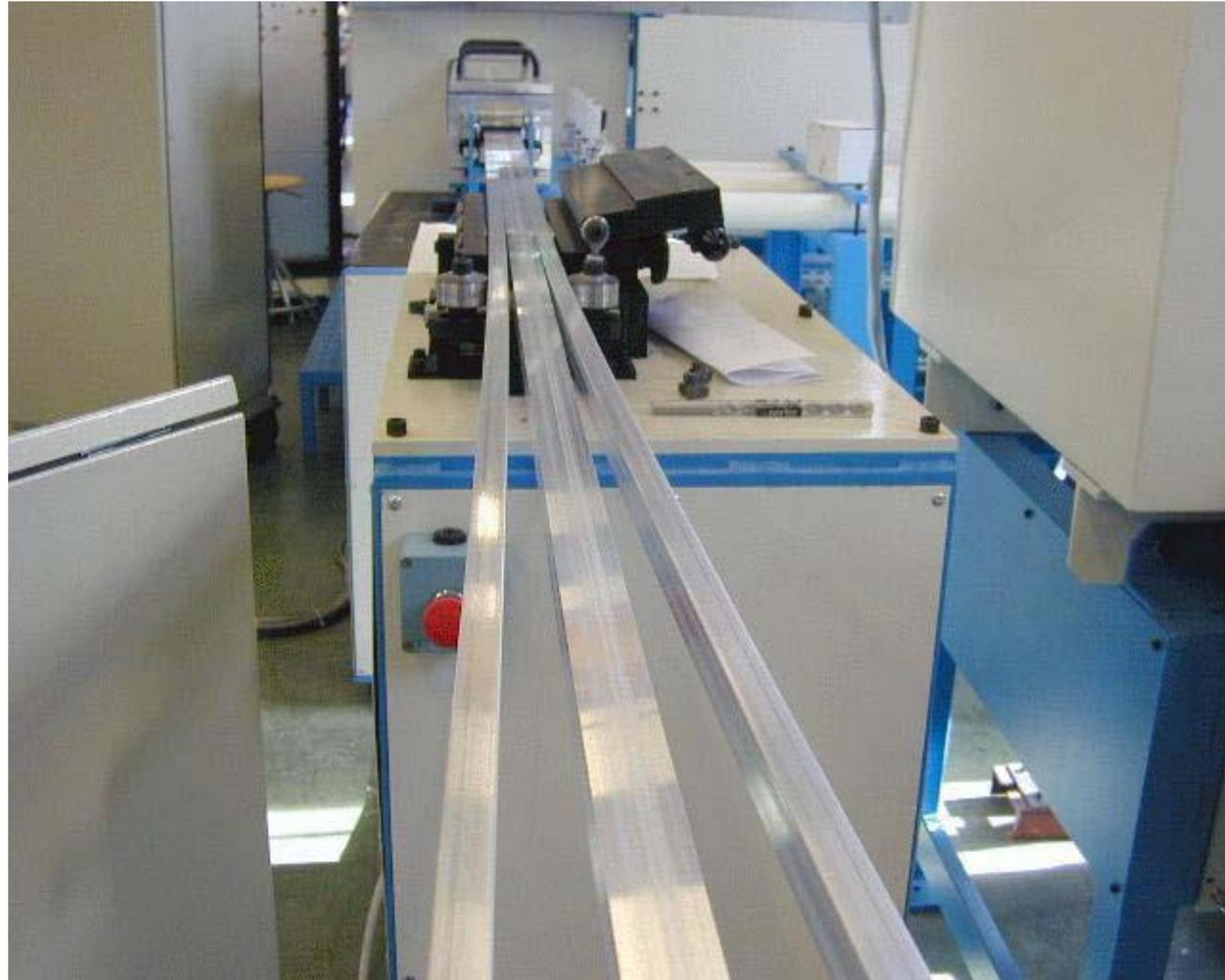
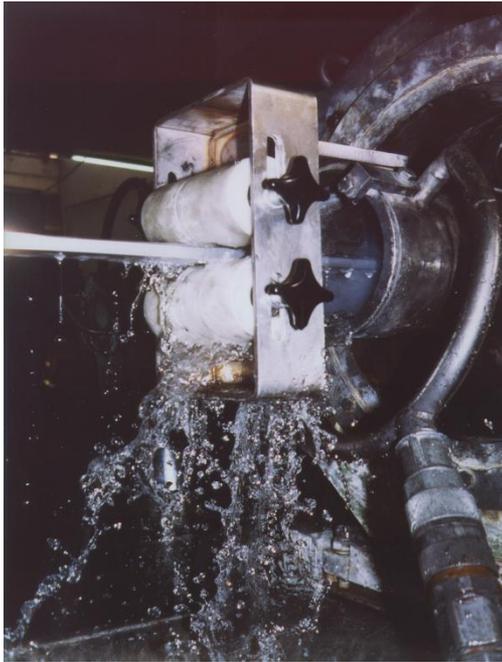
Tréfilage

Torsadage

Fabrication du câble

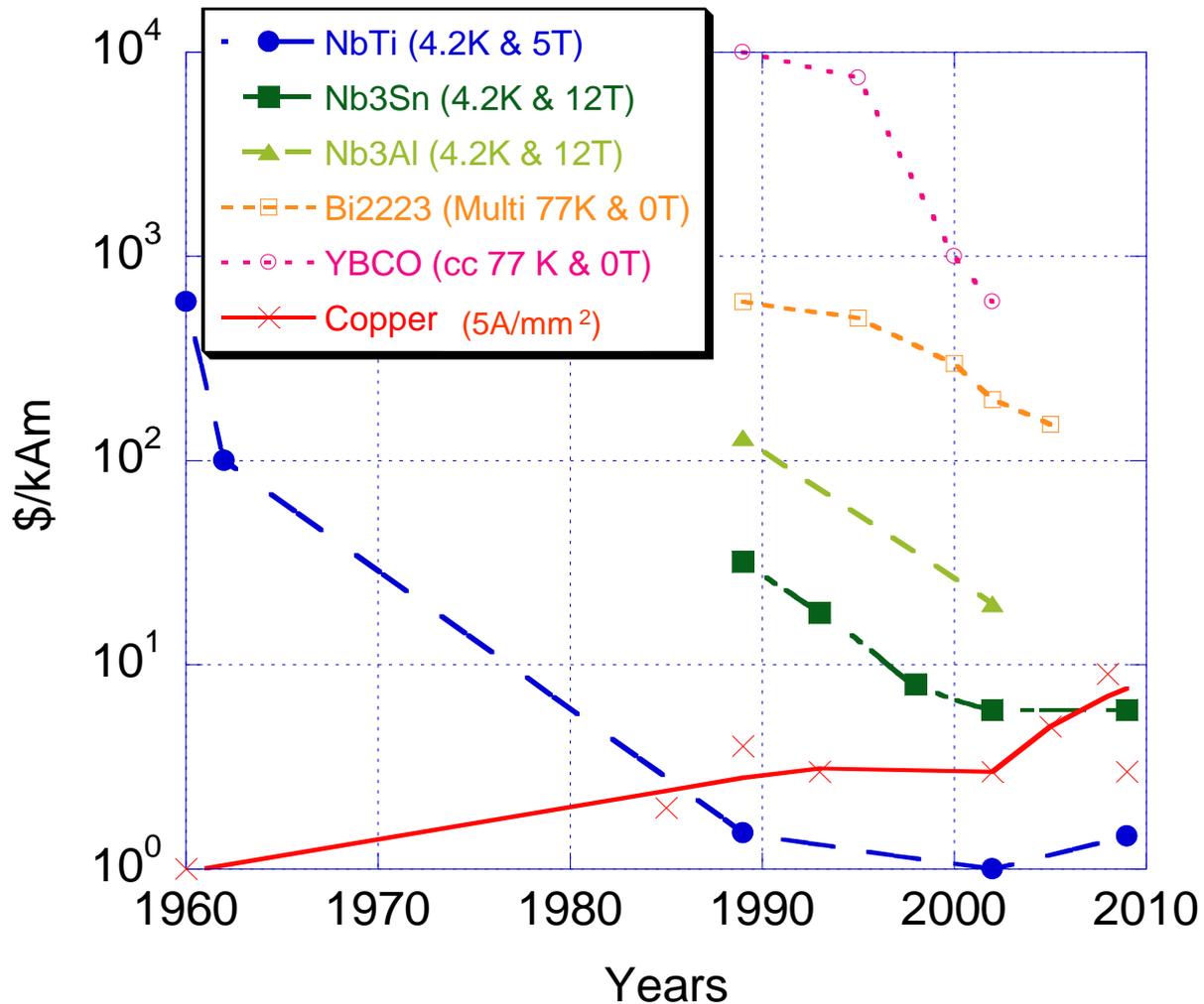


Fabrication du conducteur



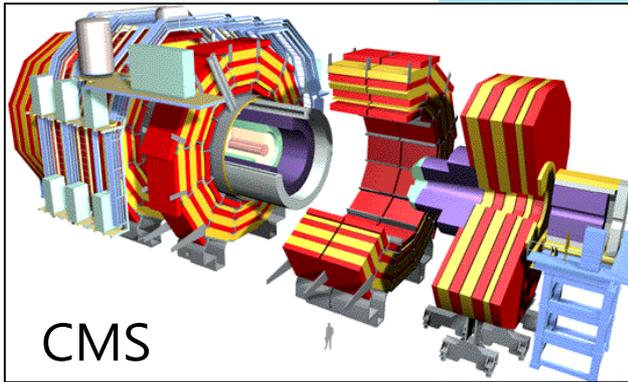
Coût des câbles supraconducteurs

US\$ 150/kg ↔ **~1 \$/kAm**

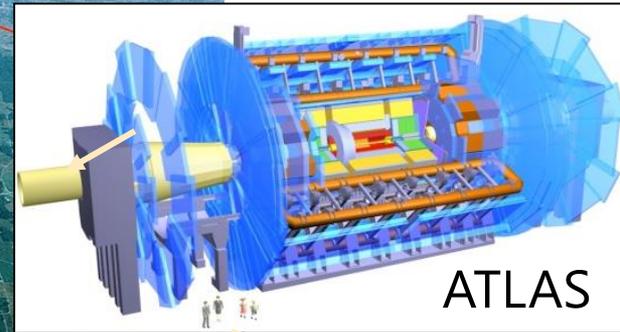


- La **S**upra**c**onductivité
- Les **c**onducteurs « supra »
- **A**imants **d'**accélérateurs et détecteurs : le **LHC**
- Aimants pour le **m**édical : **NEUROSPIN**
- Aimants pour la **f**usion thermonucléaire : **ITER**
- Le **f**utur... les « **HTc** »
- Autres applications

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.

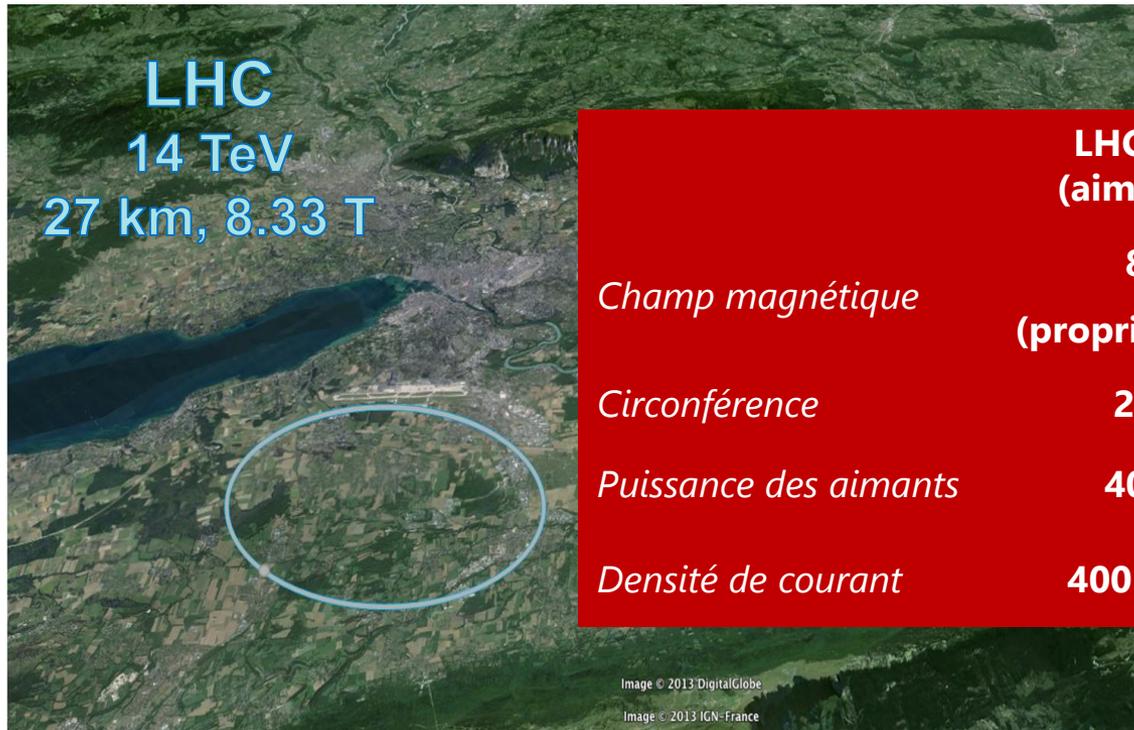


Refroidissement à 1,9 K en He superfluide.

Supraconductivité et aimants d'accélérateurs

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

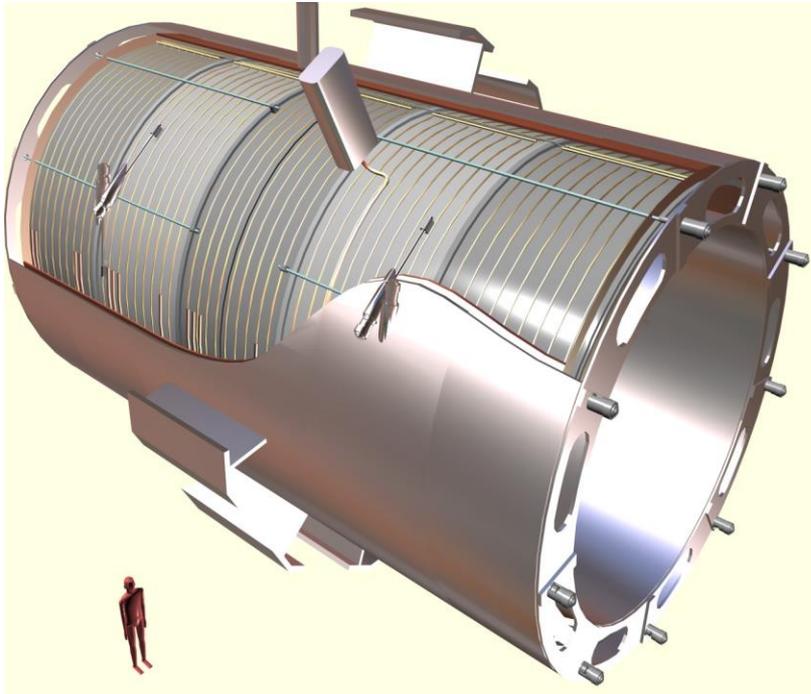
Energie du faisceau Champ magnétique Rayon de courbure



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

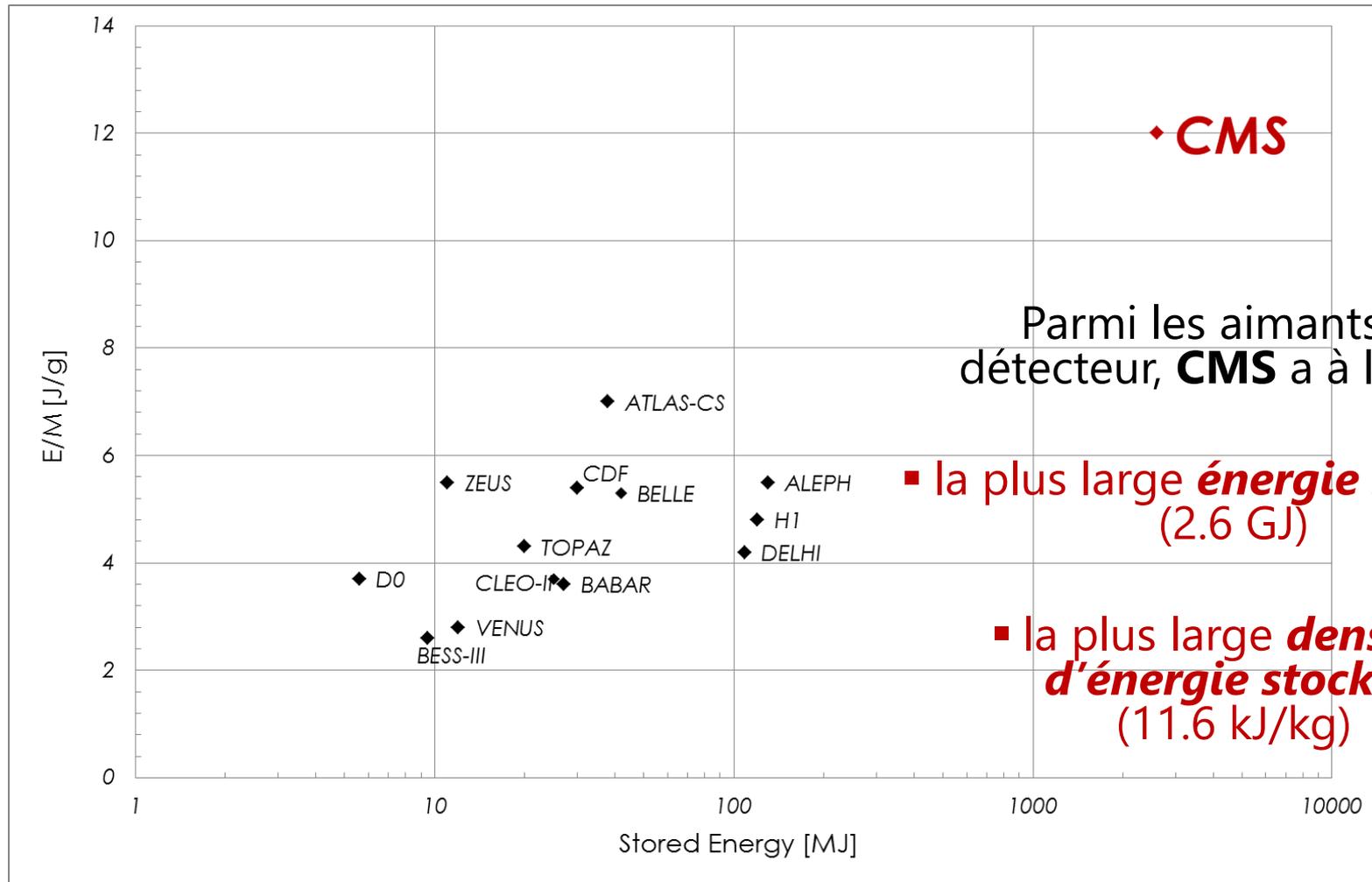
La supraconductivité permet d'atteindre des **valeurs importantes de champ magnétique** et donc de **réduire la taille et la consommation électrique** des accélérateurs.

Solénoïde CMS (Compact Muon Solenoid)



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

Energie de CMS

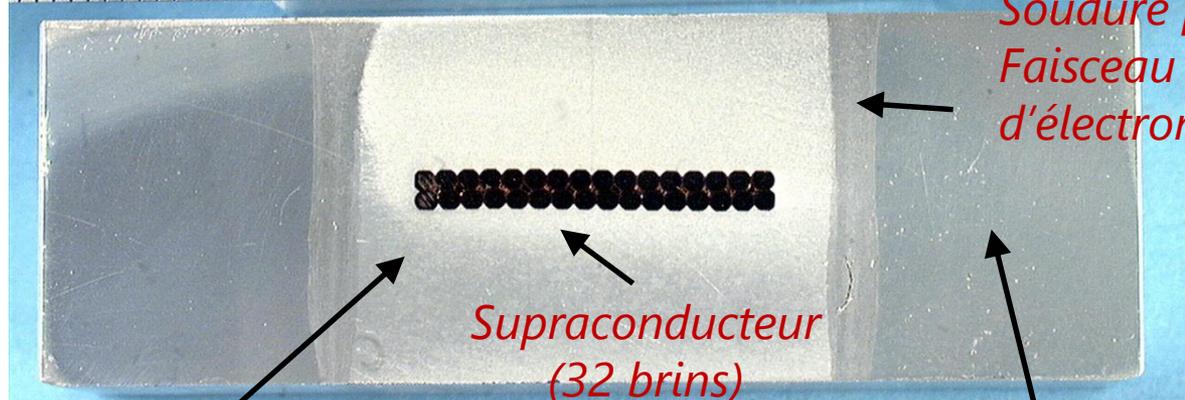
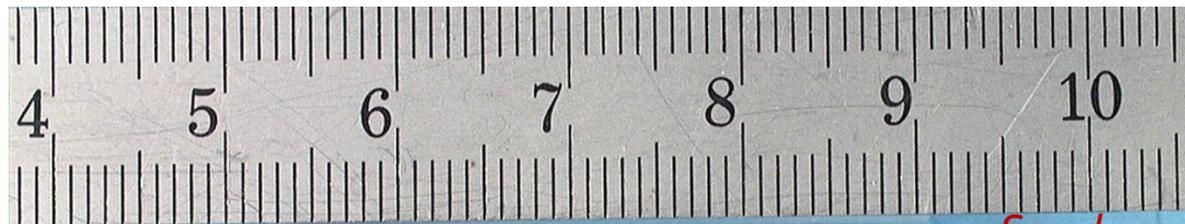


Parmi les aimants de détecteur, **CMS** a à la fois :

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

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

Conducteur du solénoïde CMS

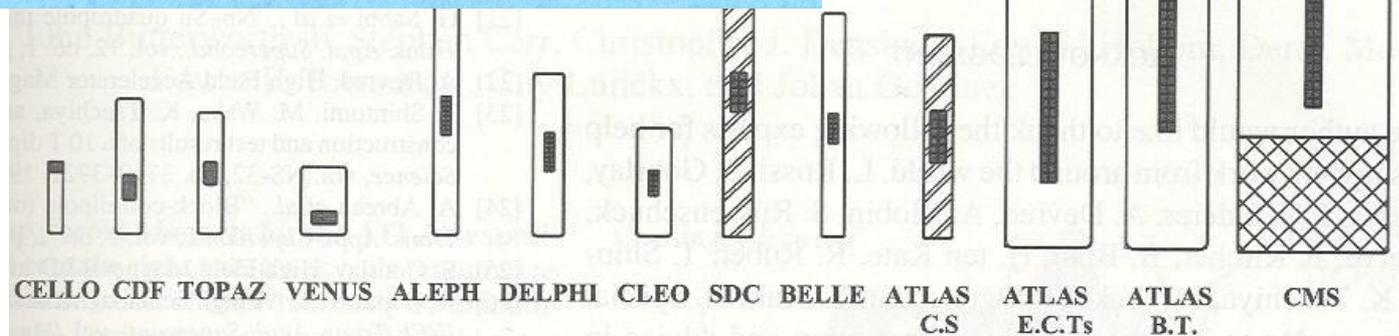


Soudure par
Faisceau
d'électron

Supraconducteur
(32 brins)

Stabilisant thermique:
Aluminium très haute
pureté: 99.998%

Renfort mécanique:
Alliage d'aluminium 6082
T5

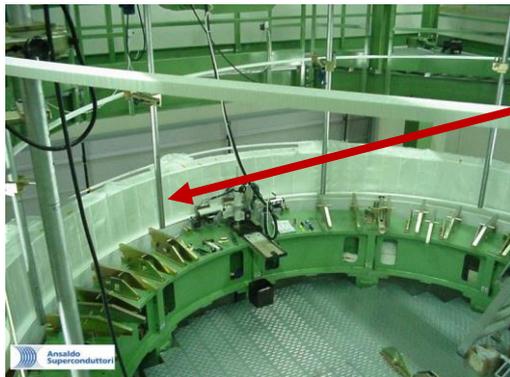
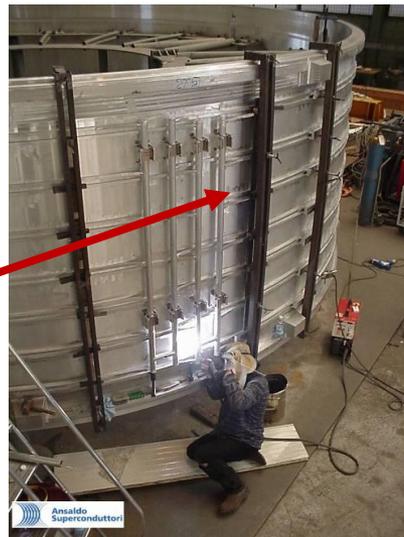


Réalisation des modules



*Polymérisation
CB-1*

Finition CB0

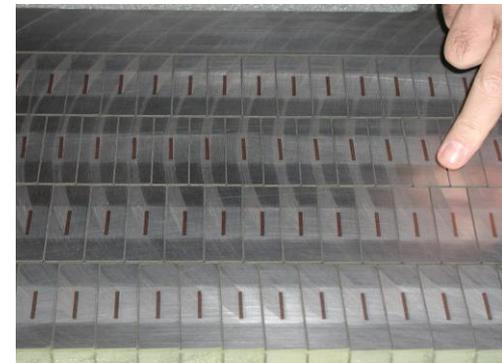


*Bobinage
CB+1*

*Réalisation
cylindre CB+2*

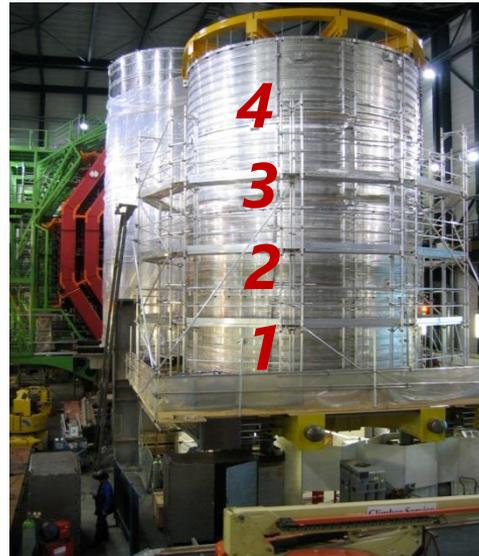


Coupe du bobinage



Assemblage

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



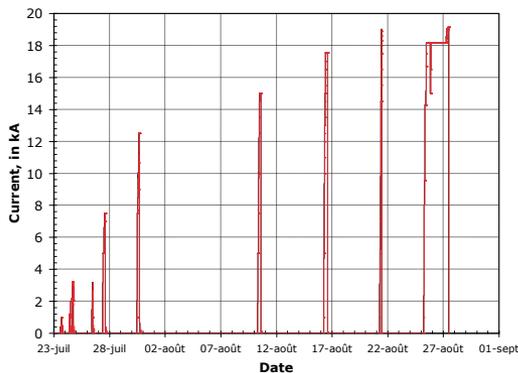
Jonctions



Retournement et insertion

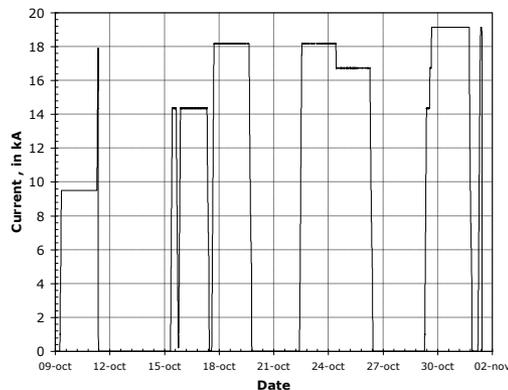


Tests



1^{ère} 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

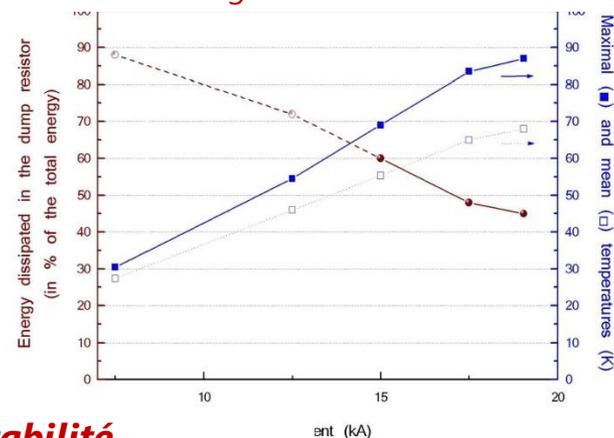


2^{ème} campagne

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

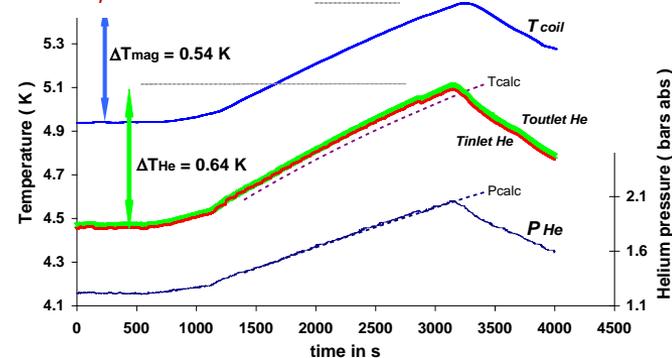
Protection

- 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

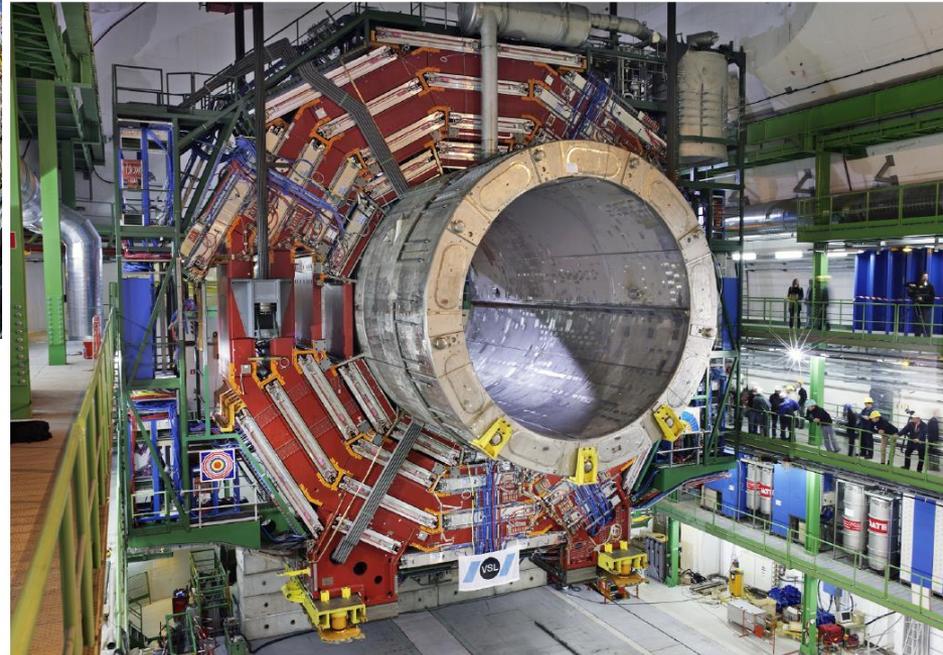
- $B_0 = 4$ T
- T_{cs} calculée : 6.44 K
- $\Delta T > 0,6$ K à 4 T



Descente de la bobine en caverne



Début de la descente

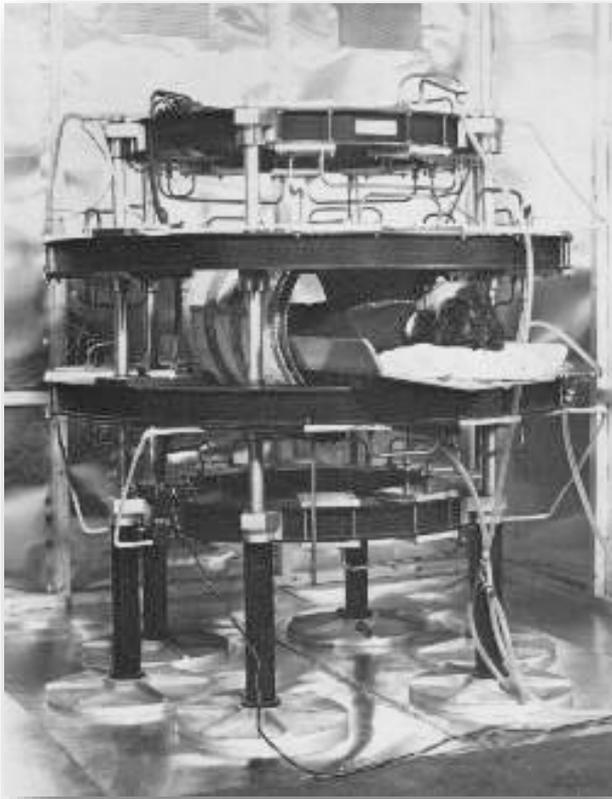


YB0 landing in the CMS experiment hall

*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.

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

μ moment magnétique , γ le facteur gyromagnétique et I le spin

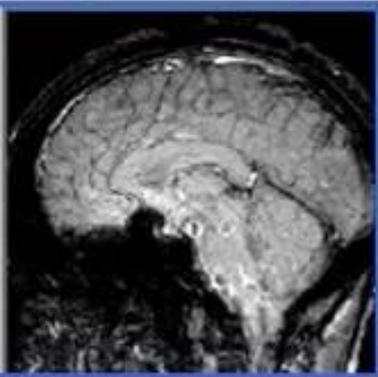
\Rightarrow **42.77 MHz/T pour le proton**

La qualité du signal RMN est relié :

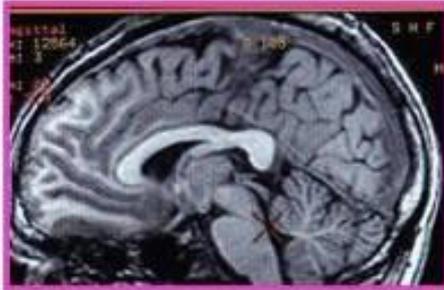
- ✓ **Au niveau de champ magnétique** : aujourd'hui le plus fort aimant de RMN atteint 1,1 GHz \Leftrightarrow 25,71 T à 2,2 K.
- ✓ **A l'uniformité de champ** : $\varnothing 5\text{mm} \times \text{H}10\text{mm}$ volume : $\Delta B/B_0 \sim 10^{-6} - 10^{-8}$
 $\Delta B/B_0 \sim 10^{-9} - 10^{-10}$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

Influence de la valeur du champ – IRM

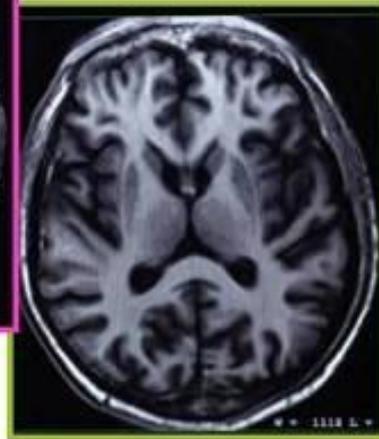
0.23 T



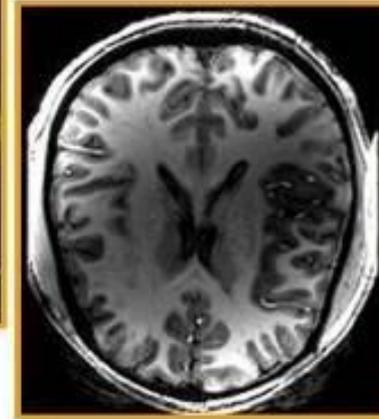
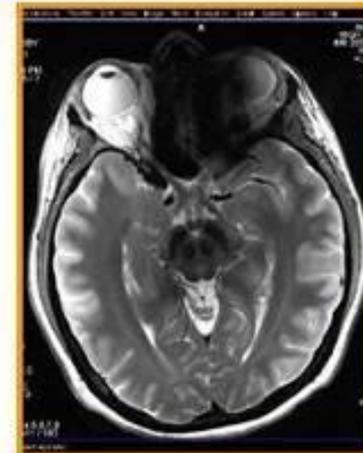
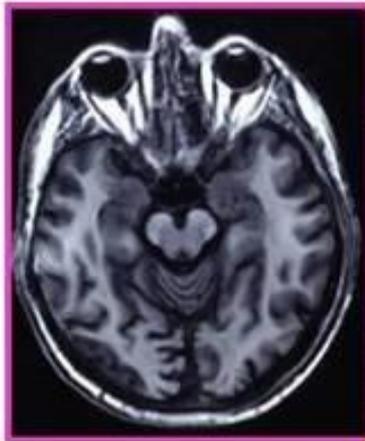
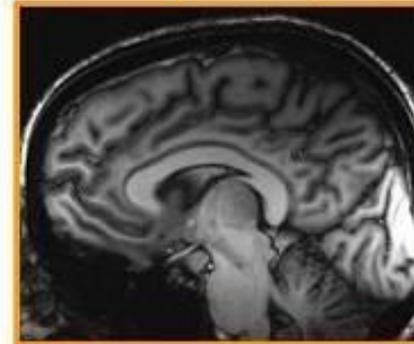
1.5 T



3 T

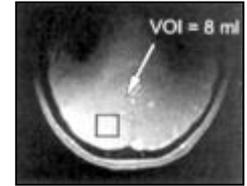


7 T

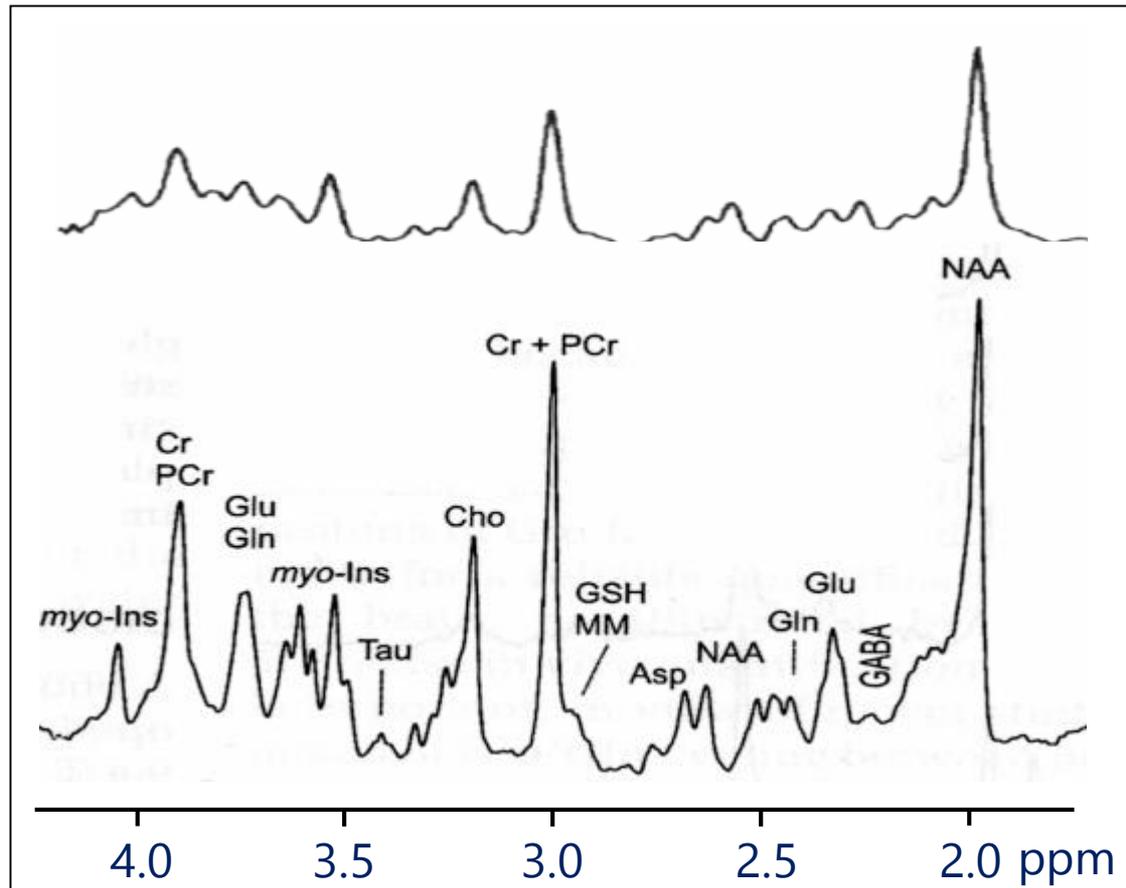


Résolution spectrale - RMN

Spectroscopie RMN ^1H dans le cerveau humain :

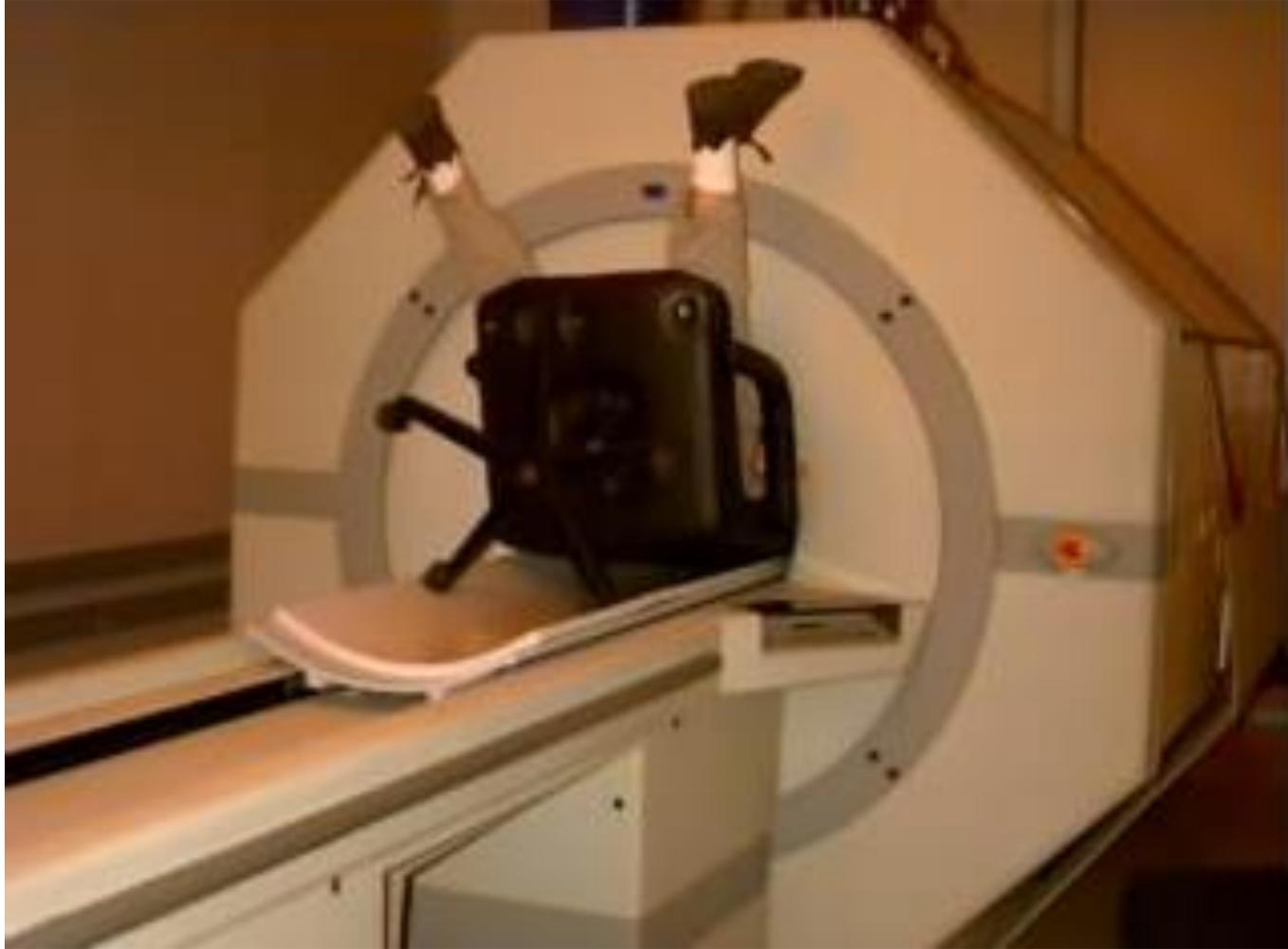


2 Tesla :
(Frahm *et al.*)



7 Tesla :
(Tkac *et al.*)

Quelques précautions ...



Caractéristiques d'un système IRM

La **résonance du proton** est utilisé.

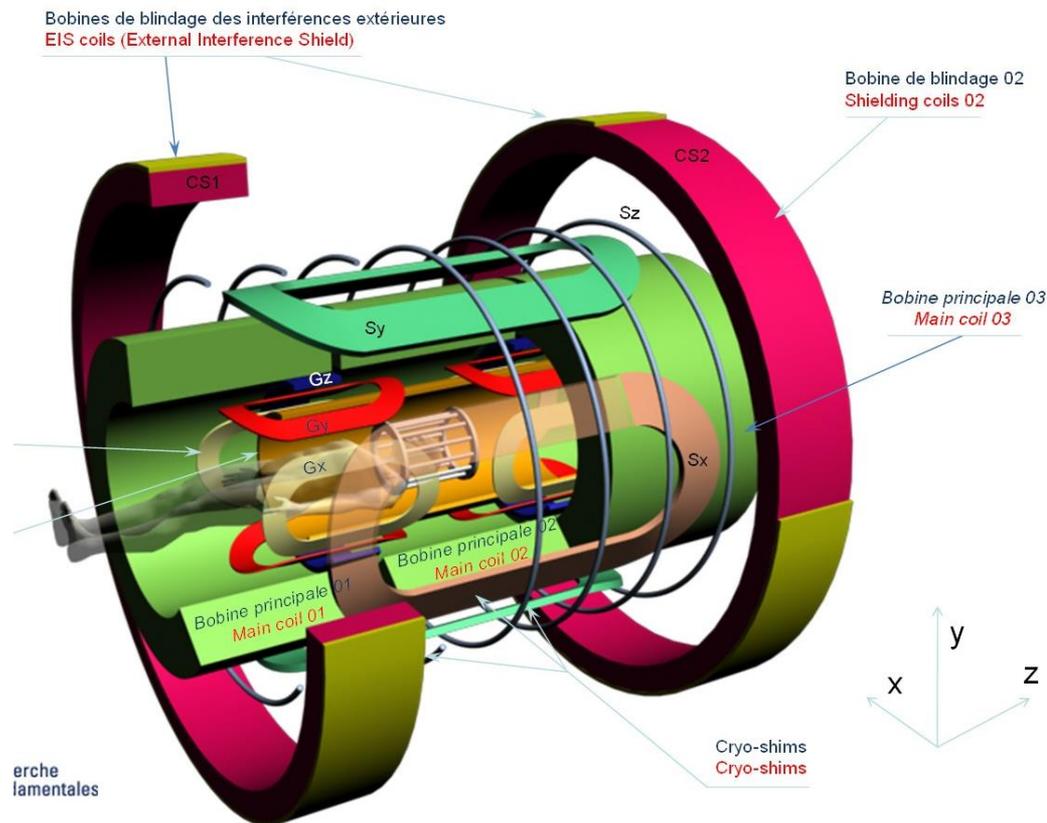
Pour produire une image des **bobines additionnelles** sont nécessaires pour produire un gradient contrôlé d'environ 10^{-3} du champ principal. Ce bobinage de **gradient** doit être écranté pour éviter les courants induits dans le cryostat.

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

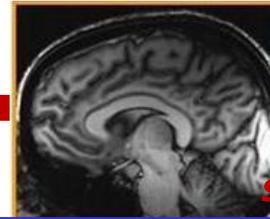
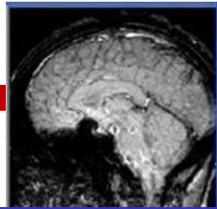
L'aimant est shimé avec des pièces en acier doux et/ou des petites bobines résistives ou supra pour prendre en compte toutes les sources locales de perturbations magnétiques.

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

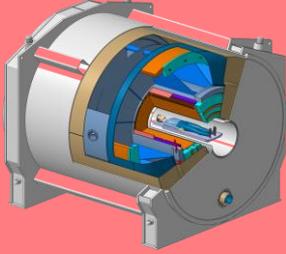
Les « bobinages » d'un IRM



IRM « corps entiers » typiques



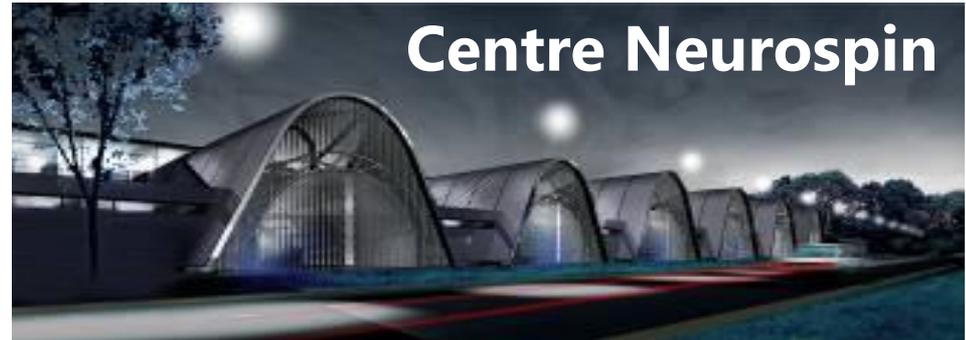
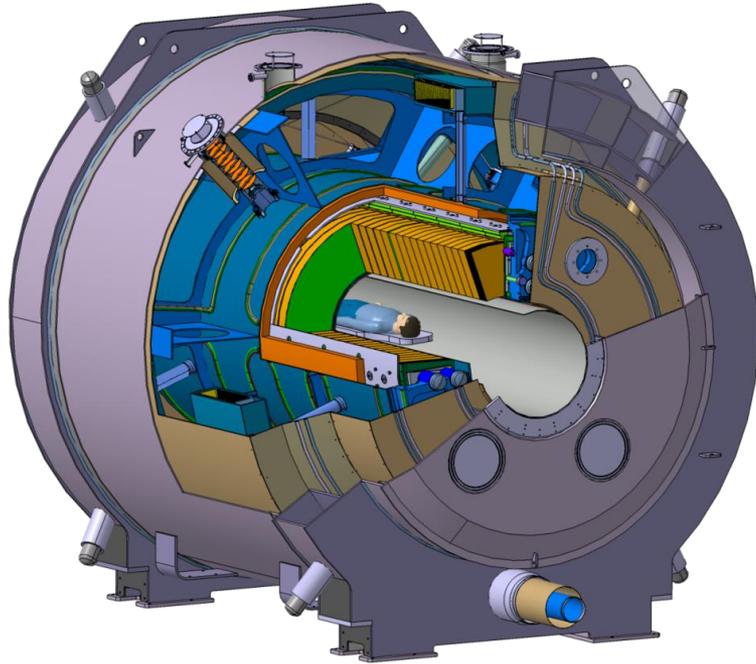
Augmentation de la
résolution
spatiale et temporelle

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/drf#dsm+dsv)

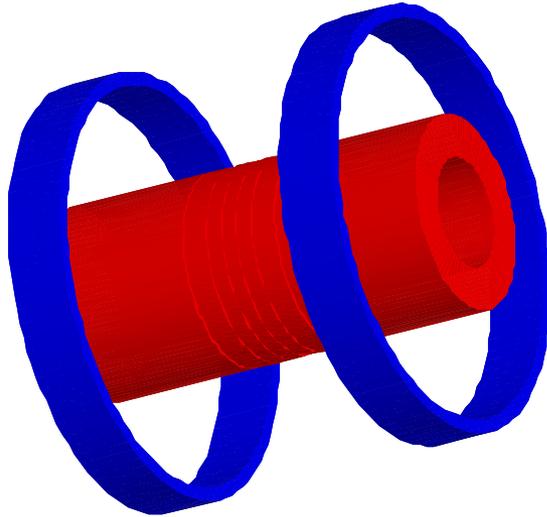


Objectifs, observer :

- ✓ 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 m³

4.m

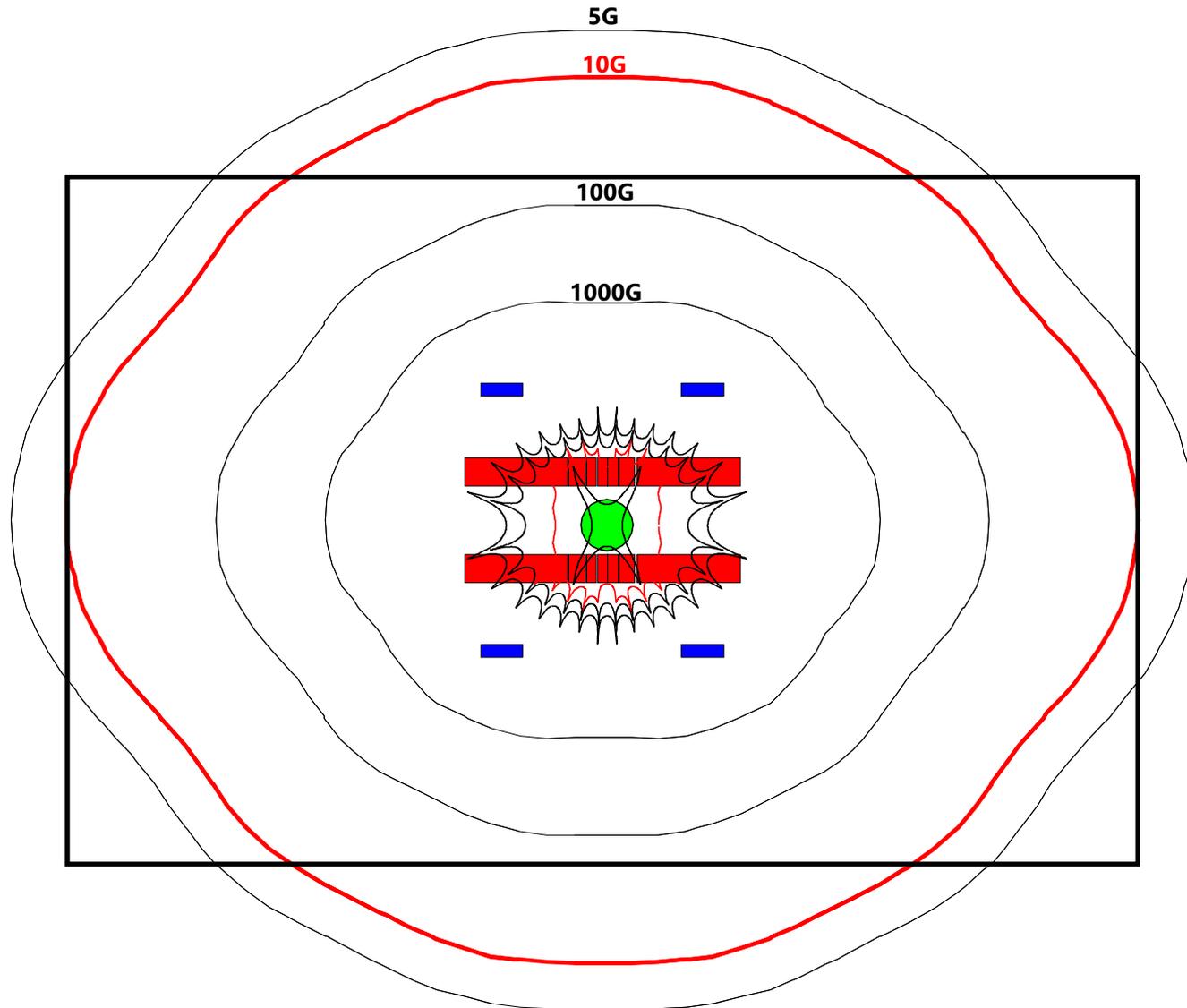
1.m

4.m

28 A/mm²

150 tons

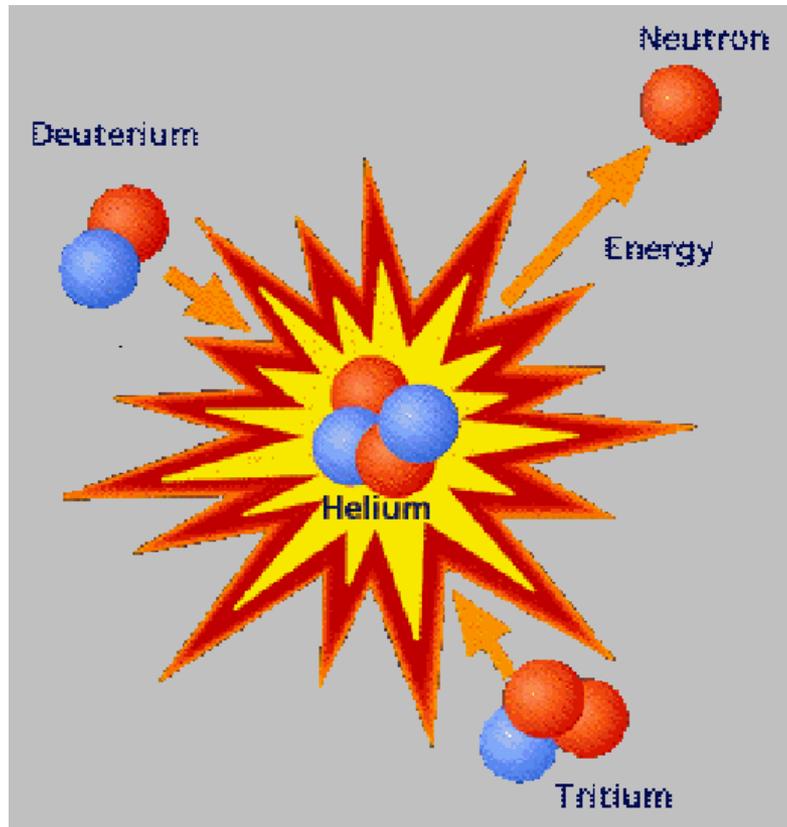
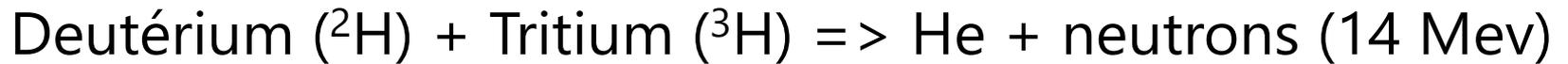
Blindage actif et homogénéité



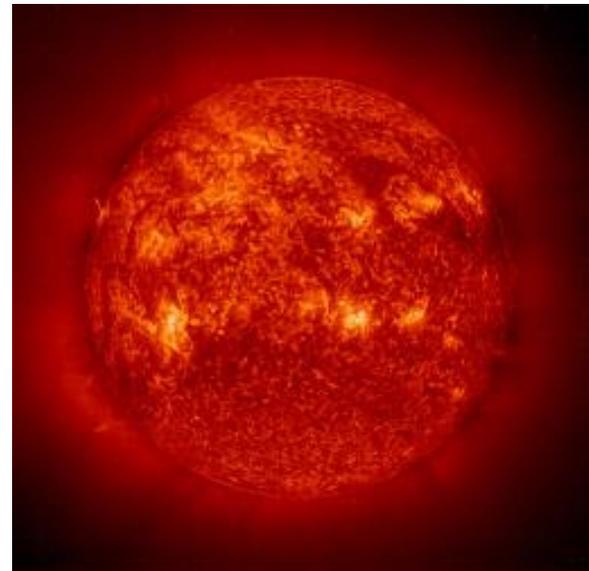
- La **Supraconductivité**
- Les **conducteurs** « supra »
- Aimants **d'accélérateurs et détecteurs** : le **LHC**
- Aimants pour le **médical** : **NEUROSPIN**
- Aimants pour la **fusion** thermonucléaire : **ITER**
- Le **futur**... les « **HTc** »
- Autres applications

Fusion thermonucléaire contrôlée

Réaction de fusion :



- ❑ **Deutérium** : 33 g/m³ 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

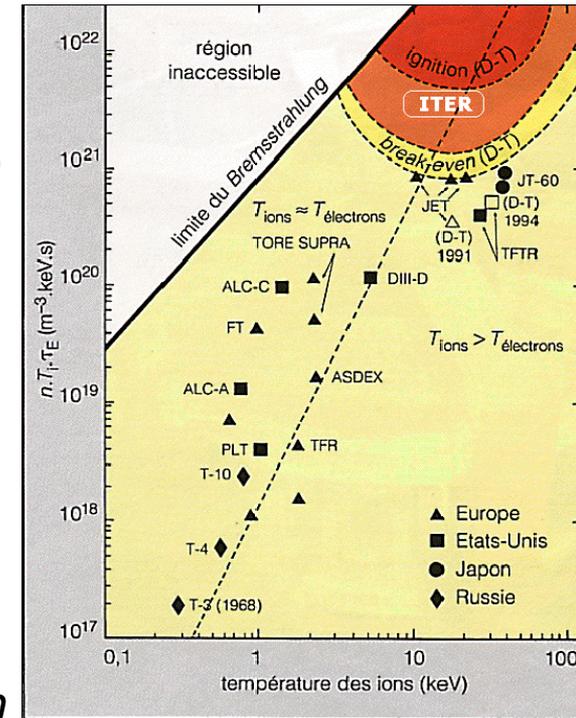
- Maintien du plasma par une induction magnétique
- Forte induction dans volume important : aimants SC

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

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

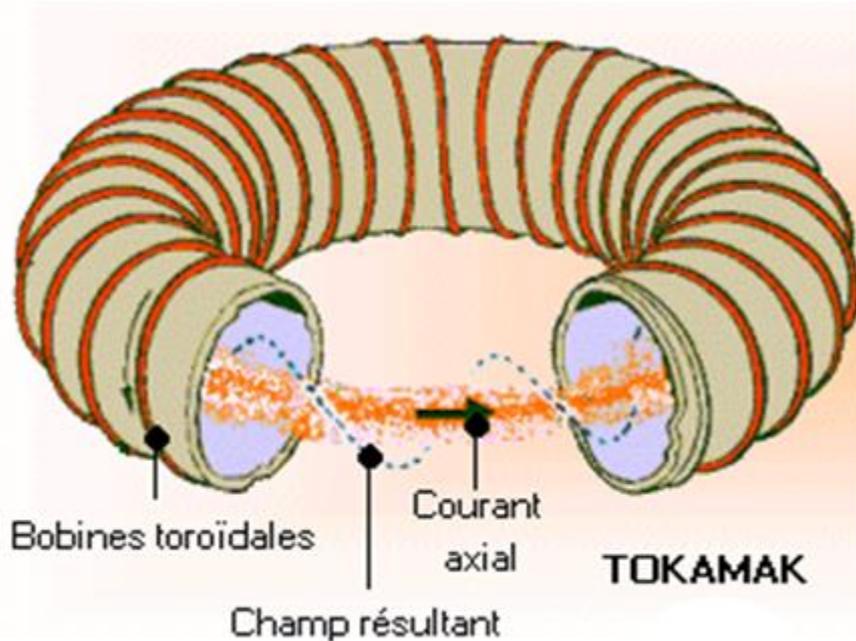
(N : densité de noyau ; W : énergie (température) ; τ : temps de confinement)

Concentration en noyaux forte, Temps de confinement longs.



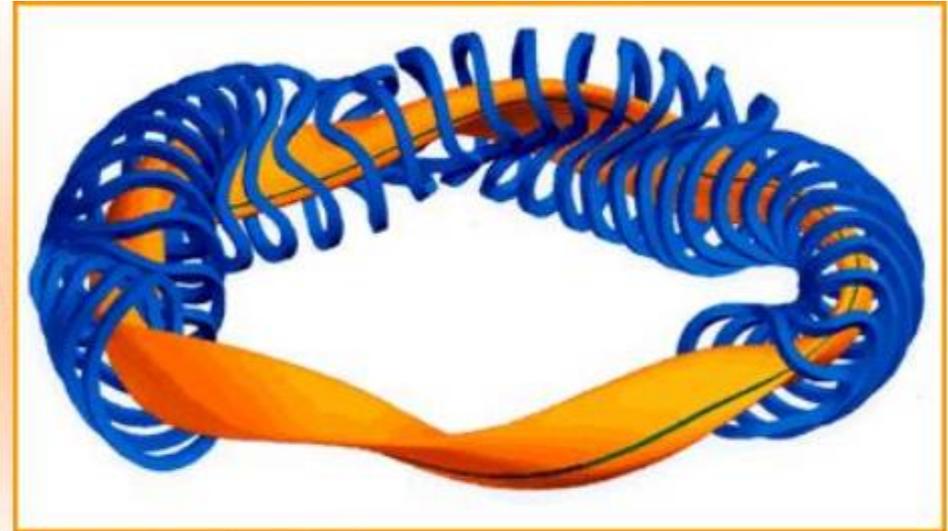
Confinement magnétique

- ✓ Plasma : particules chargées
- ✓ Confinement optimal :



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

Action de B
Induction hélicoïdale

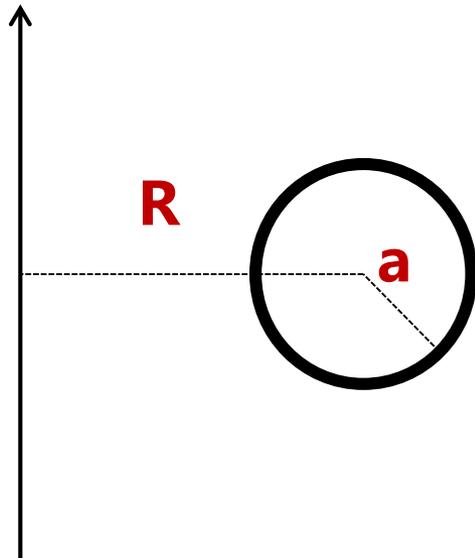


STELLARATOR



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

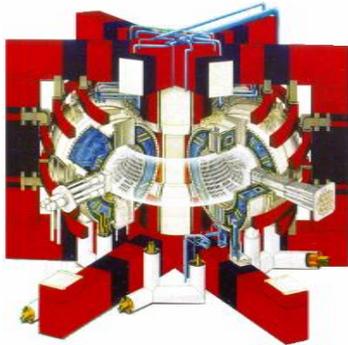
$$t_{\text{E,th}} = 0.0562 I_{\text{p}}^{0.93} B_{\text{T}}^{0.15} P^{-0.69} n_{\text{e}}^{0.41} M^{0.19} R^{1.97} e^{0.58} k_{\text{a}}^{0.78}$$

Fusion : nécessité des supraconducteurs

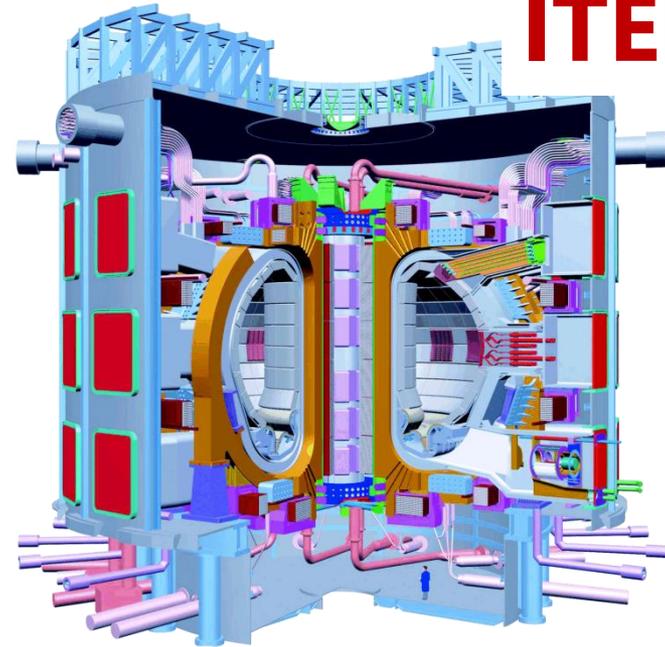
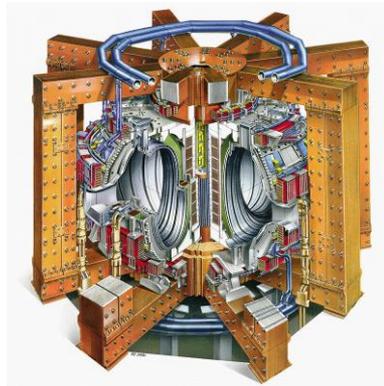
$$Q = P_{\text{fus}} / P_{\text{inj}}$$

ITER (SC)

Tore Supra
(partly SC)



JET (conv.)

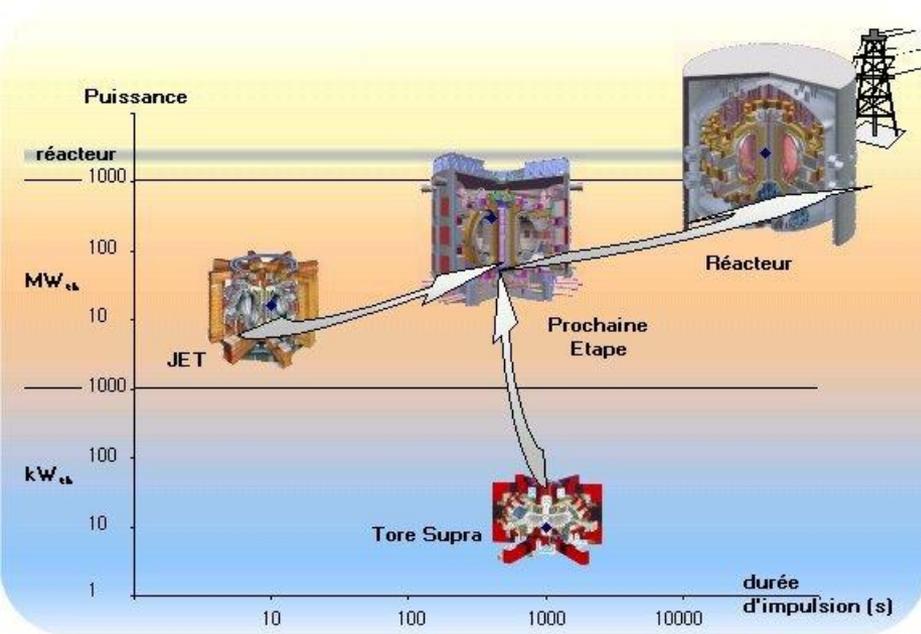


V_{plasma}	25 m³
P_{fusion}	~ 0
t_{plasma}	~ 400 s
I_{plasma}	1.5 MA
$B_{\text{Toroïdal}}$	4.2 T
Q	0

V_{plasma}	80 m³
P_{fusion}	~ 16 MW
t_{plasma}	~ 30 s
I_{plasma}	5 MA
$B_{\text{Toroïdal}}$	3,5 T
Q	0,64

V_{plasma}	837 m³
P_{fusion}	~ 500 MW
t_{plasma}	~ 400 – 1000 s
I_{plasma}	15 MA
$B_{\text{Toroïdal}}$	5.3 T
Q	10

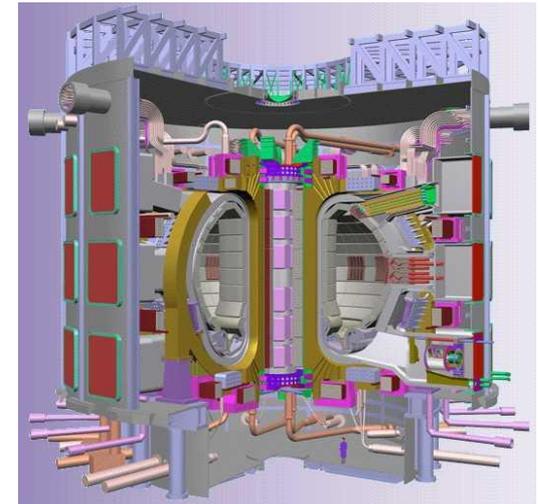
International Thermonuclear Experimental Reactor



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

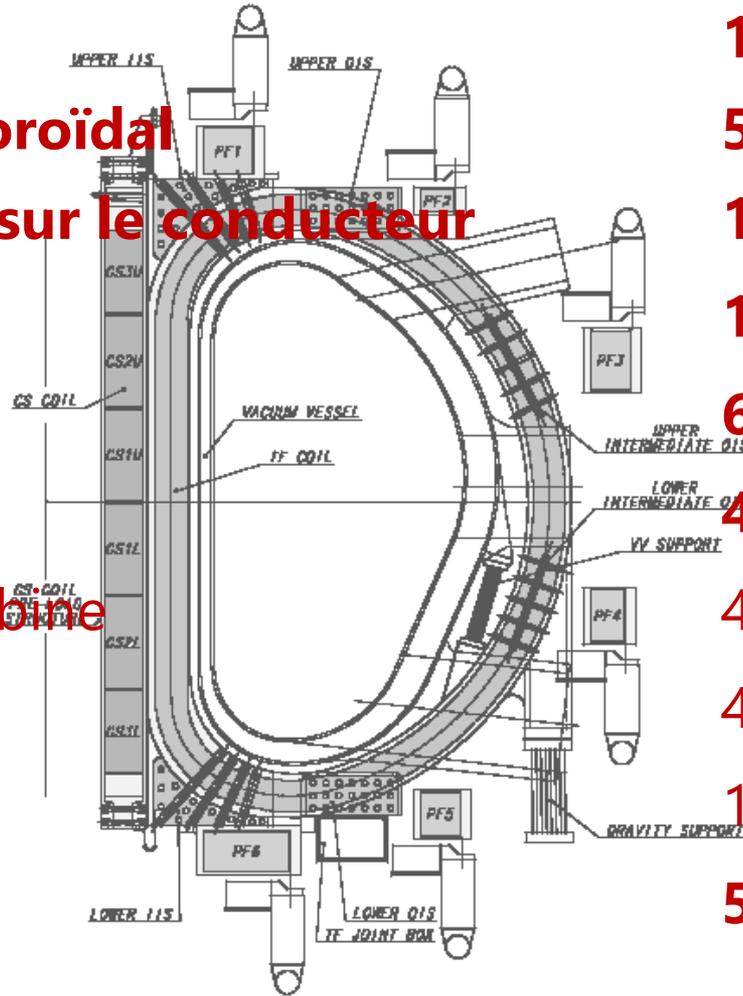
Objectifs d'ITER

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



Bobines toroïdales

- ❖ Nombre de bobines **18 Nb₃Sn**
- ❖ 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 MYSTÉRIEUR



Réacteur commercial 2020

Investisseur Lockheed Martin

GENERAL FUSION
LE PLUS SIMPLE



Premier réacteur 2025

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

TRI ALPHA
LE PLUS SENSATIONNEL



Pas de date précise

Investisseurs Goldman Sachs, Vulcan Capital, Venrock...

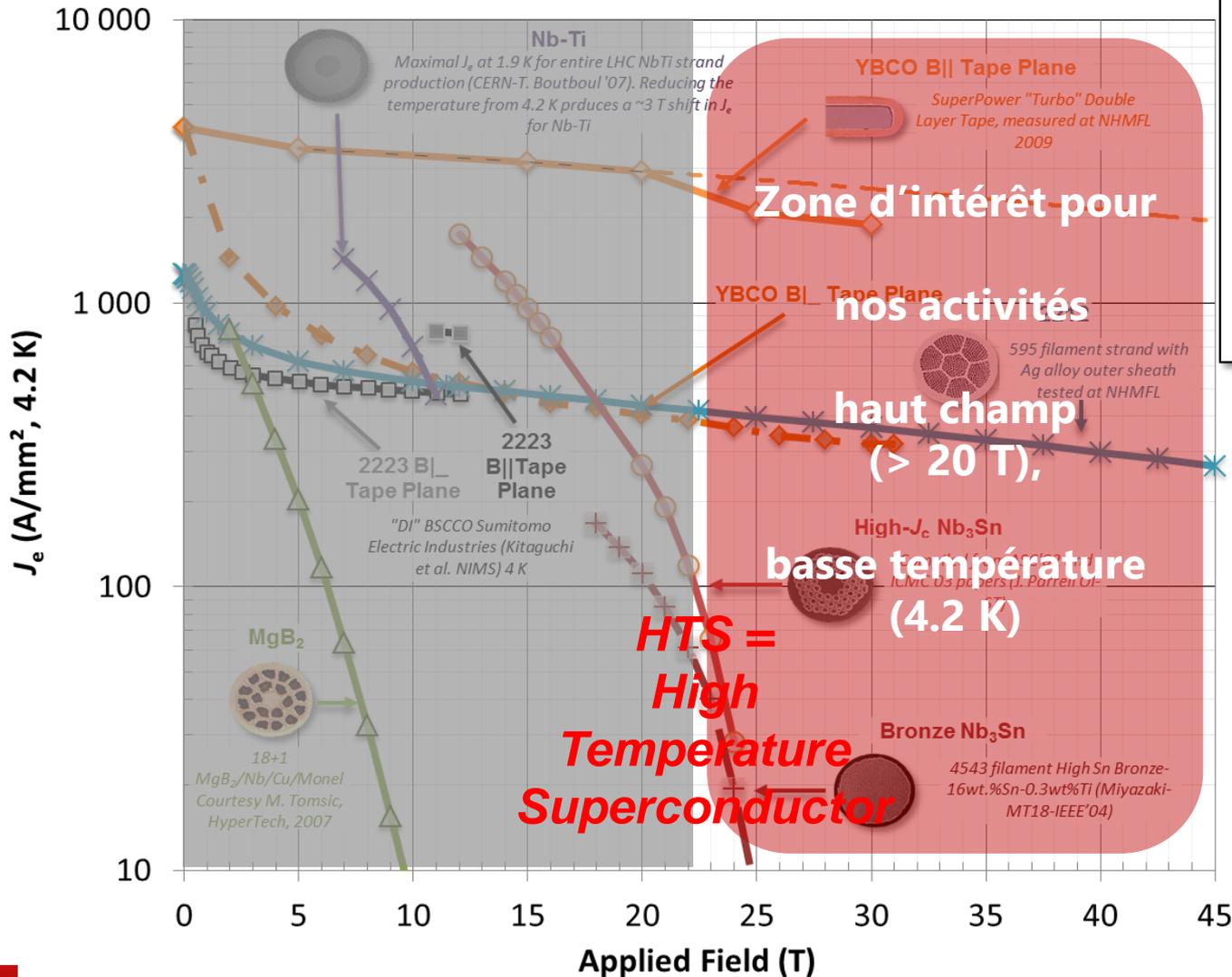
- Développements de **start-up**,
- Réacteurs **plus petits, plus flexibles**,
- Soutien financier des acteurs de **l'économie numérique**,
- **Budgets # 100 M€**

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

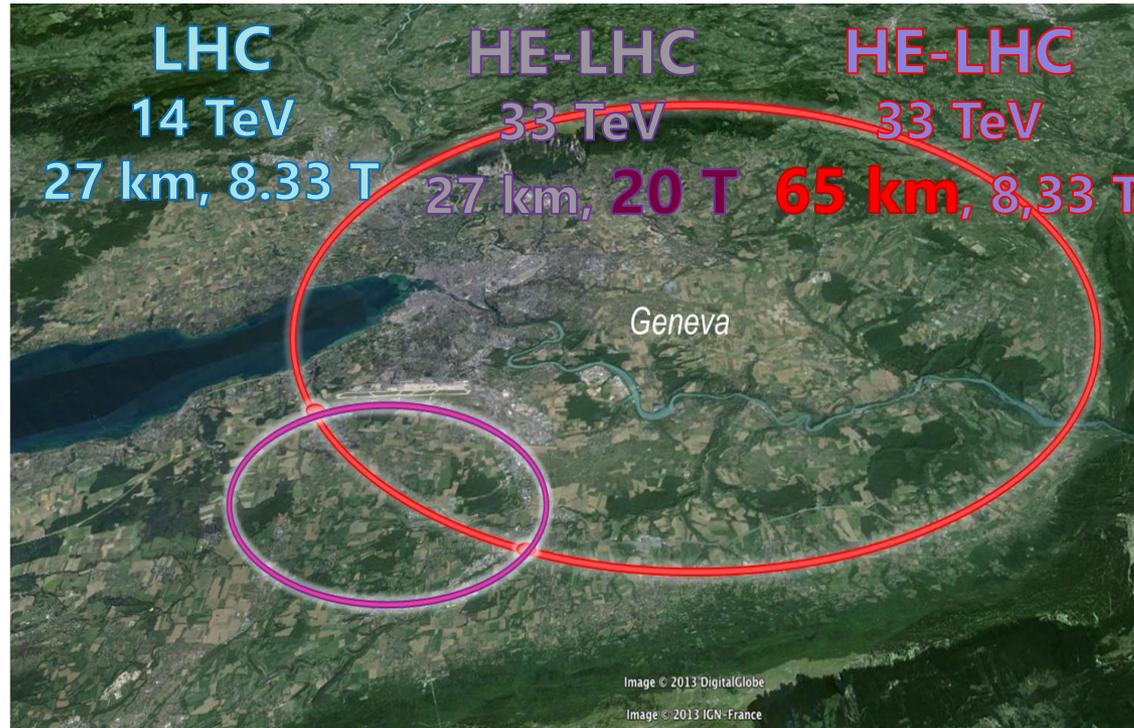
Current Density Across Entire Cross-Section



Energie du faisceau

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

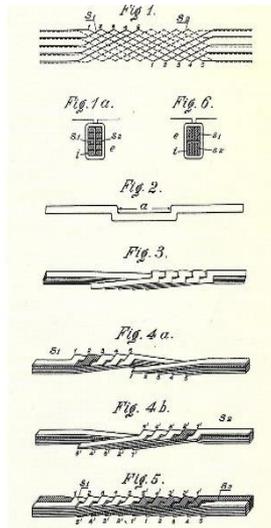
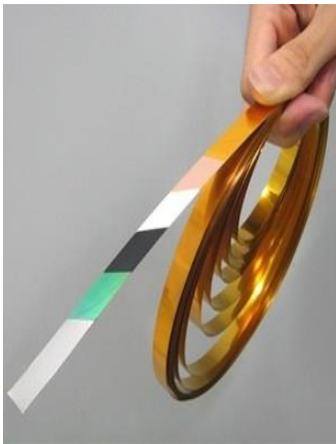
Energie du faisceau Champ magnétique Rayon de courbure



Matériaux HTS : YBCO ou Bi2212 ?

YBCO

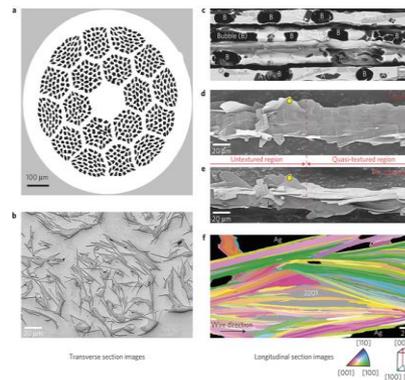
Yttrium
Barium
Copper
Oxide



Câble Roebel



Câble de Rutherford



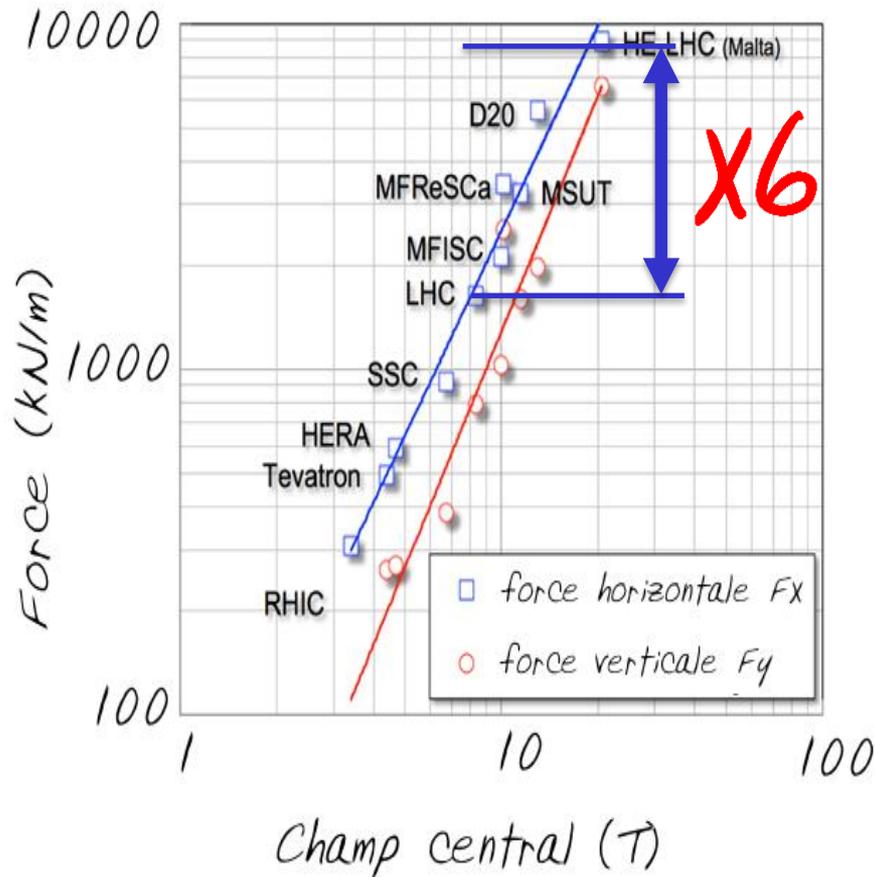
Bi2212

Bismuth
Strontium Calcium
Copper
Oxide

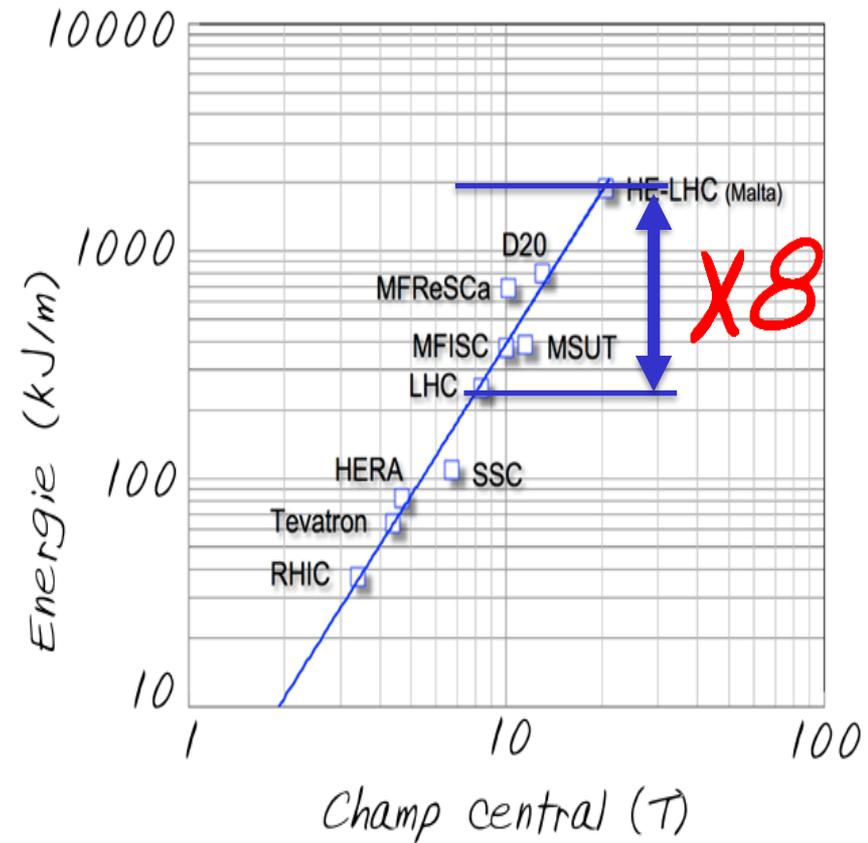


Conséquences d'un champ élevé ?

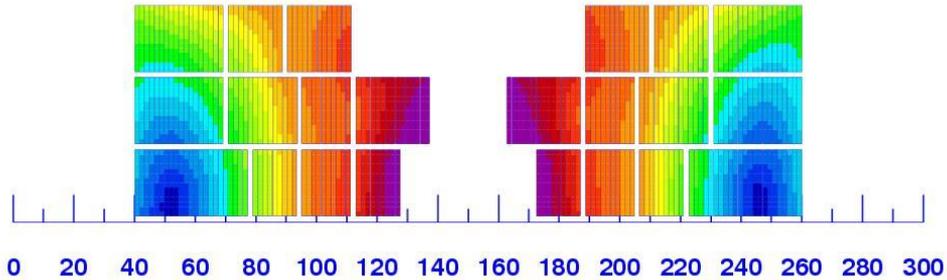
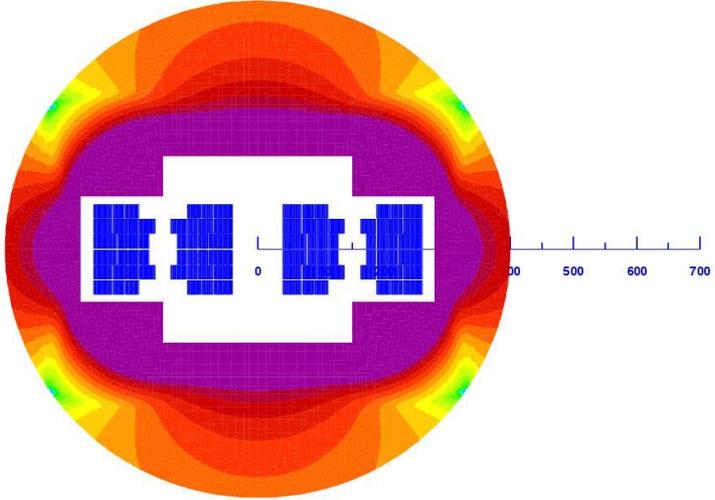
Mécanique



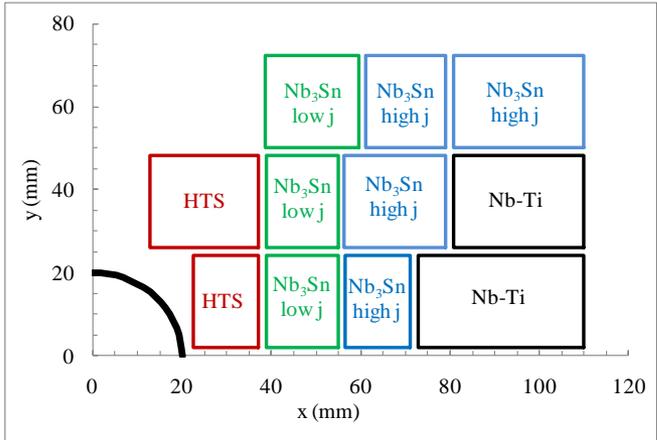
Protection



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



Material	N. turns	Coil fraction	Peak field	$J_{\text{overall}} \text{ (A/mm}^2\text{)}$
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



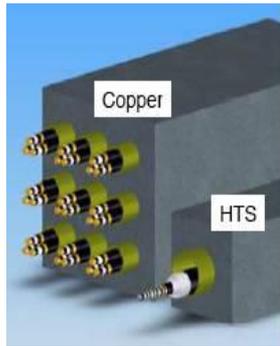
Courtesy L. Rossi & E.Todesco

- 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

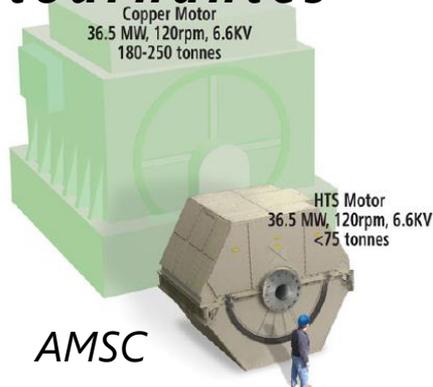
Câbles



Distribution d'énergie



Machines tournantes



Transfo.



Photo Siemens

Lévitacion



Maglev

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



Diamagnétisme

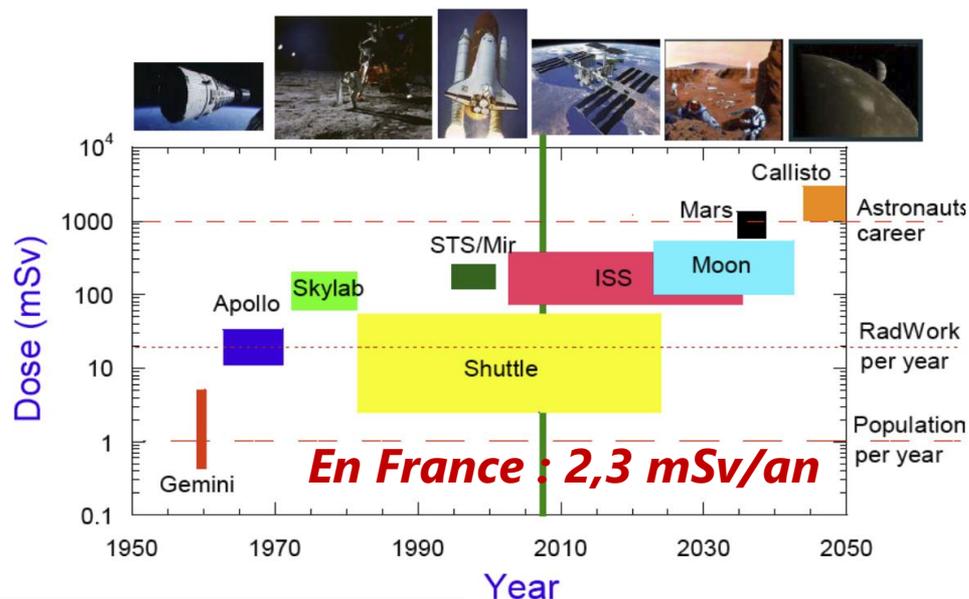
« grad B^2 »

Effet Meissner

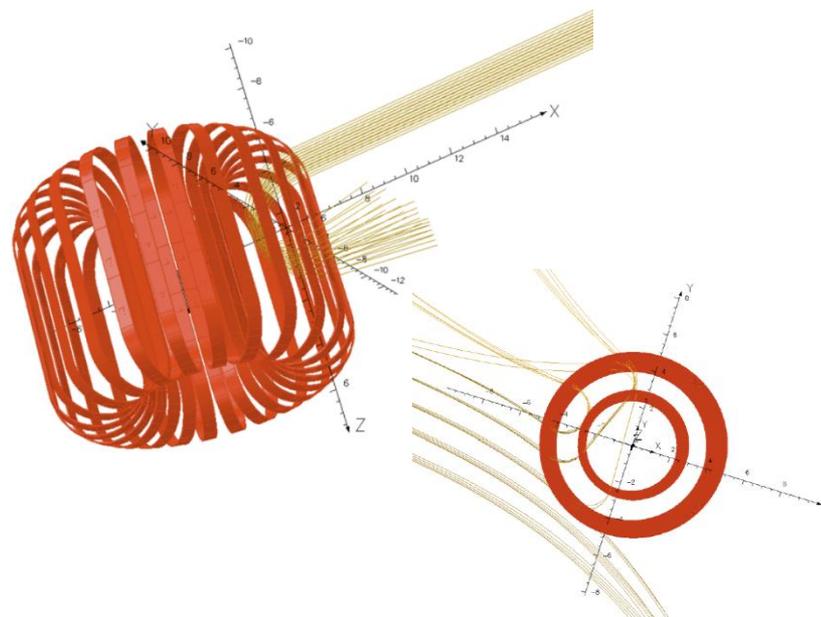
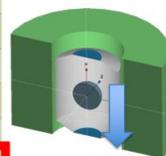
Diamagnétique parfait



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%
MT4	46%	24%	22%	76	36%
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/>

