



irfu

Les aimants supraconducteurs

ANF « Ecole des accélérateurs »

Valerio Calvelli

19 Mars 2025



Plan de l'exposé

1. La Supraconductivité

La nature de la "supra"

2. Les Supraconducteurs

Types et applications

3. Les aimants pour les accélérateurs des particules

Les typologies et les défis des aimants pour accélérateurs

4. Les aimants pour détecteurs des particules

Les typologies et les défis des aimants pour détecteurs

5. Les autres applications



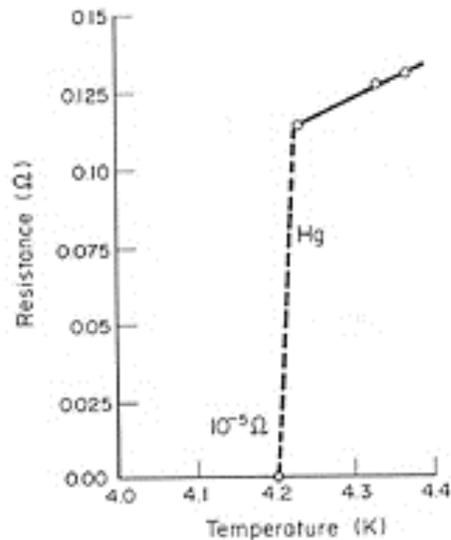


1 ■ La Supraconductivité

La Supraconductivité

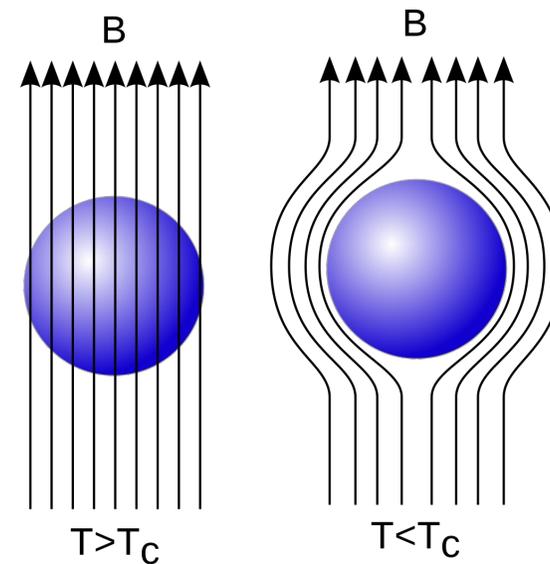
Etat de la matière caractérisé par :

Une résistivité électrique nulle



1911 – Holst & Onnes

Une expulsion du champ magnétique grâce à des courants de blindage (diamagnétisme parfait)



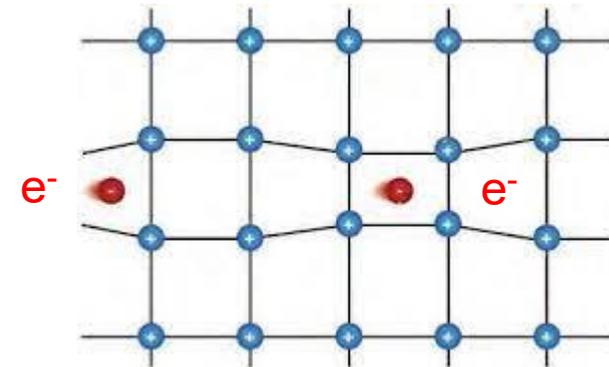
1933 – Meissner

La Nature de la Supraconductivité

La supraconductivité est un phénomène quantique à grande échelle.

Les ingrédients sont:

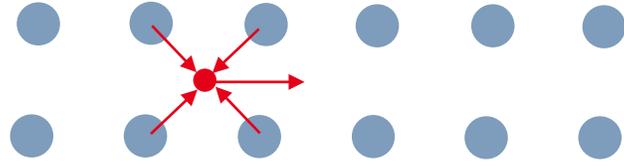
- Des électrons libres (e^-) dans un réseau cristallin (i^+)
- (Presque) aucune vibration des noyaux atomiques



La Nature de la Supraconductivité

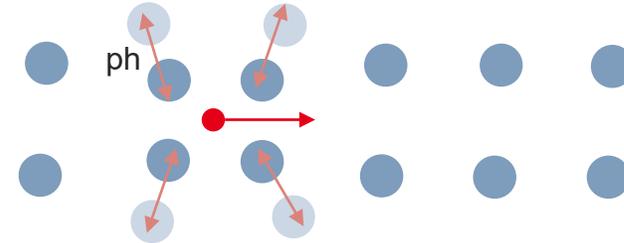
01

e^- attire i^+ par attraction coulombienne



02

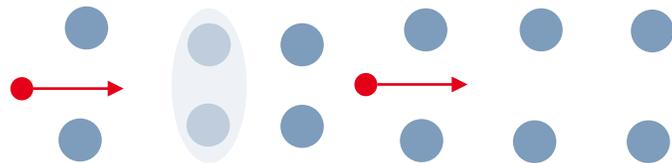
La cellule du réseau cristallin commence à vibrer élastiquement au passage de l'électron.
Vibration = onde \rightarrow Phonon



03

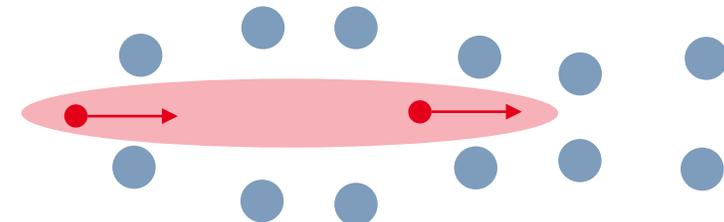
Le phonon cache (partiellement) la charge négative de l'électron et attire un deuxième e^-

Il n'y a plus de répulsion e^- / e^-



04

Vue la double nature des particules (ondes), les fonctions d'onde des **deux e^-** se super imposent et **agissent comme une seule particule (couple de Cooper)**

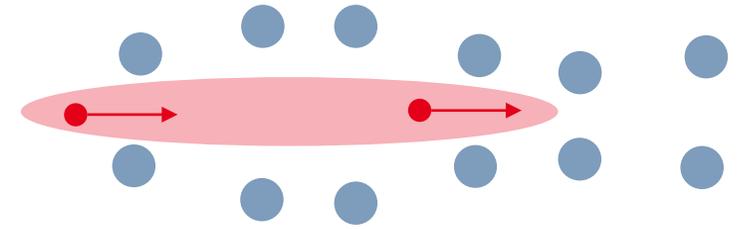


La Nature de la Supraconductivité

BONUS: les fonctions d'onde ont aussi un spin!

$$\sigma(e^-) = \pm 1/2 \rightarrow \sigma(e^-) + \sigma(e^-) = 0 \text{ ou } 1$$

Les couples de Cooper sont des bosons!



Toutes les couples peuvent occuper le même état quantique → **On peut en mettre combien on en veut!**

Un nombre ∞ d'électrons qui se déplacent → courant = ∞

C'est vrai?

Les limites : la courbe JBT

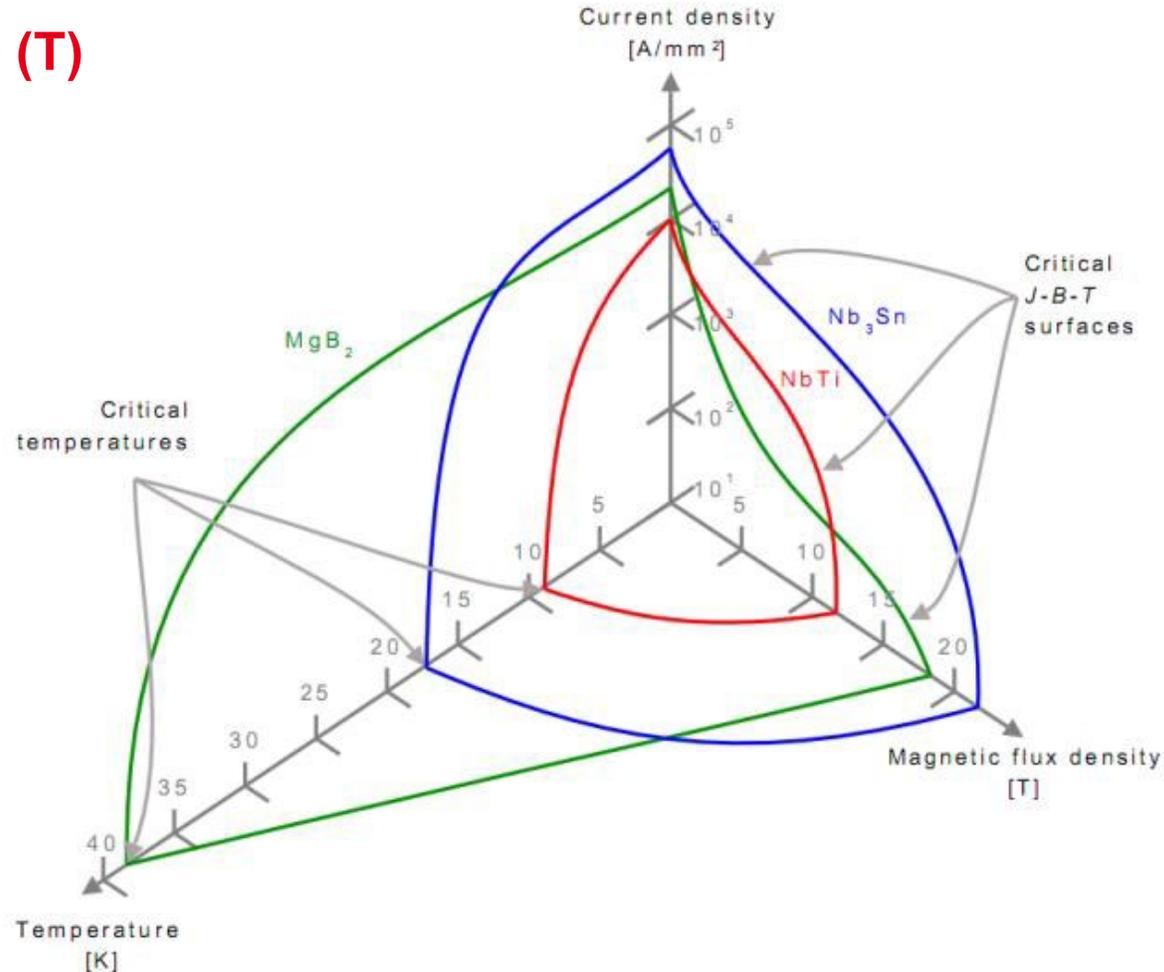


La limite en Température (T)

Plus T est élevée, plus les phonons thermiques interfèrent avec les phonons lié aux électrons.



Blindage de la force coulombienne plus faible



La limite en Densité de Courant (J)

Plus J est élevée, plus les électrons sont proches

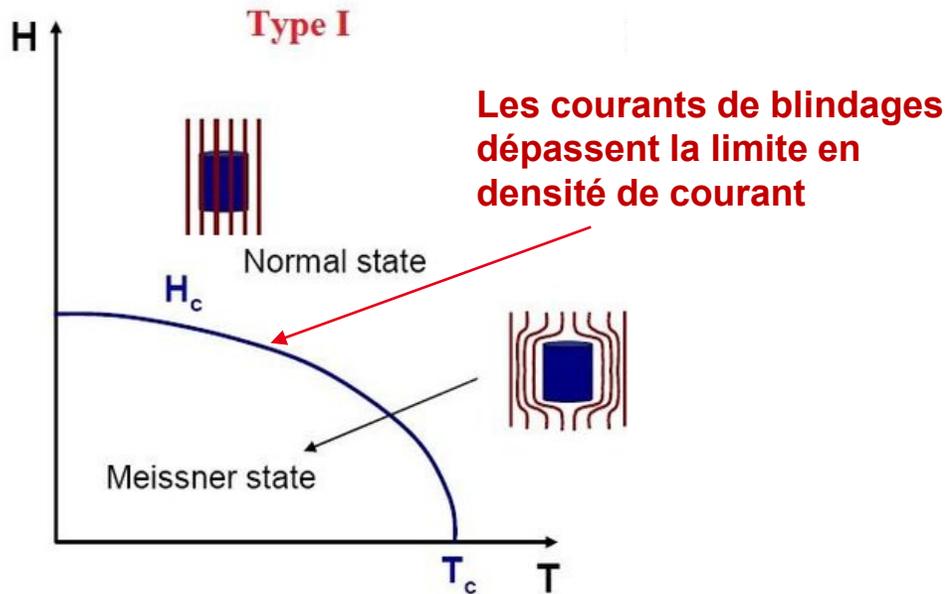


Blindage de la force coulombienne arrive à la limite

La limite en Champ Magnétique (B)

La limite en Champ Magnétique (B)

Supra TYPE I

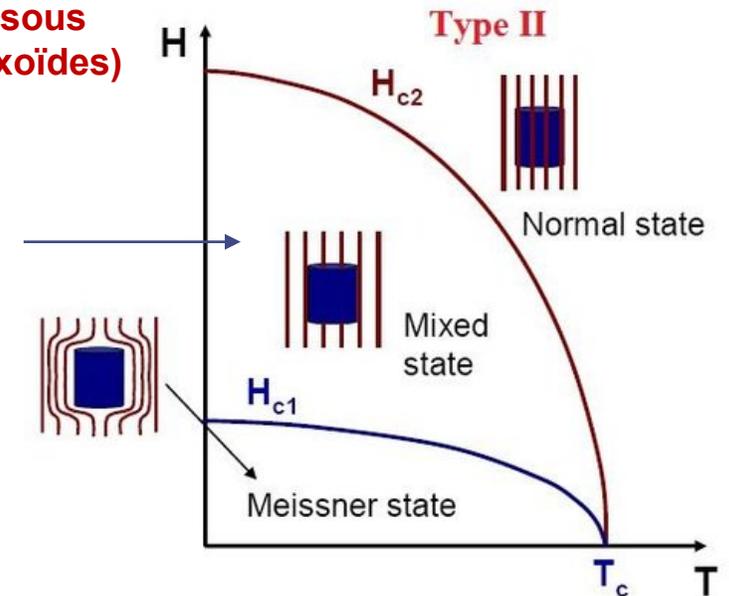
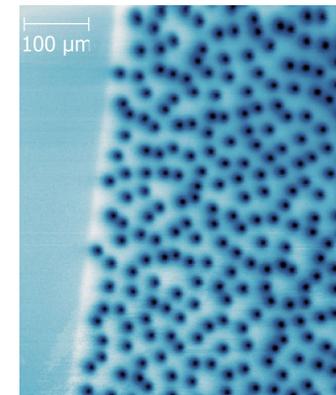


Utilisés pour applications de précision
(bolomètres)

Transition très nette Supra / Résistive

Supra TYPE II

Le champ magnétique pénètre à l'intérieur sous forme de vortex (fluxoïdes)



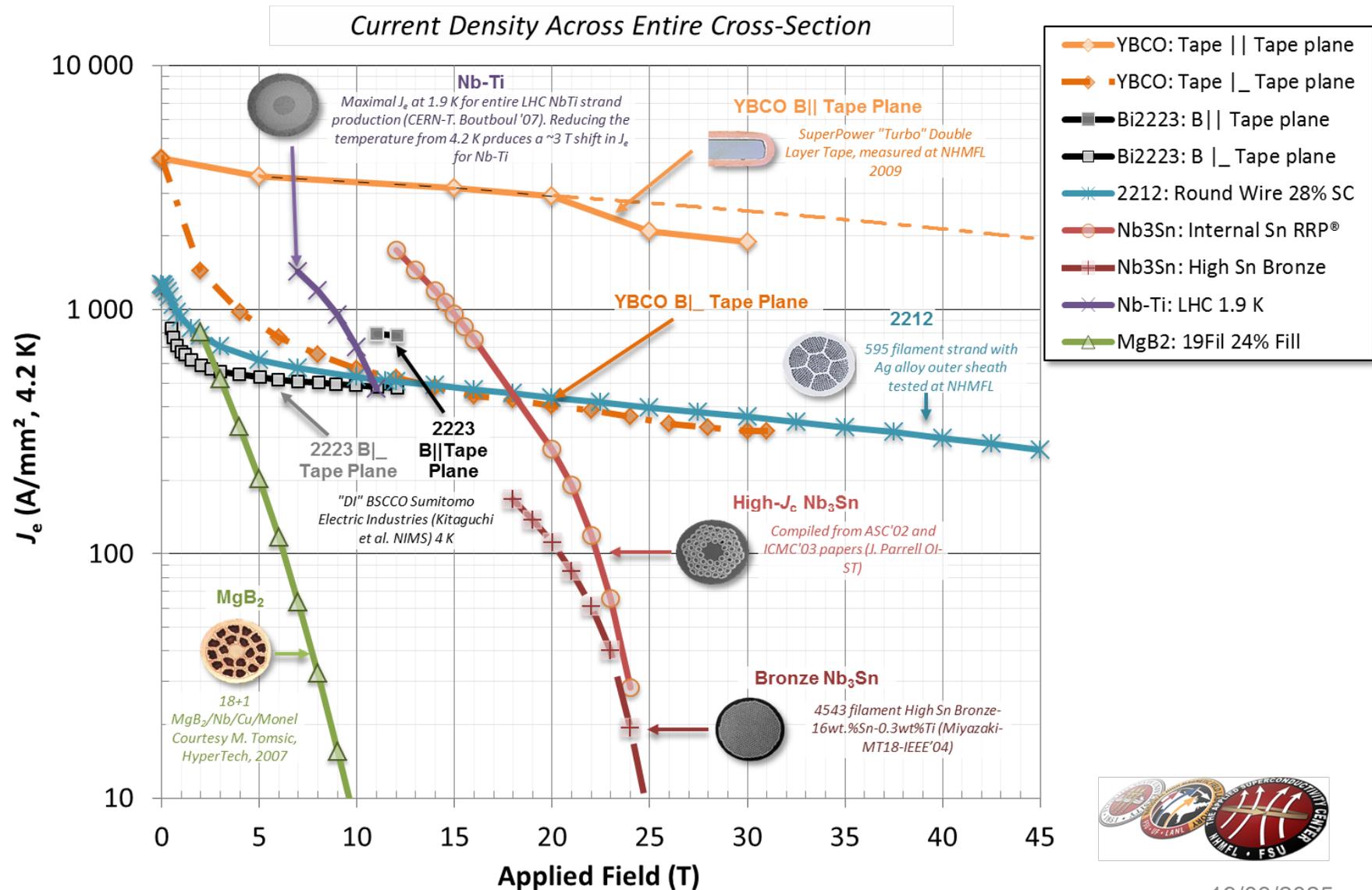
Utilisés pour applications de puissance

T_c plus élevé

B_c plus élevé

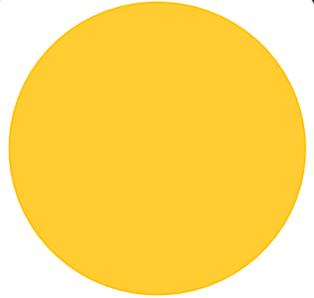
J_c plus élevé

Les limites en pratique



Cuivre vs Supraconducteur

Pour un brin de diamètre 0.85 mm

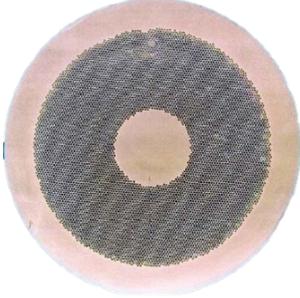


Cu

$J \sim 5 \text{ A/mm}^2$

$I \sim 3 \text{ A}$

$B \sim 2 \text{ T}$

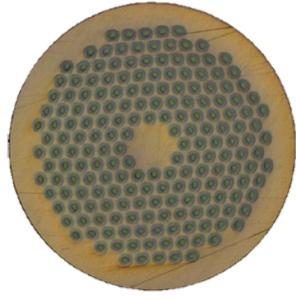


NbTi

$J \sim 600-700 \text{ A/mm}^2$

$I \sim 300-400 \text{ A}$

$B \sim 7-8 \text{ T}$

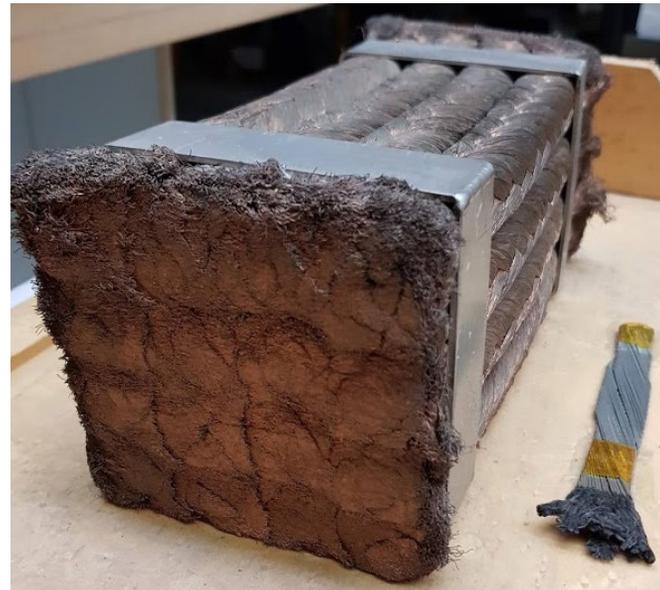


Nb₃Sn

$J \sim 600-700 \text{ A/mm}^2$

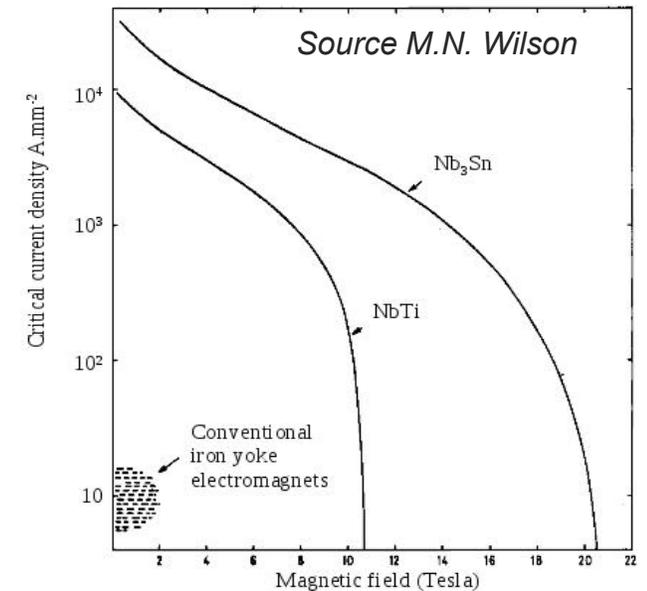
$I \sim 300-400 \text{ A}$

$B \sim 15-16 \text{ T}$

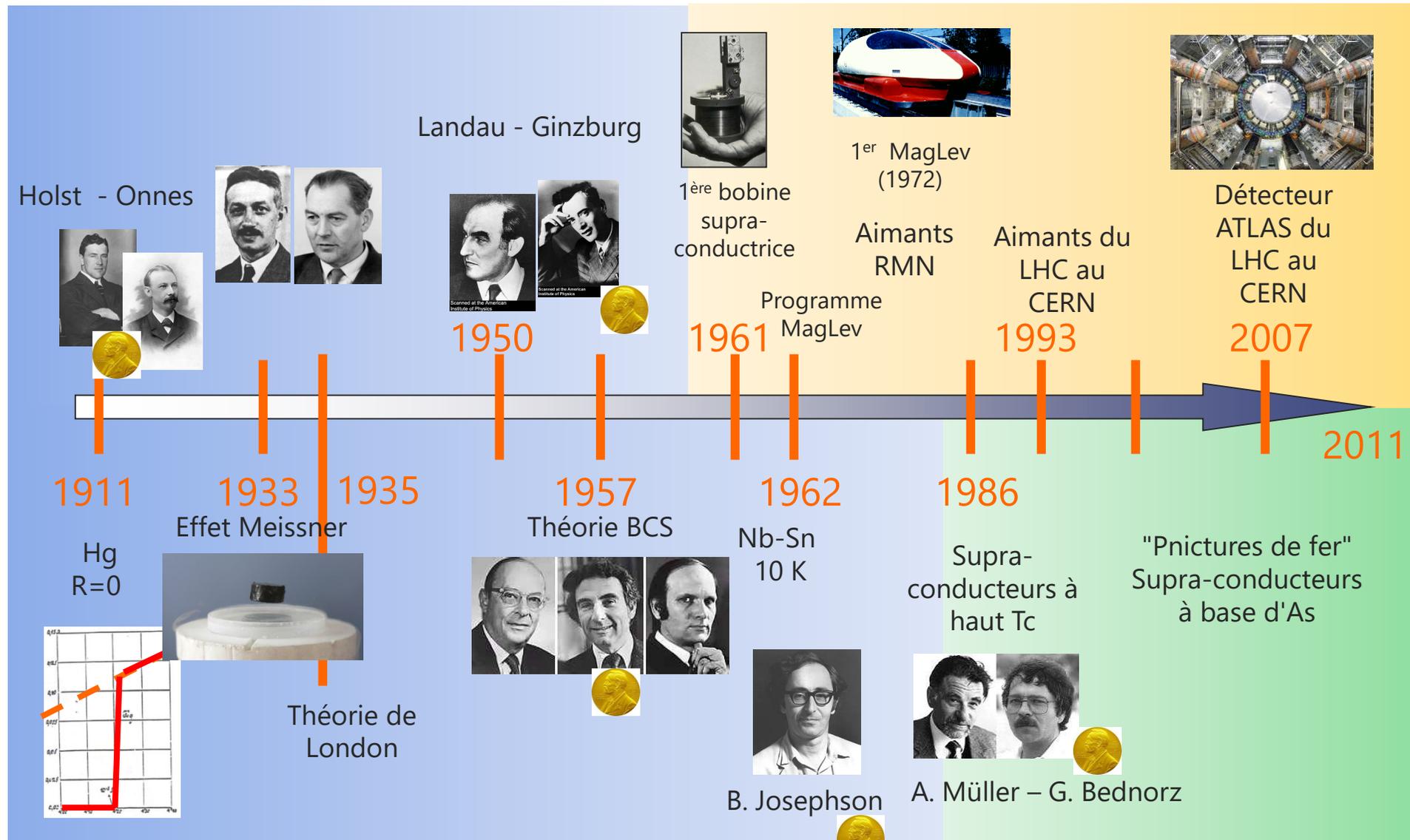


Ces deux câbles peuvent transporter 15000 A

Critical curves at 4.2 K



Plus de 100 ans de R&D



Intérêt des supraconducteurs pour les applications de puissance

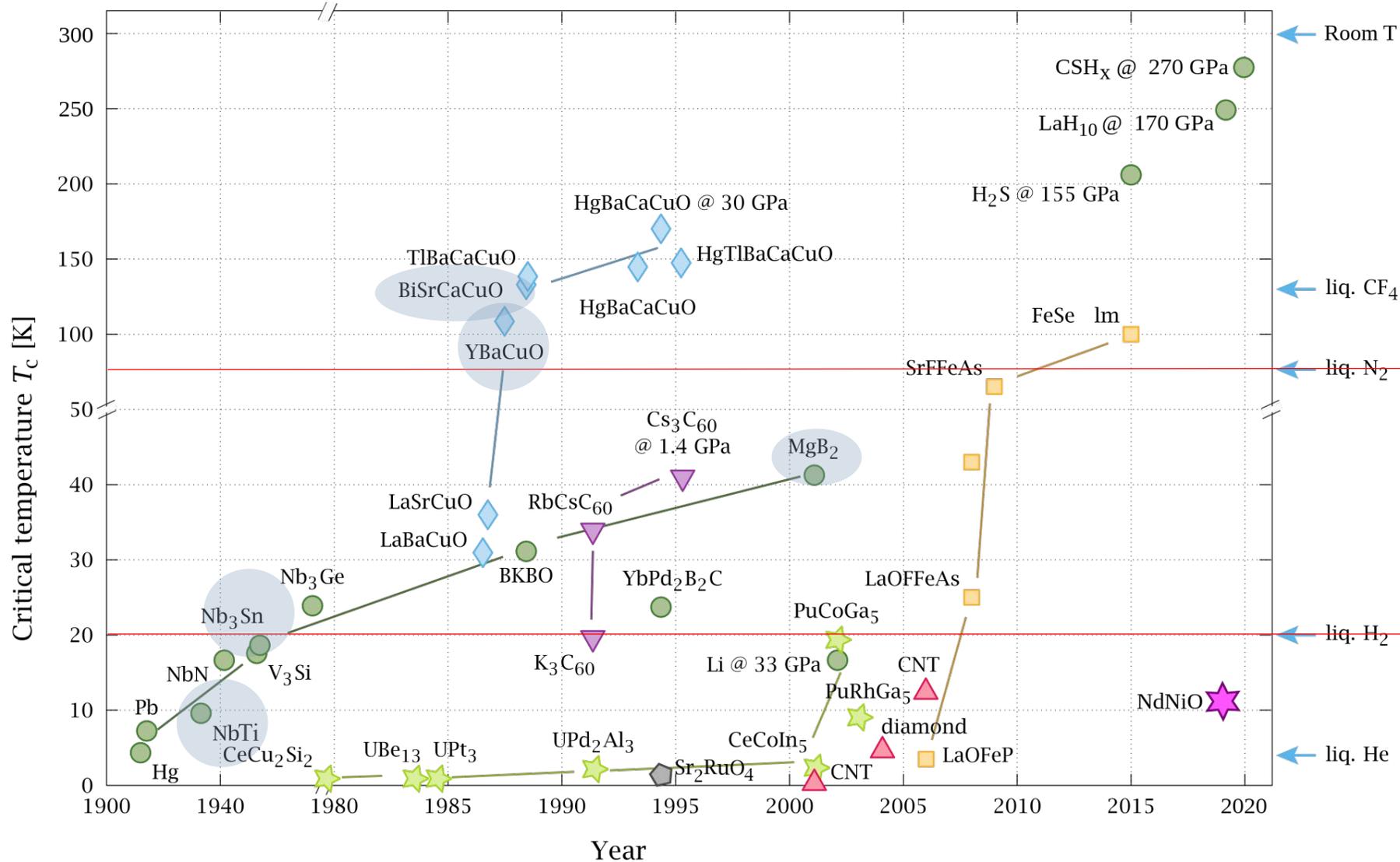
- **Fortes densités de courant sous induction**
Gain en encombrement
- **Pertes nulles en continu**
Coût énergétique
Possibilité stockage énergie (*SMES*)
Suspension magnétique (*MagLeV*)
- **Transition supra-normal**
Limitation des courants de défaut (*Limiteurs de courant*)





2. Les Supraconducteurs

Les Supraconducteurs



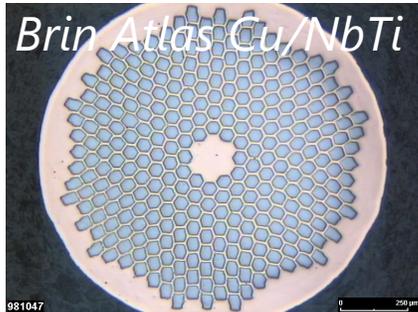
HTS
High Temperature
Superconductors
Cooling with LHe, LH₂, LN₂

ITS
Intermediate Temperature
Superconductors
Cooling with LHe and LH₂

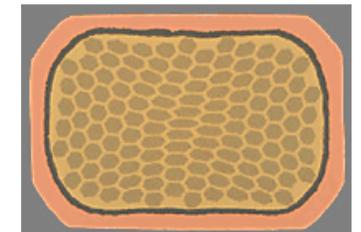
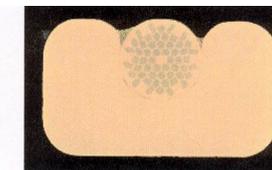
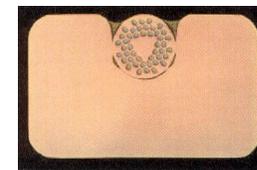
LTS
Low Temperature
Superconductors
Cooling with LHe

Les LTS : NbTi & Nb₃Sn

Les supraconducteurs LTS 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.

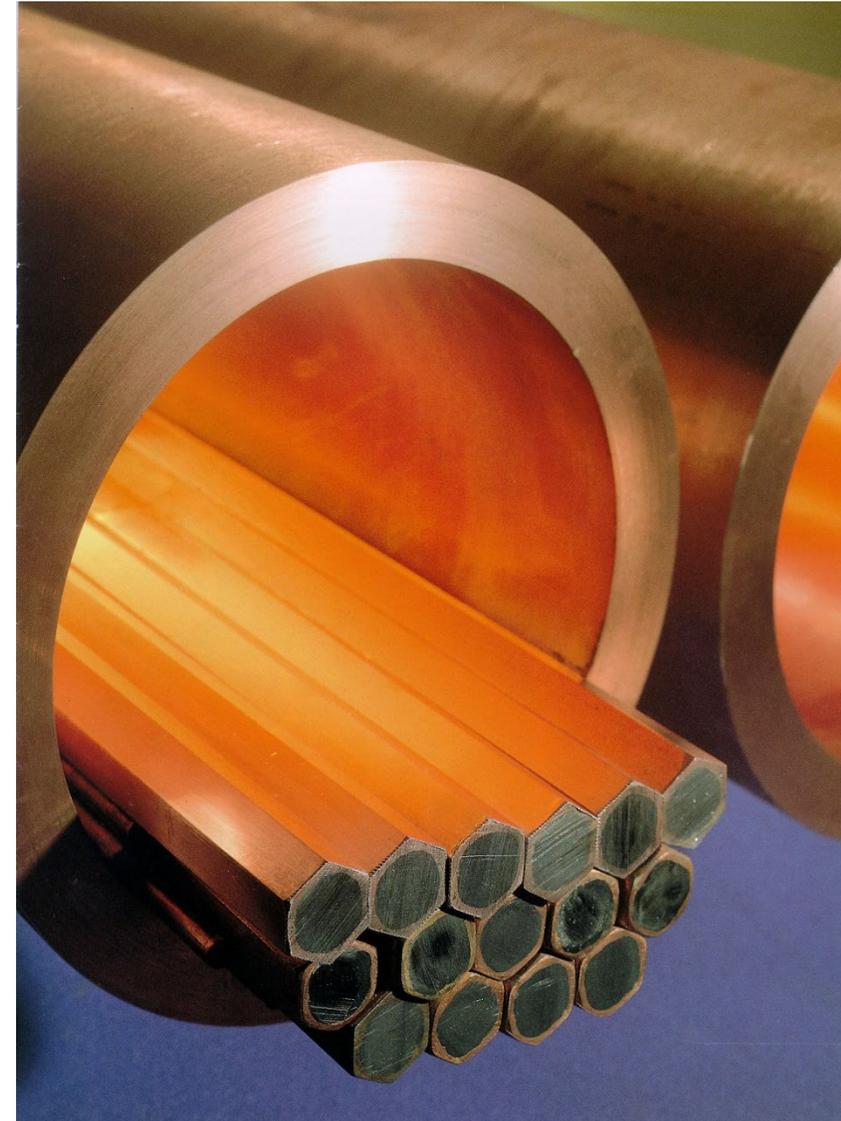
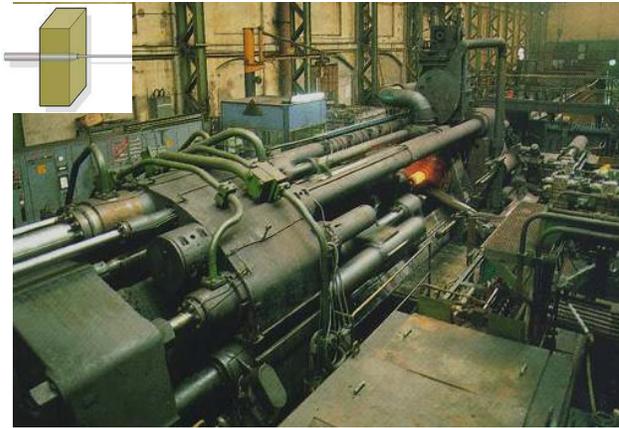


Conducteurs d'IRM-RMN

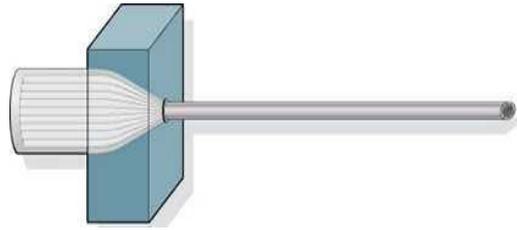


Wire in Channel
a x b = 1.10 x 1.70 mm² ; 2.15 x 4.25 mm², Cu : NbTi ratio 10 to 20

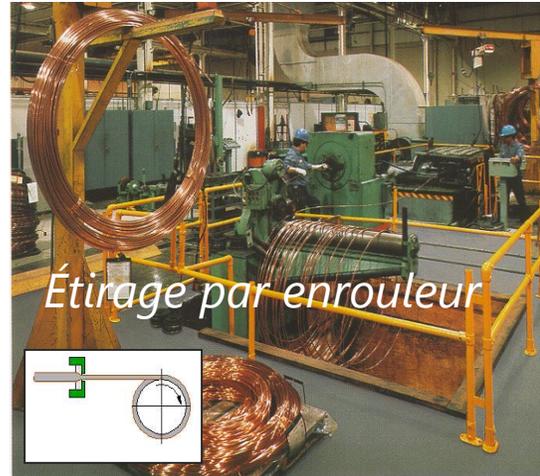
Fabrication des bielles



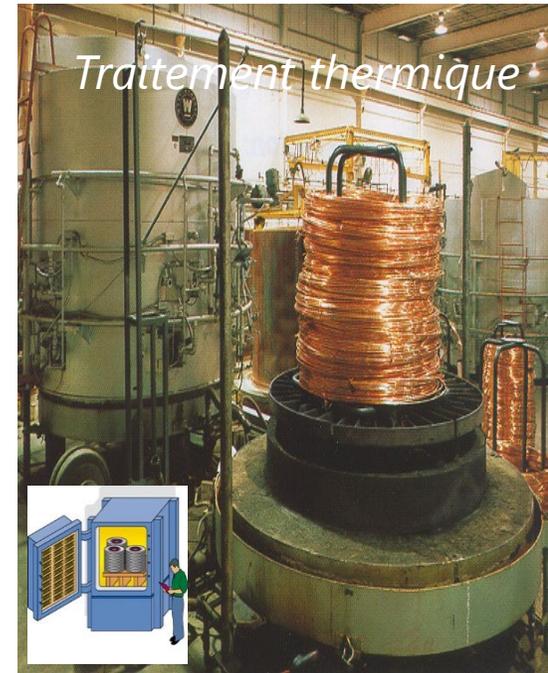
Fabrication des brins



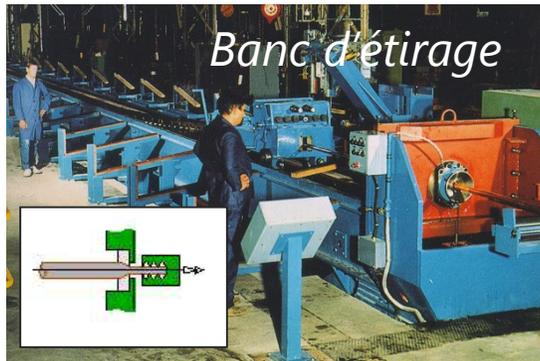
Extrusion des billettes



Étirage par enrouleur



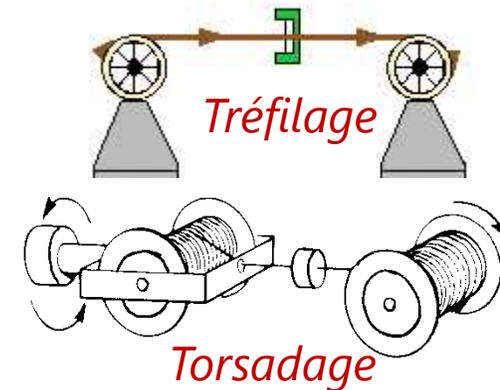
Traitement thermique



Banc d'étirage



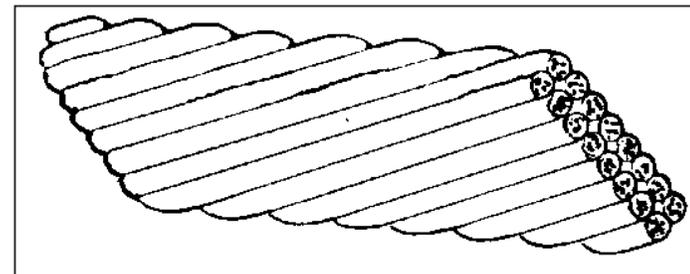
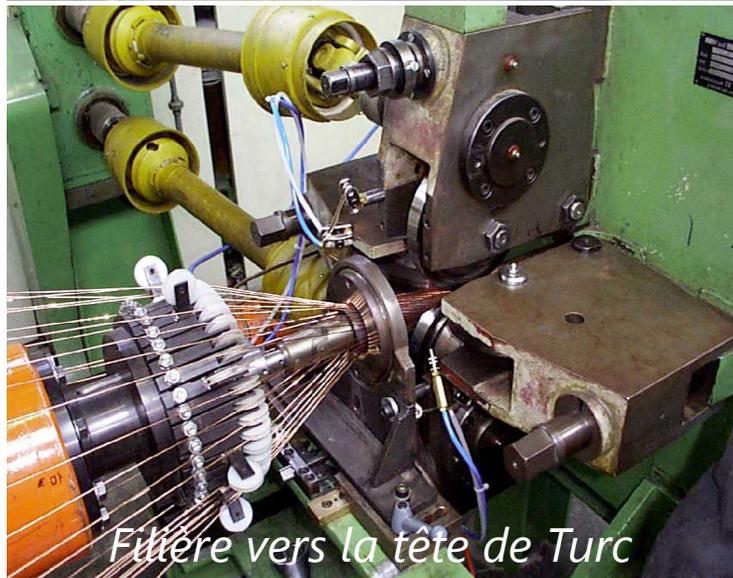
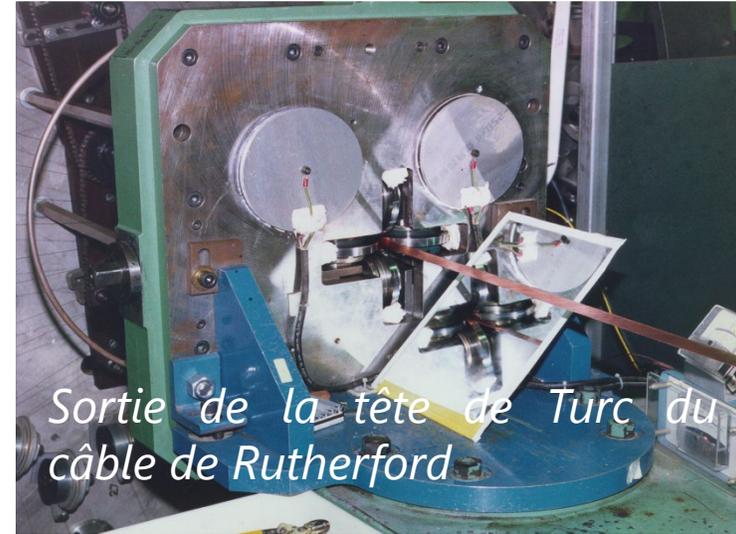
Stockage



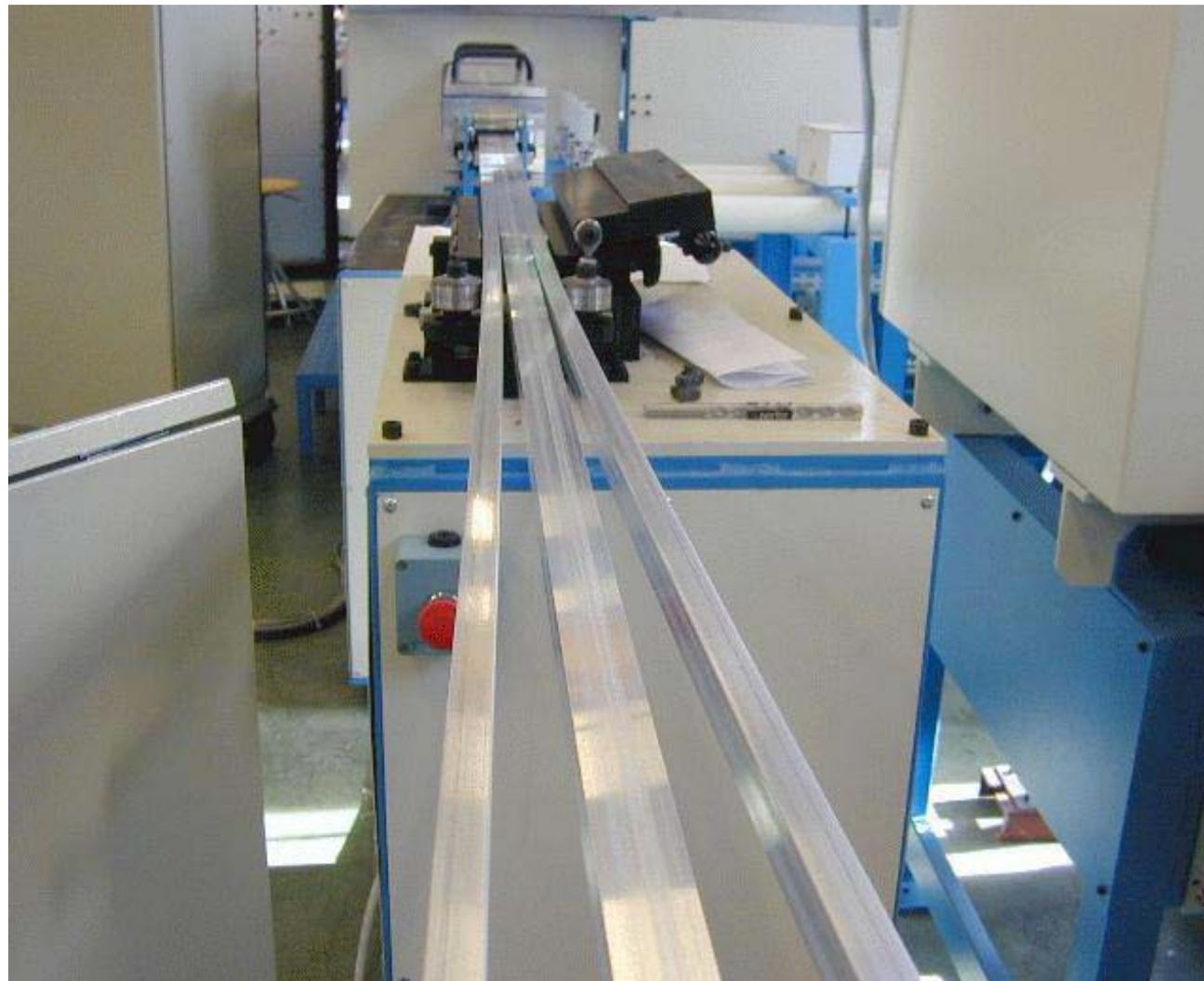
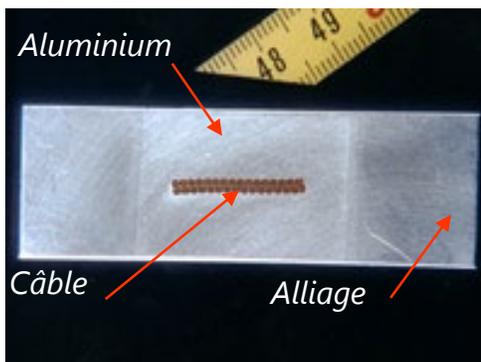
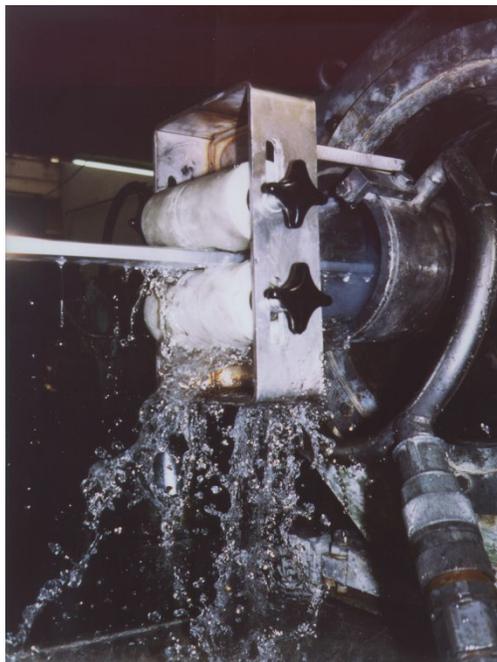
Tréfilage

Torsadage

Fabrication du câble



Fabrication du conducteur



Design des câbles supraconducteurs



Pourquoi faire une structure aussi complexe?

- Structure multi-filamentaire « twistée » pour:
 - Réduire les instabilités magnétiques (saut de flux)
 - Réduire le couplage inter-filaments (boucle de courant) par torsion des filaments
 - Limiter l'aimantation du brin et les courants persistents

- Matrice stabilisante pour:
 - Protéger l'aimant en cas de transition résistive
 - Améliorer la tenue mécanique du câble



Stabilité
thermique



Protection

La stabilité

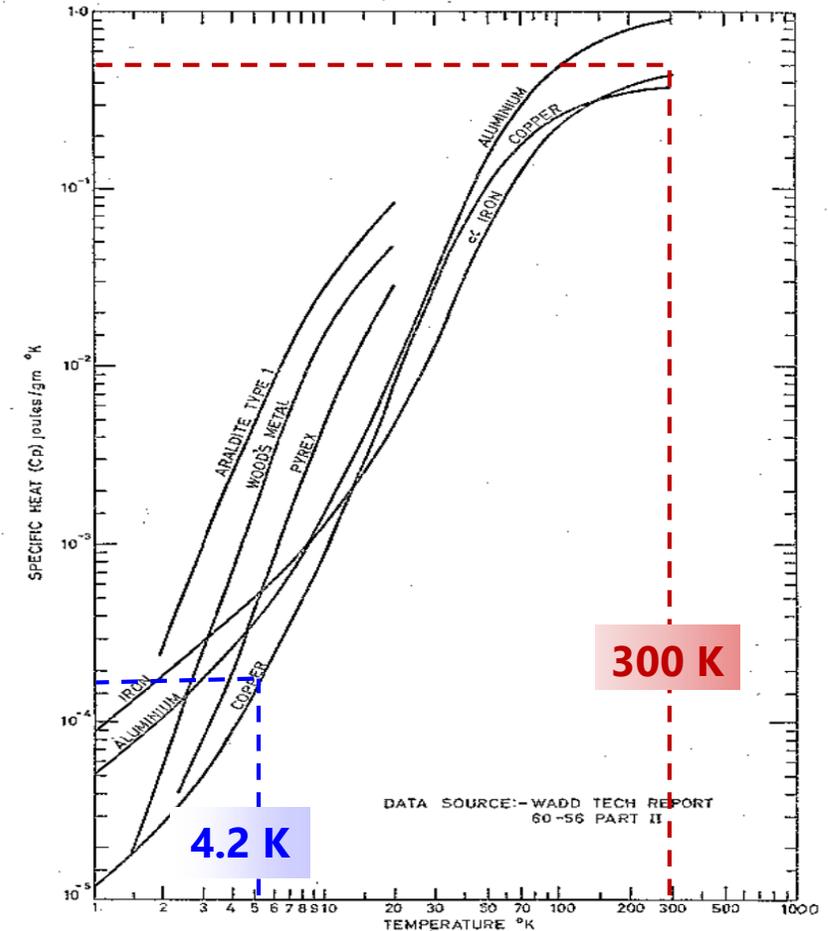
Assurer le point de fonctionnement d'un aimant compte tenu d'éventuelles perturbations :
concept de stabilité

- ΔH : **marge enthalpique** du conducteur (énergie volumique minimale nécessaire pour faire transiter le conducteur)
- La marge enthalpique est très faible (quelques $\mu\text{J}/\text{mm}^3$) pour les aimants supraconducteurs
- $\Delta T = T_{cs} - T_0$ est la **marge en température** avec T_0 la température de fonctionnement

Plus un aimant est froid, moins élevée est la marge enthalpique:

NbTi-Cu avec $\text{Cu}/\text{NbTi} = 2$

- $T_0 = 4.5 \text{ K}$, $\Delta T = 1.2 \text{ K} \rightarrow \Delta T = 3300 \text{ J}/\text{m}^3$
- $T_0 = 1.8 \text{ K}$, $\Delta T = 1.2 \text{ K} \rightarrow \Delta T = 500 \text{ J}/\text{m}^3$

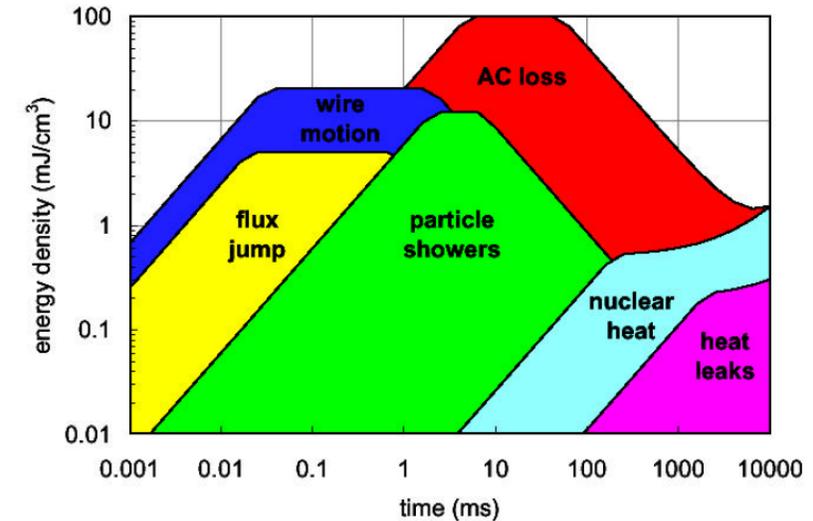


La stabilité : perturbations

- S'il transite, le conducteur doit pouvoir récupérer **spontanément** son état **supra** grâce à son environnement (conducteurs voisins froids, fluide réfrigérant)
- S'il ne récupère pas on parle de **QUENCH**

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

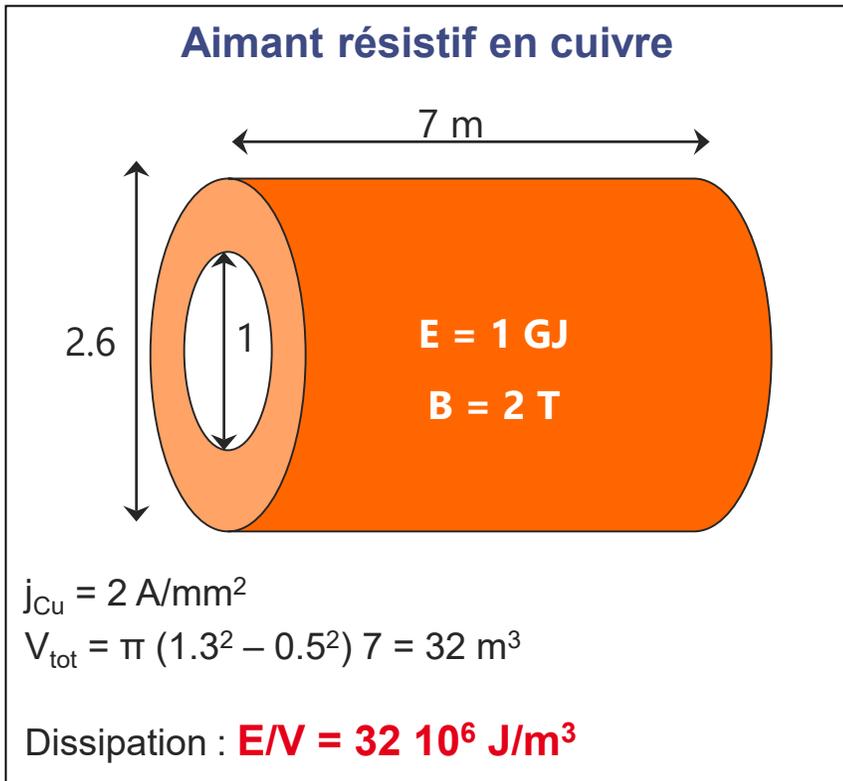


Dissipations d'énergie **prévisibles** : prises en compte lors de la conception (dans la **marge de température**)

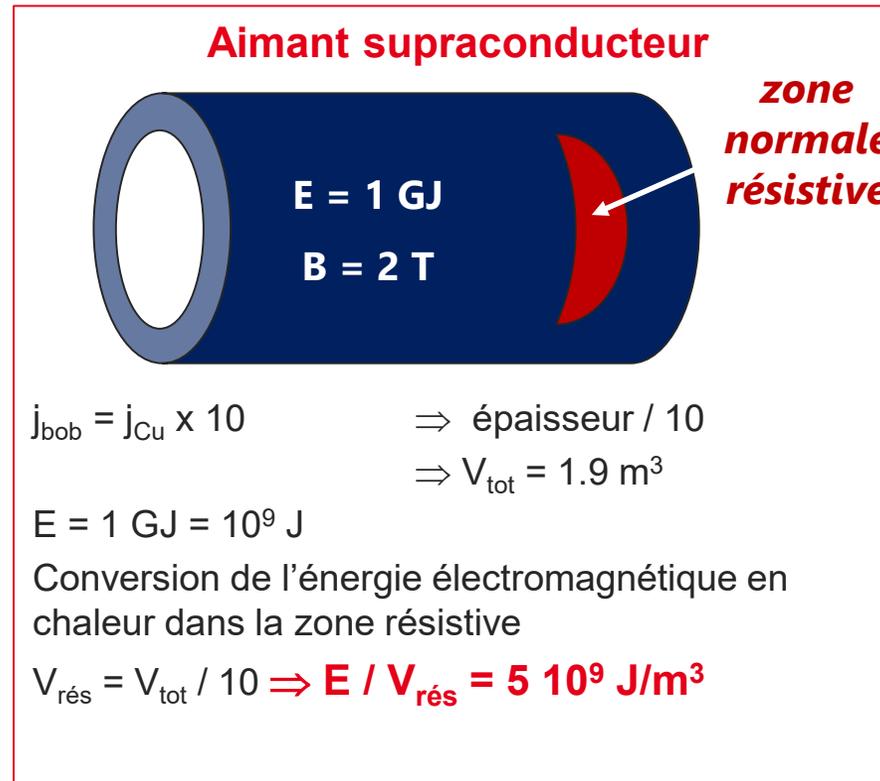
Perturbations accidentelles (objets des études de stabilité)

Protection des aimants supraconducteurs

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



T = 65 K



T = 1400 K

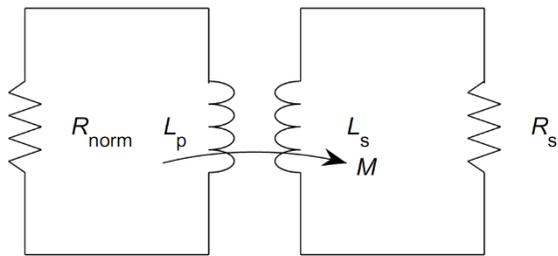


Schémas typiques de protection

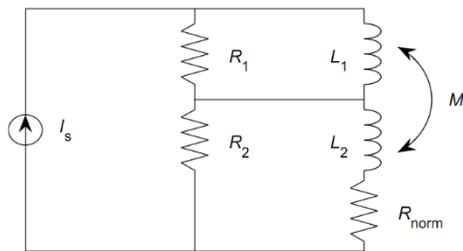
Dissiper le plus rapidement possible et dans le plus grand volume possible l'énergie emmagasinée afin de diminuer la température maximale et les gradients thermiques (sources de contraintes mécaniques).

Protection Passive

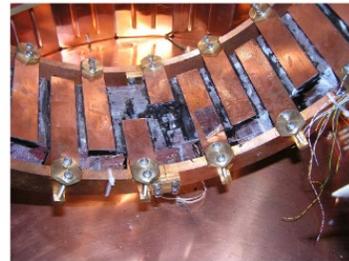
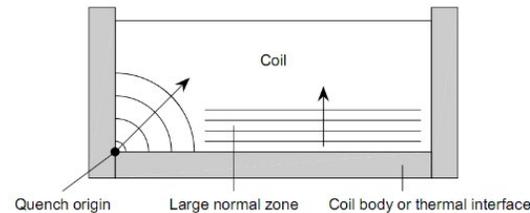
Protection par un couplage secondaire



Protection par subdivision

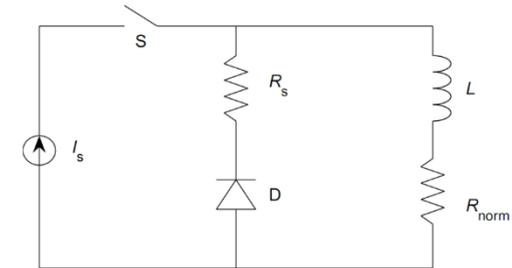


Protection par quench-back



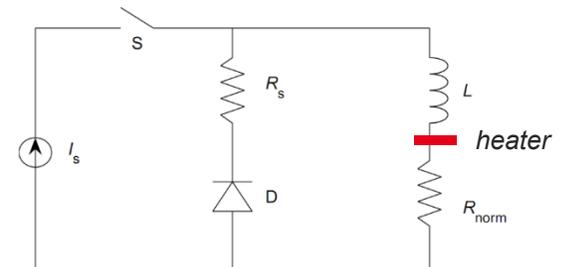
Protection Active

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 chauffettes



Contraintes mécaniques

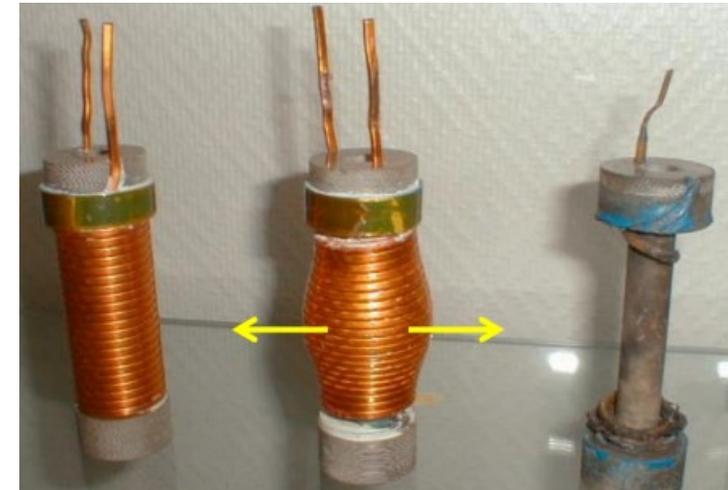
- **Reprise des efforts** par le bobinage lui-même ou par une structure extérieure
- Limiter les **concentrations de contraintes** pour ne pas endommager l'isolation électrique

$$\sigma \simeq JBR$$

Les conducteurs **ne doivent pas bouger**,

- pour conserver leur forme (qualité du champ)
- pour éviter les dissipations

Source: LNCMI

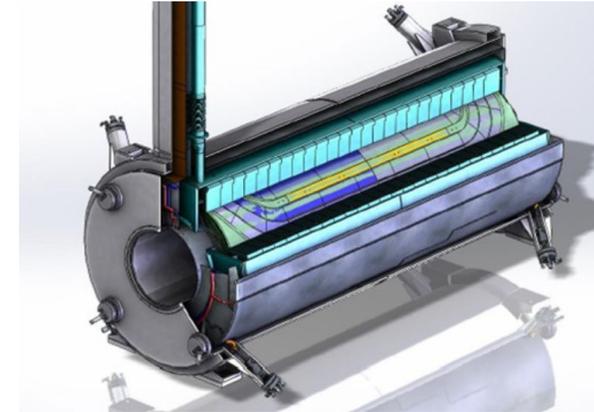


Exemple: Contrainte d'une spire de rayon 200 mm, traversée par une densité de courant de 150 A/mm², dans 10 T :

$$\sigma_{\theta} = JBR = 1.5 \cdot 10^8 \cdot 10 \cdot 0.2 = 300 \text{ MPa}$$

Contraintes cryogéniques

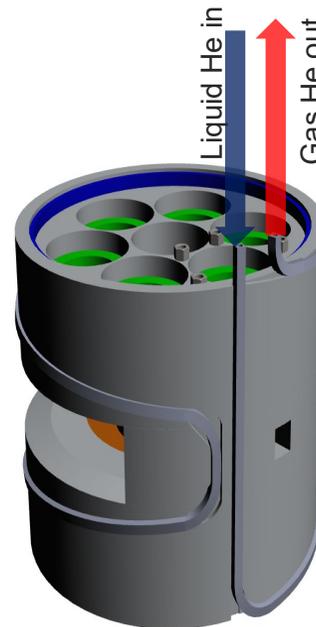
- Refroidissement direct dans un bain
- Refroidissement indirect par conduction (tête froide d'un cryogénérateur, thermosiphon...)
- Circulation forcée d'hélium dans le conducteur



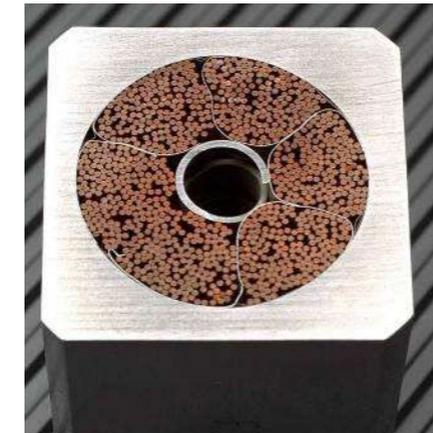
JLAB Dipole SHMS (Sigmaphi)



Cryo générateur Sumitomo



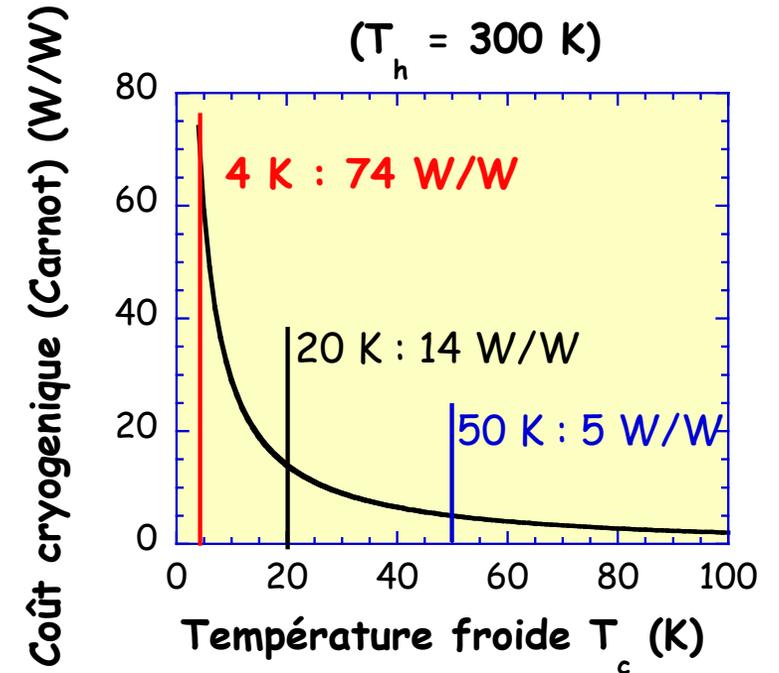
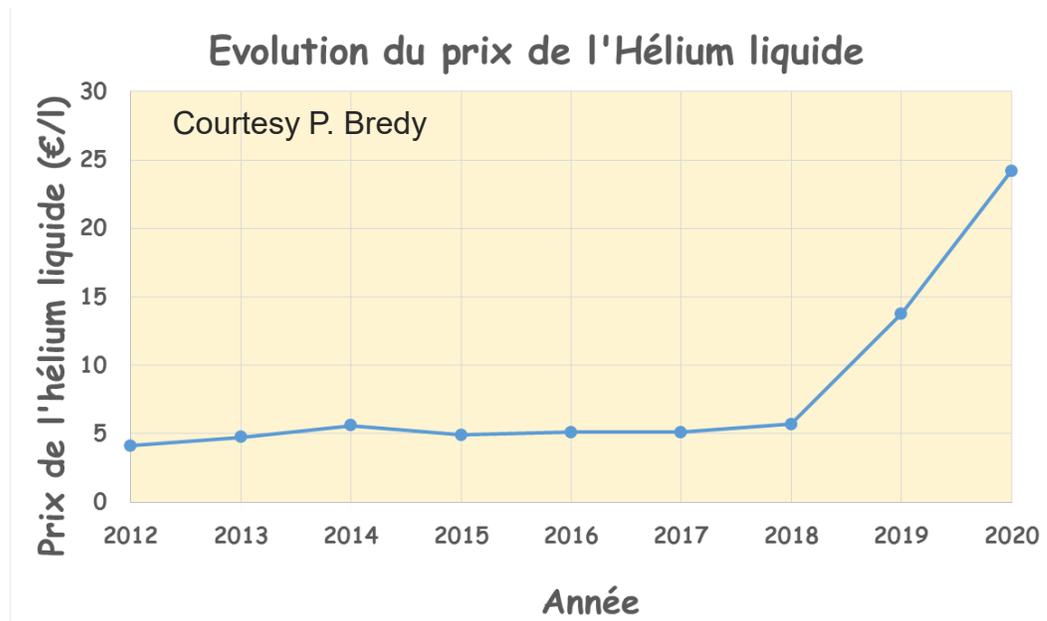
WAVE un aimant vectoriel pour des expériences de diffusion de neutron



Conducteur ITER

Contraintes cryogéniques

- Coût d'investissement très important (tête froide ~ 50 k€ pour 1,5 W à 4,2 K; liquéfacteur ~ 1M€)
- Coût d'Hélium liquide de plus en plus cher
- Coût cryogénique élevé pour les très basses températures



Les HTS

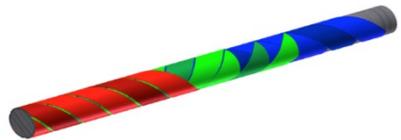
YBCO

Yttrium Barium Copper Oxide

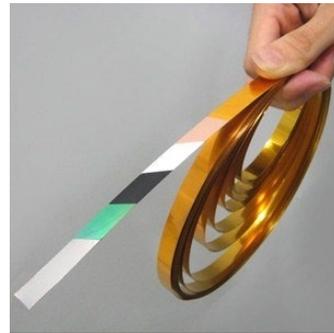
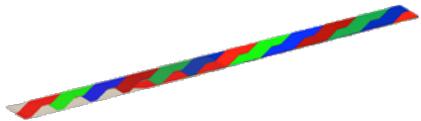
Twisted stacked-tapes (TST)



Tapes around a core (CORC)



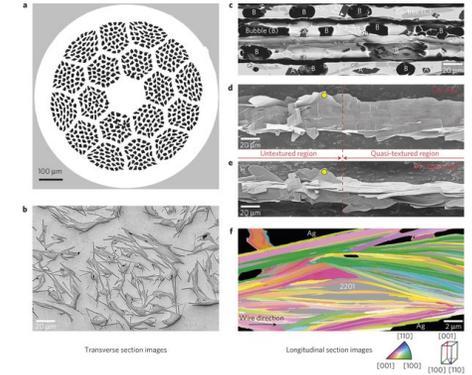
Roebel



- **Densité de courant J_e**
- **Robustesse mécanique**
- **Bobinage**
- **Disponibilité**

BI2212

Bismuth Strontium Calcium Copper Oxide

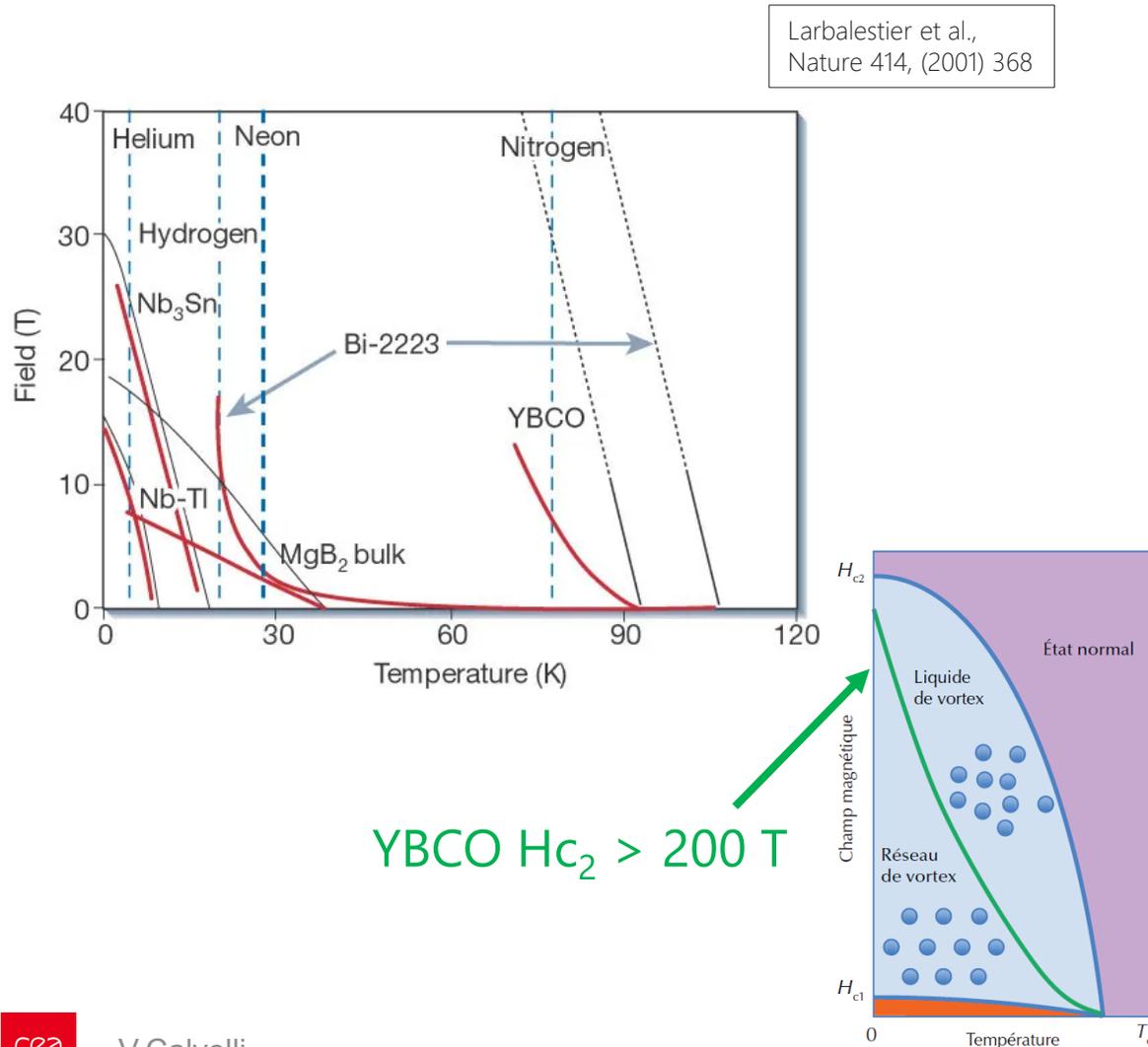


Câble de Rutherford

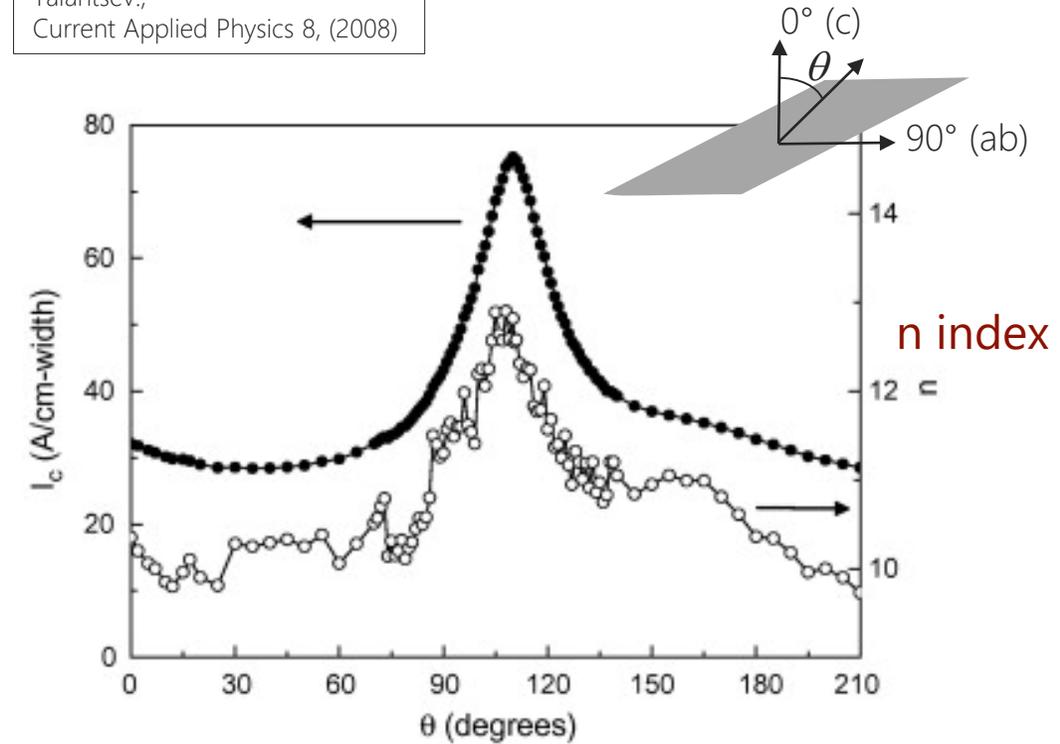


- **Moins sensible à la magnétisation**
- **Câble fort courant**

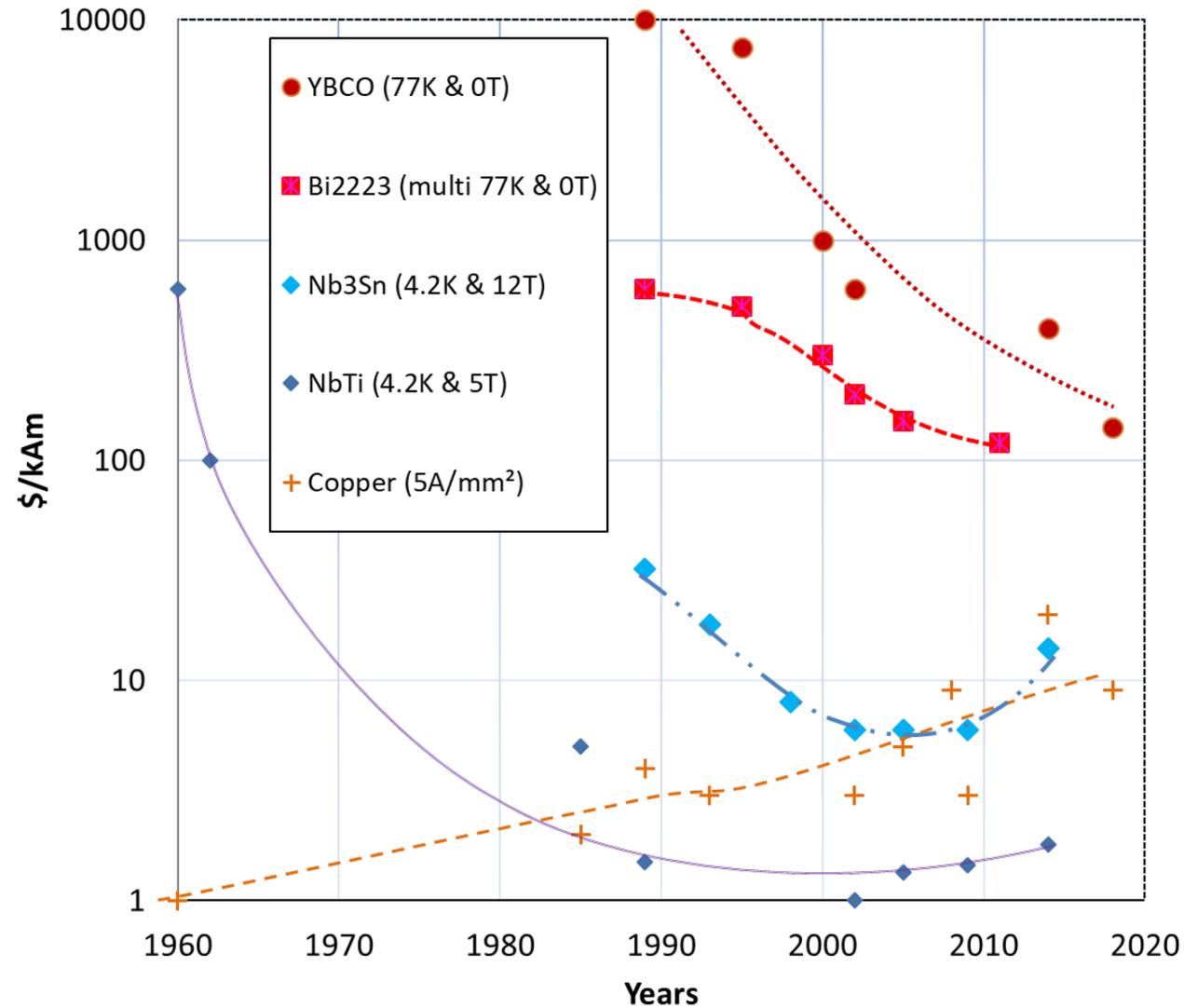
Champ d'irreversibilité et anisotropie



Talantsev.,
Current Applied Physics 8, (2008)



Coût des câbles supraconducteurs





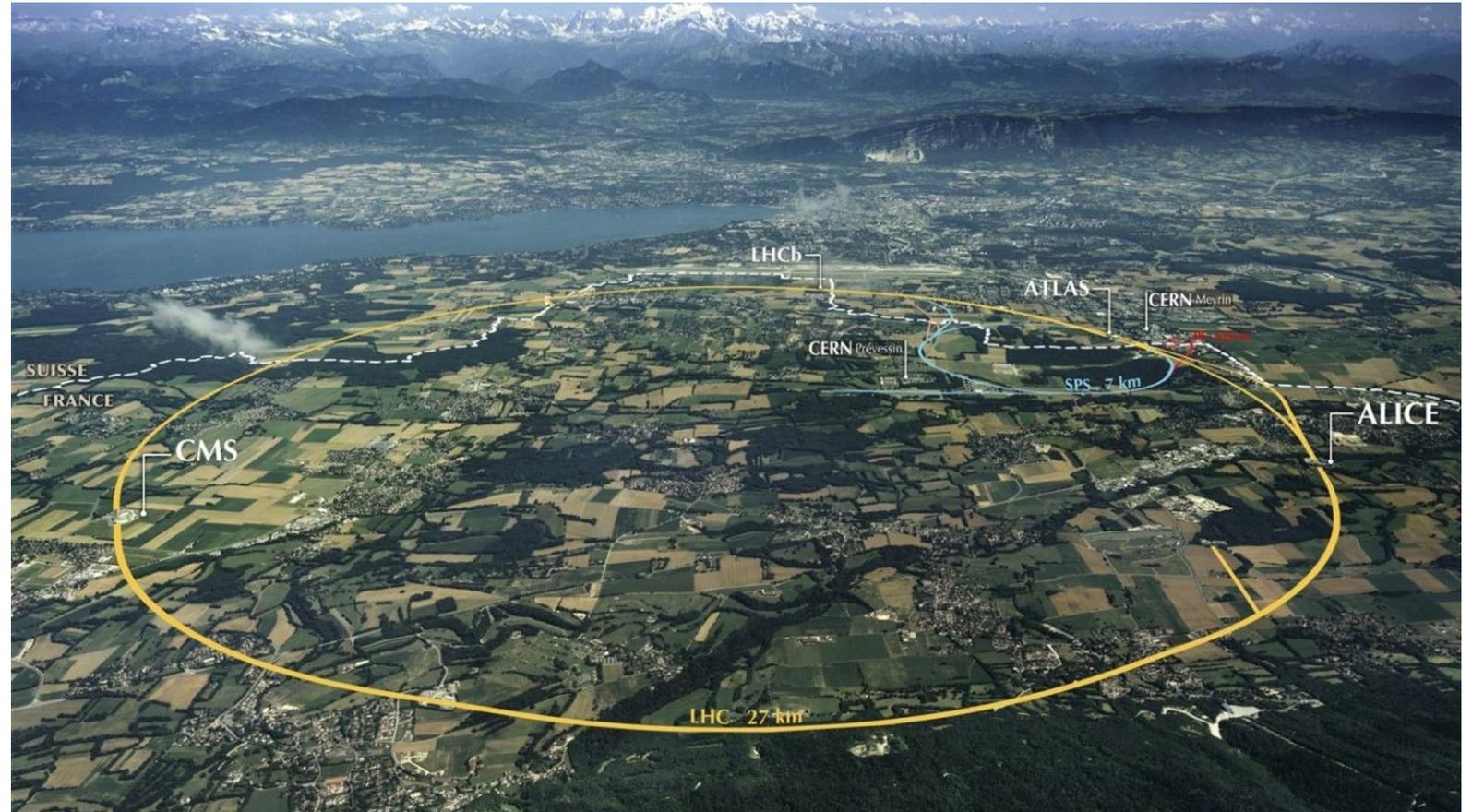
3 ■ Les aimants pour accélérateurs

La supraconductivité et la physique des particules

Accélérer, courber et focaliser des particules à très haute énergie nécessite de champ électriques et magnétiques très intenses

Pour LHC, les dipôles fonctionnent à 8.3 T @11.9kA

Il y a :
1248 dipôles
400 quadripôles
4 aimants pour détecteurs



La supraconductivité et la physique des particules

L'énergie du faisceau dans un synchrotron

$$E [GeV] = 0.3 \cdot B[T] \cdot \rho[m]$$

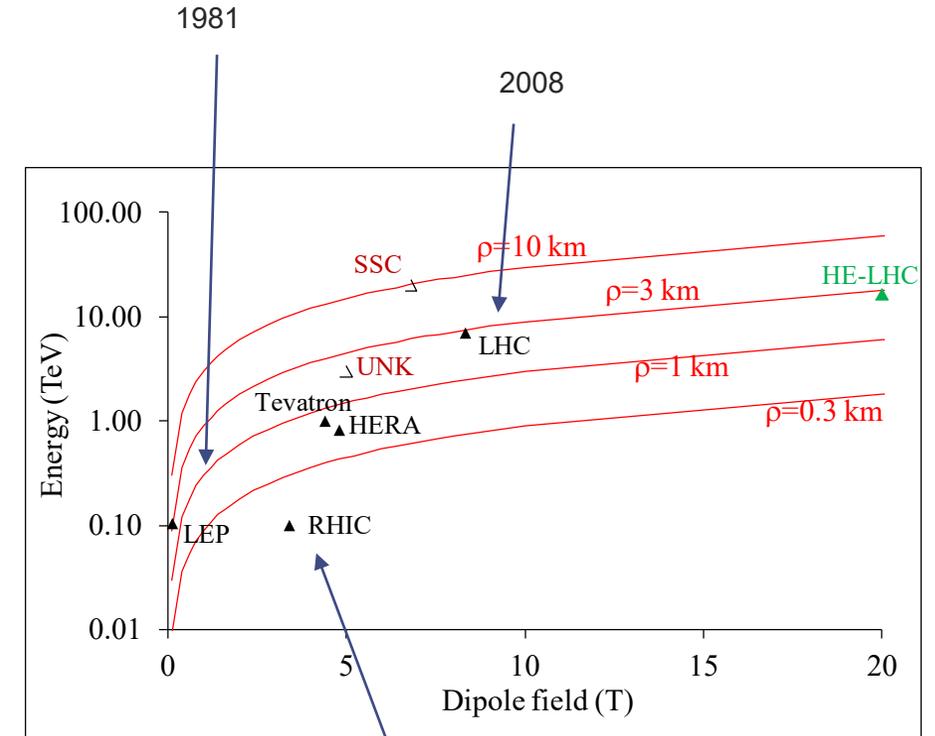
$$E [GeV] \propto 0.3 \cdot J \left[\frac{A}{mm^2} \right] S[mm^2] \cdot \rho[m]$$

Cuivre $\rightarrow J \sim 10 \frac{A}{mm^2}$

Supra $\rightarrow J \sim 1300 \frac{A}{mm^2}$



**Surface des dipôles
réduite d'un facteur 130!**

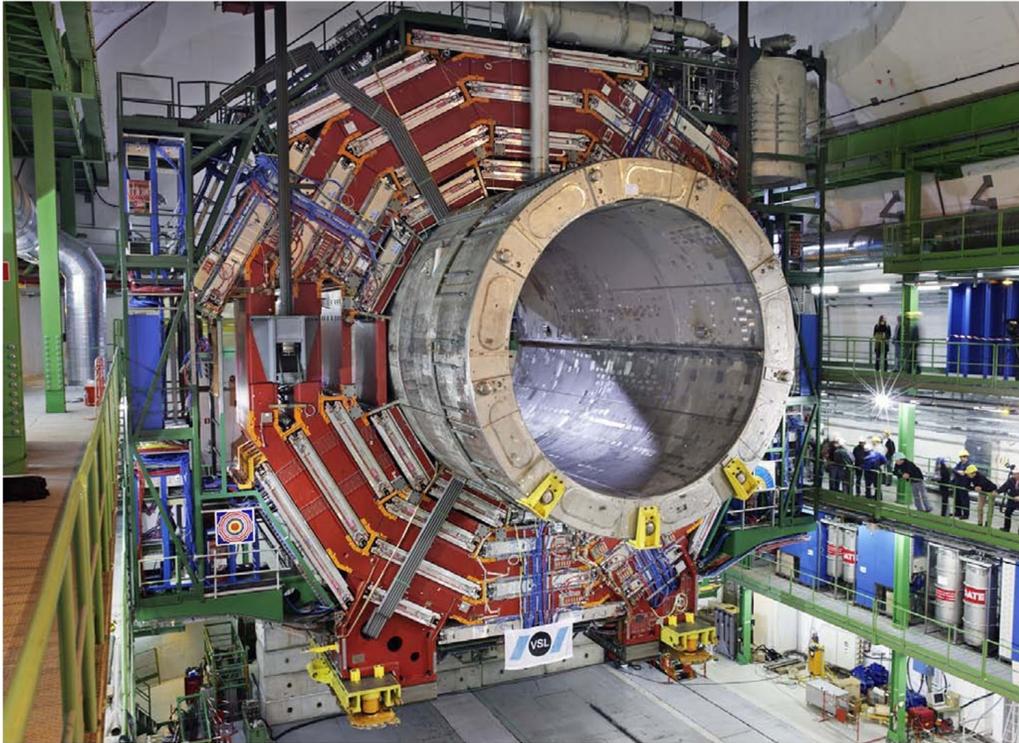


Haut champ \rightarrow accès à
phénomènes qui
expliquent les lois de
l'univers

Les aimants supra consomment peu d'énergie (coût cryo)

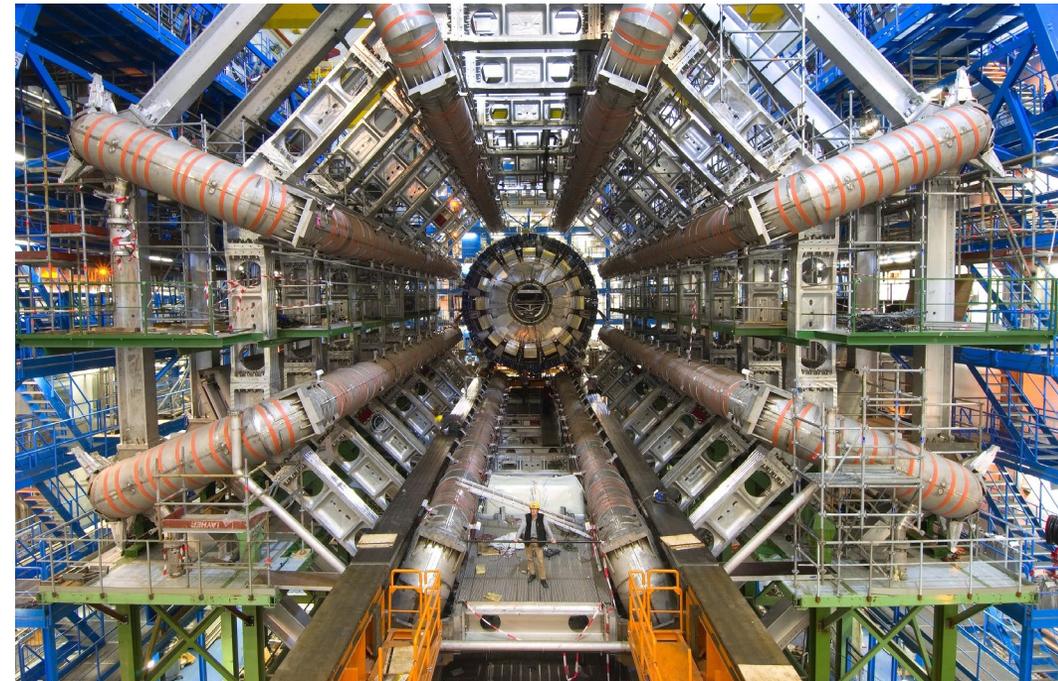
La supraconductivité et la physique des particules

Le solénoïde de CMS @ LHC



Les dipôles de LHC

Le toroïde de ATLAS @ LHC



Les aimants pour courber et focaliser

- Equations de Maxwell pour exprimer le champ magnétique:

$$\operatorname{div}(\vec{B}) = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad \operatorname{rot}(\vec{B}) = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

- En l'absence de charge et de matériau magnétique:

$$\operatorname{rot}(\vec{B}) = \left(\frac{\partial B_y}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial y}, \frac{\partial B_z}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial z}, \frac{\partial B_x}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial x} \right) = 0$$

- Pour un champ constant le long de z,

$$\frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad \text{qui conduit à}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial B_x}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

Le champ magnétique peut être décrit à l'aide de la fonction suivante:

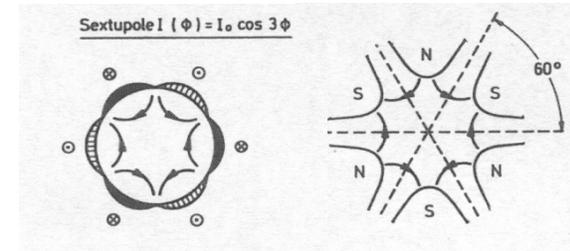
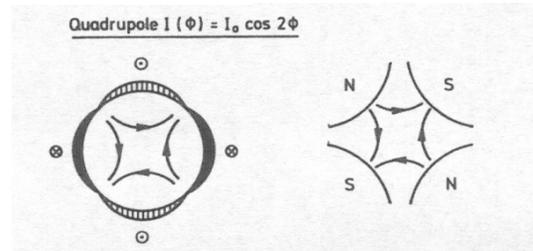
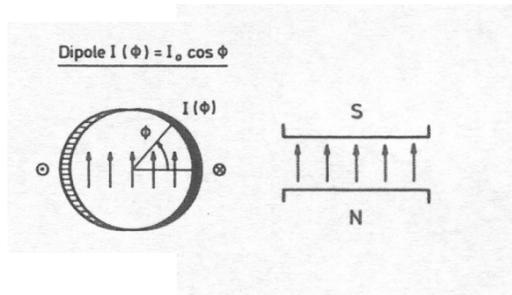
$$B_y(x, y) + iB_x(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n (x + iy)^{n-1}$$

où C_n est une harmonique complexe

Les aimants pour courber et focaliser

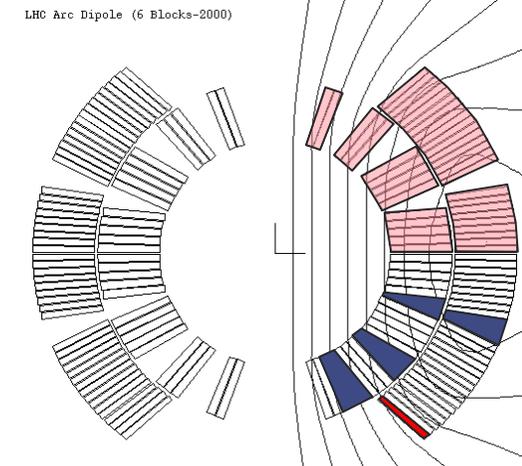
- Chaque harmoniques de champ correspond à un champ multipolaire «pur»:

$$B_y(x, y) + iB_x(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n (x + iy)^{n-1} = C_0 + C_1(x + iy) + \dots$$



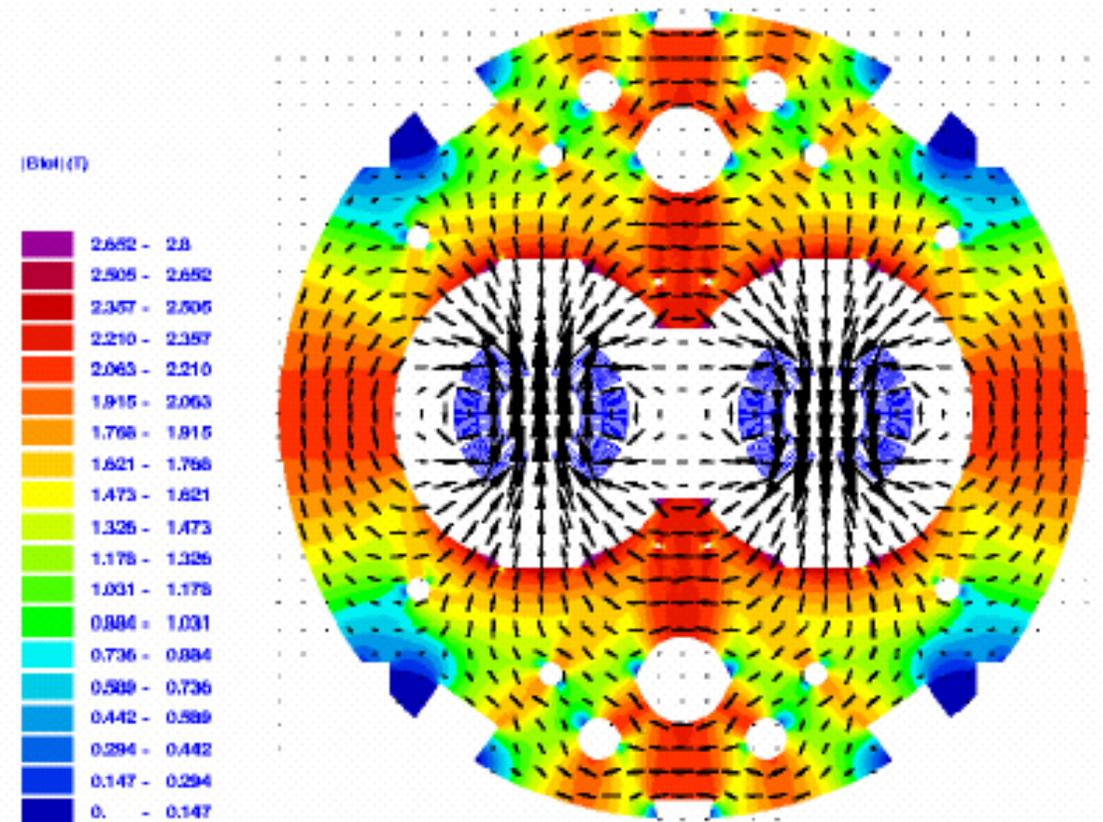
- Les aimants visent généralement à générer un seul multipôle
Dipôle, quadripôle, sextupôle, octupôle, décapôle, dodécapôle...

Positionnement des conducteurs de l'aimant optimisés pour créer uniquement le multipôle souhaité et minimiser les autres harmoniques (en jouant avec l'orientation des conducteurs et des cales angulaires)



Le dipôle de LHC

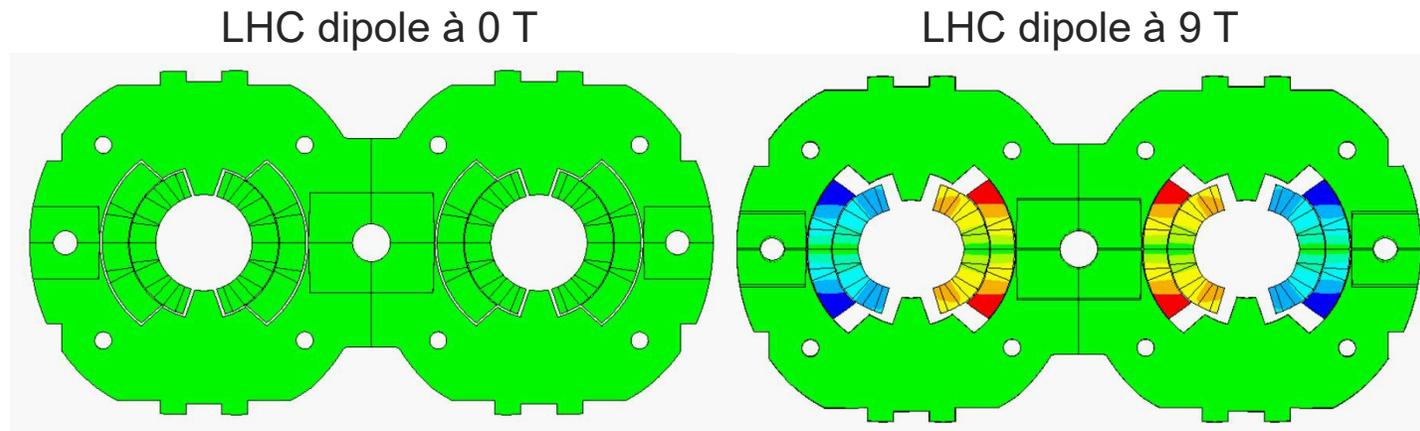
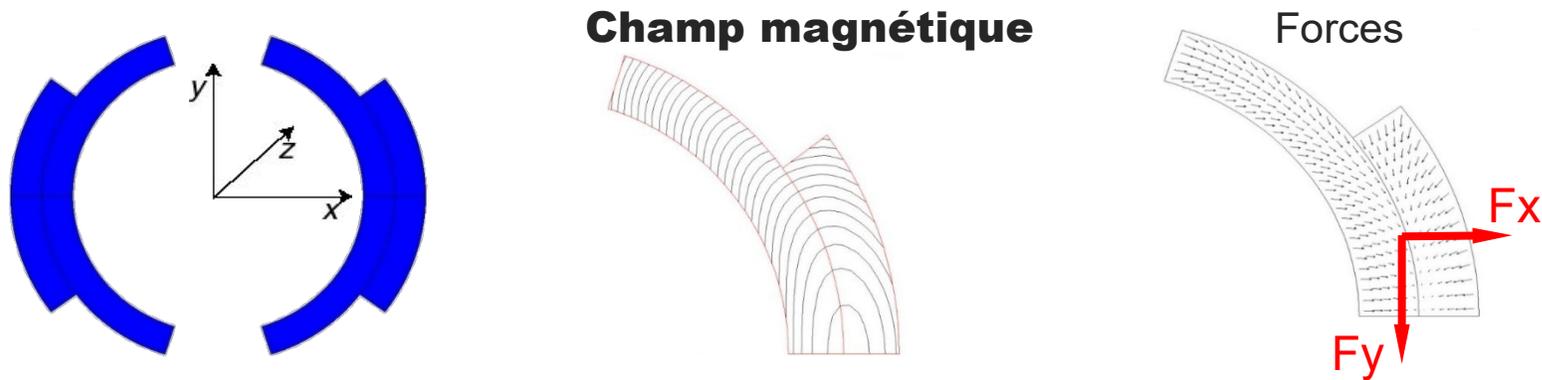
LHC Dipole	
Longueur physique	15 m
Masse totale	27.5 t
Diamètre externe	360 mm
Température de fonctionnement	1.9 K
Champ magnétique au centre	8.33 T
Energie stockée	6,93 MJ
Courant critique	13750 A
Courant de fonctionnement	11850 A



Le dipôle de LHC : forces

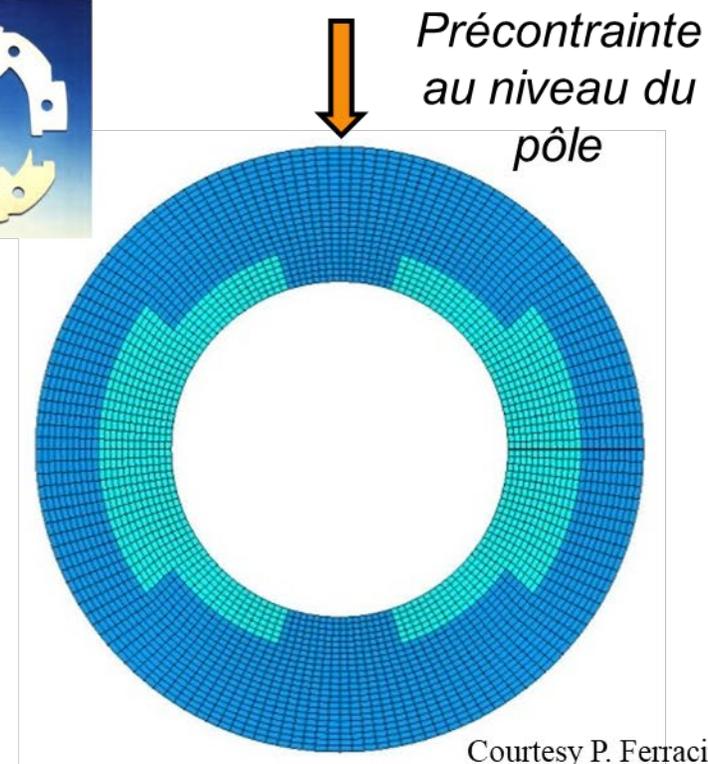
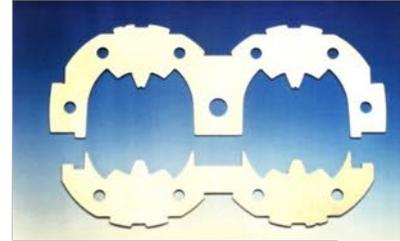
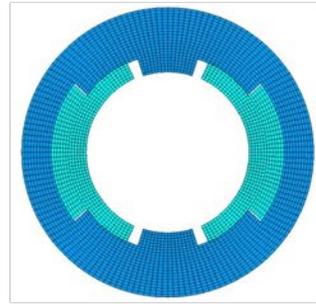
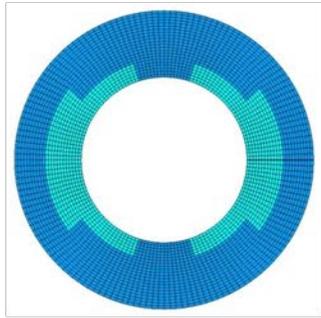
Les forces magnétiques d'un dipole ont tendance à pousser la bobine:

- Verticalement, vers le plan median ($F_y < 0$)
- Horizontalement, vers l'extérieur ($F_x > 0$)

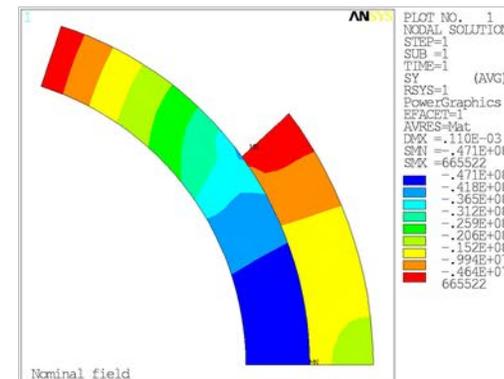


Courtesy P. Ferracin

Le dipôle de LHC : la mécanique



- Une précontrainte est appliquée à la bobine pendant la fabrication (à température ambiante) afin qu'aucune séparation ne se produise au niveau du pôle pendant l'excitation magnétique
- Conception et niveau de précontrainte réalisés à l'aide de calculs FEM
- Différentes techniques utilisées pour le préchargement (colliers, bladders and keys..)

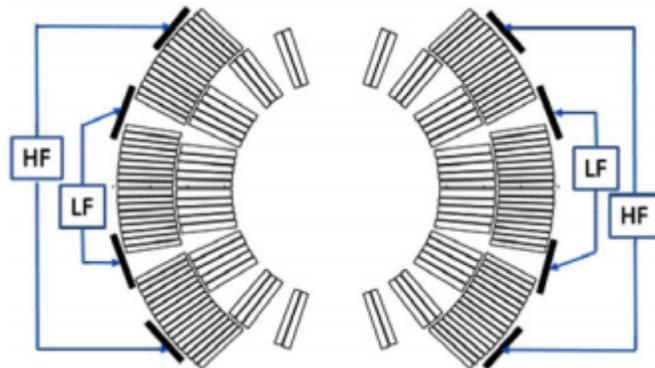
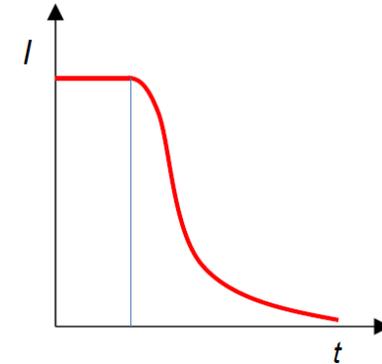
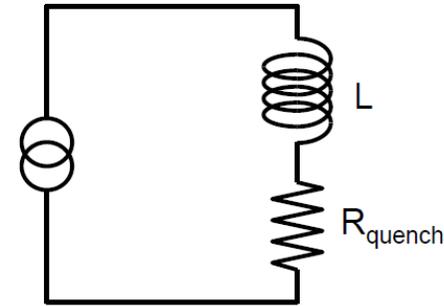


Le dipôle de LHC : la protection

- Quand un quench commence à se propager, on a un circuit RL

$$I = I_0 e^{\left(\frac{-t \cdot R(t)}{L}\right)}$$

- Pour que I décroisse rapidement on doit augmenter R très rapidement
- Décharge d'un banc de condensateur dans les chaufferettes qui chauffent le conducteur supra et le fait transiter en 10-20 ms



HL-LHC Quench heater pour le dipole 11T

Le Main Quadrupole de LHC

LHC MQ

Longueur physique 3.1 m

Masse totale 6.5 t

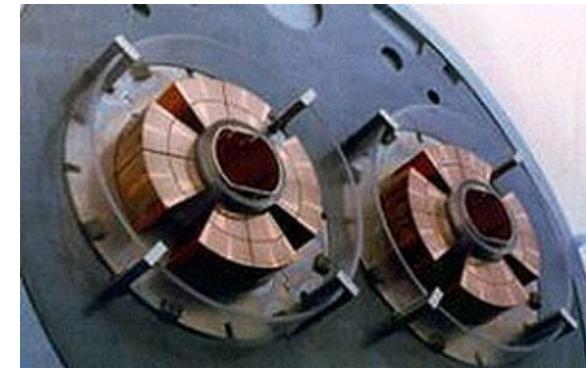
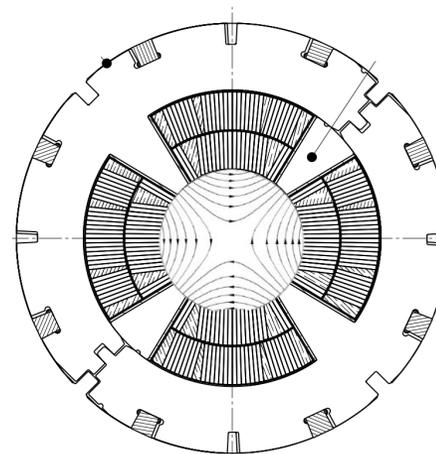
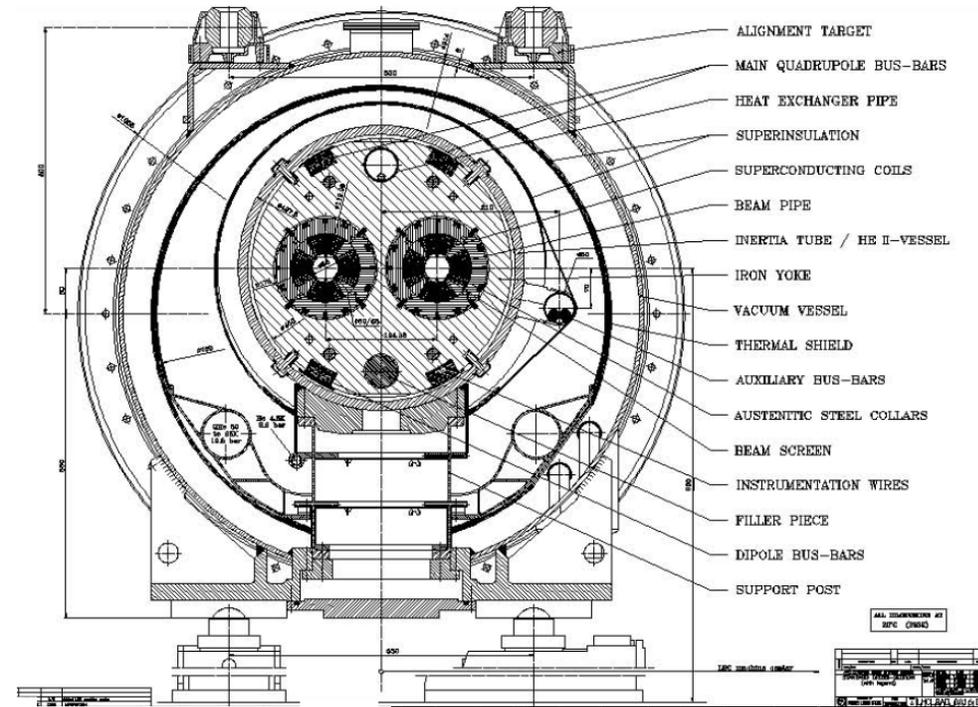
Température de fonctionnement 1.9 K

Champ magnétique max dans les bobines 6.3 T

Gradient de fonctionnement 223 T/m

Energie stockée 790 kJ

Courant de fonctionnement 11870 A



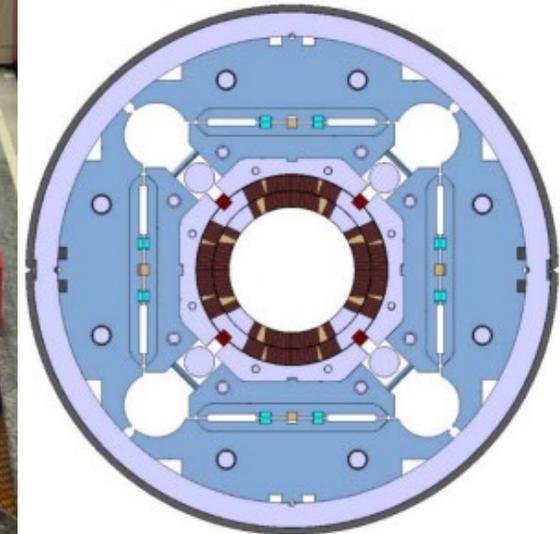
HL-LHC : Le Quadripôle d'interaction

HL-LHC MQXF

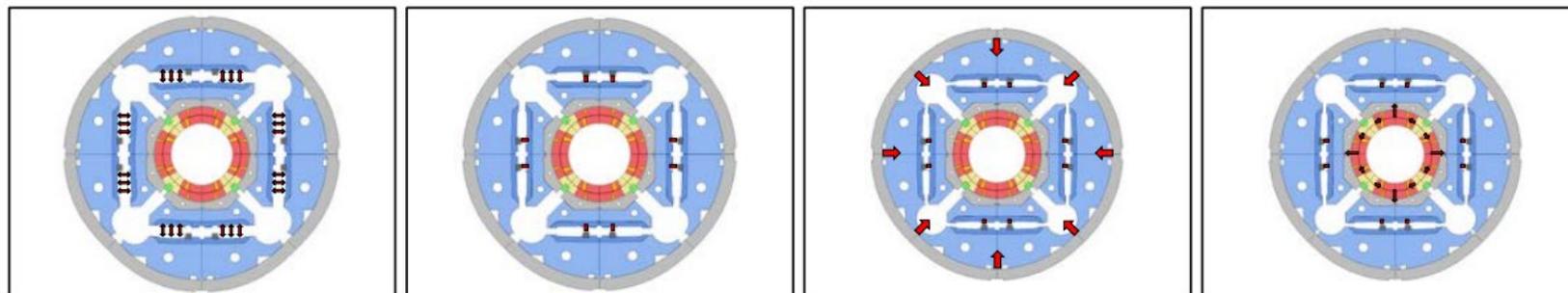
Température de fonctionnement	1.9 K
Champ magnétique max dans les bobines	11.4 T
Gradient de fonctionnement	132.6 T/m
Courant de fonctionnement	16.47 kA



Bladder and key structure



Courtesy of G. Ambrosio, and P. Ferracin

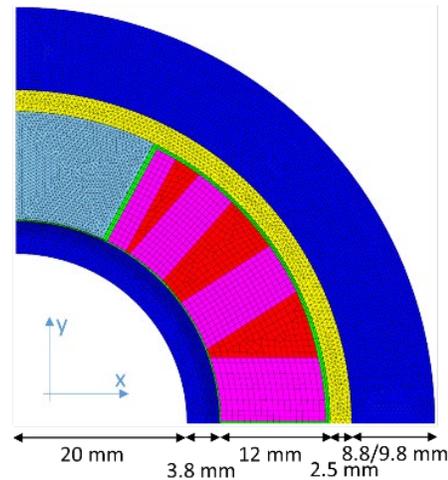
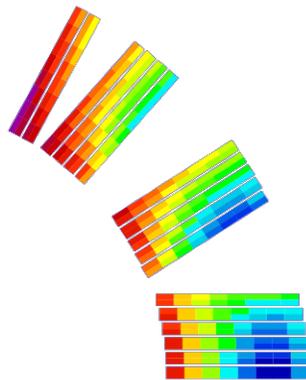
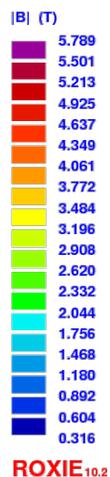


La R&D sur les HTS

Eucard2 aimant supraconducteur $\cos-\theta$ en HTS :



- Aimant seul 5 T (utilisé en mode insert 15.5 T)





4 ■ Les aimants pour détecteurs

Les aimants pour détecteurs

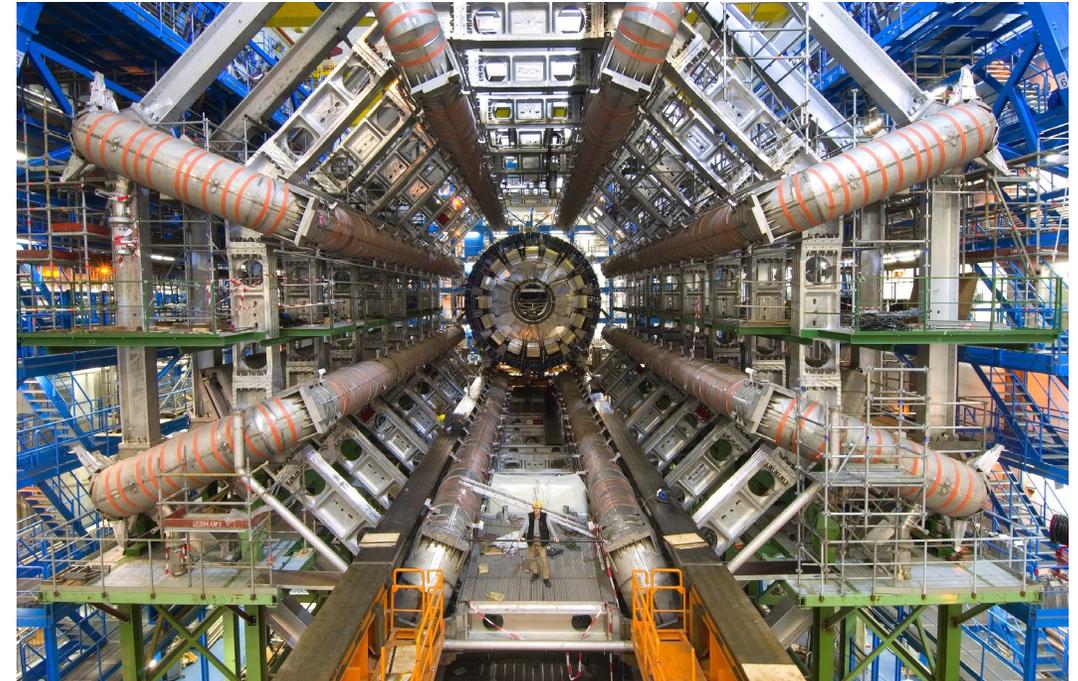
Principes du design:

- Avoir le champ magnétique le plus intense dans le volume le plus grand possible
- Avoir l'aimant le plus « transparent » possible (celui qui occupe le moins d'espace)

Pour faire quoi?

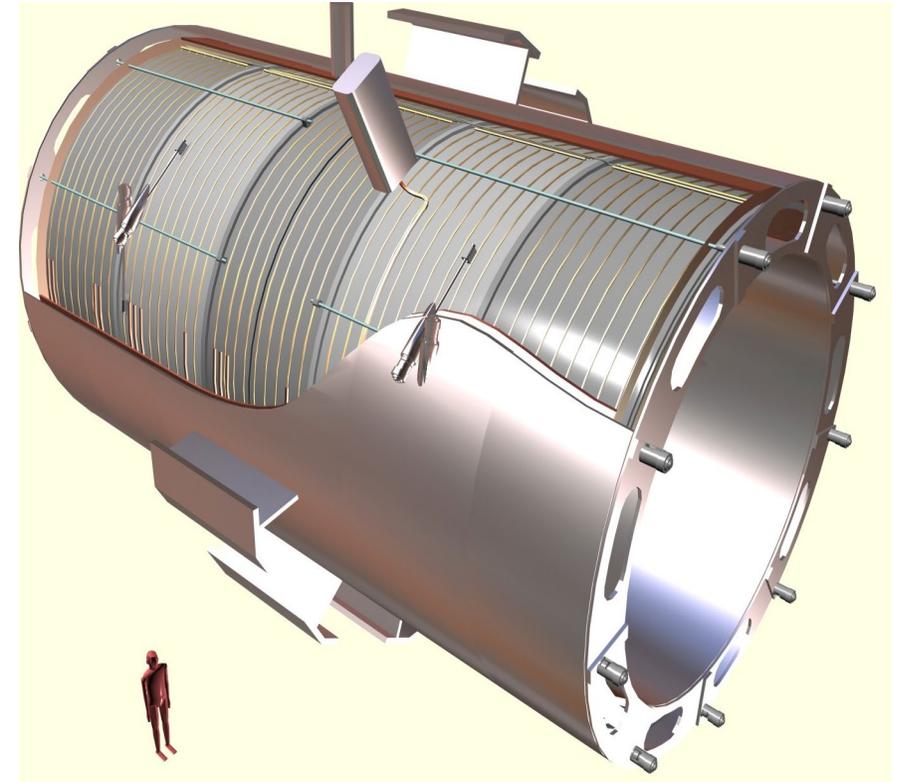
- Différencier les trajectoires des particules

$$\mathbf{F} = q\vec{v} \times \vec{\mathbf{B}}$$



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

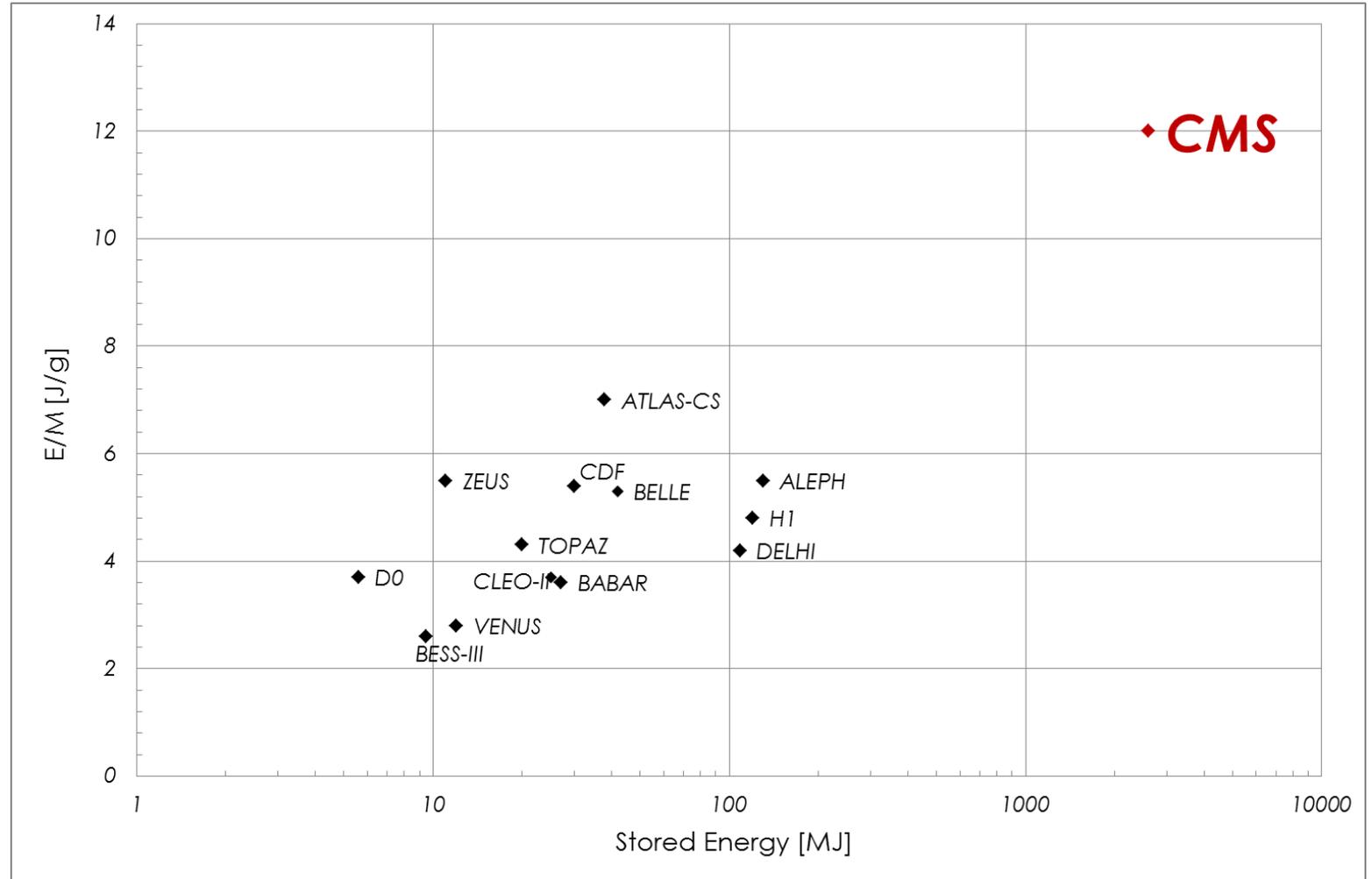


Energie de CMS

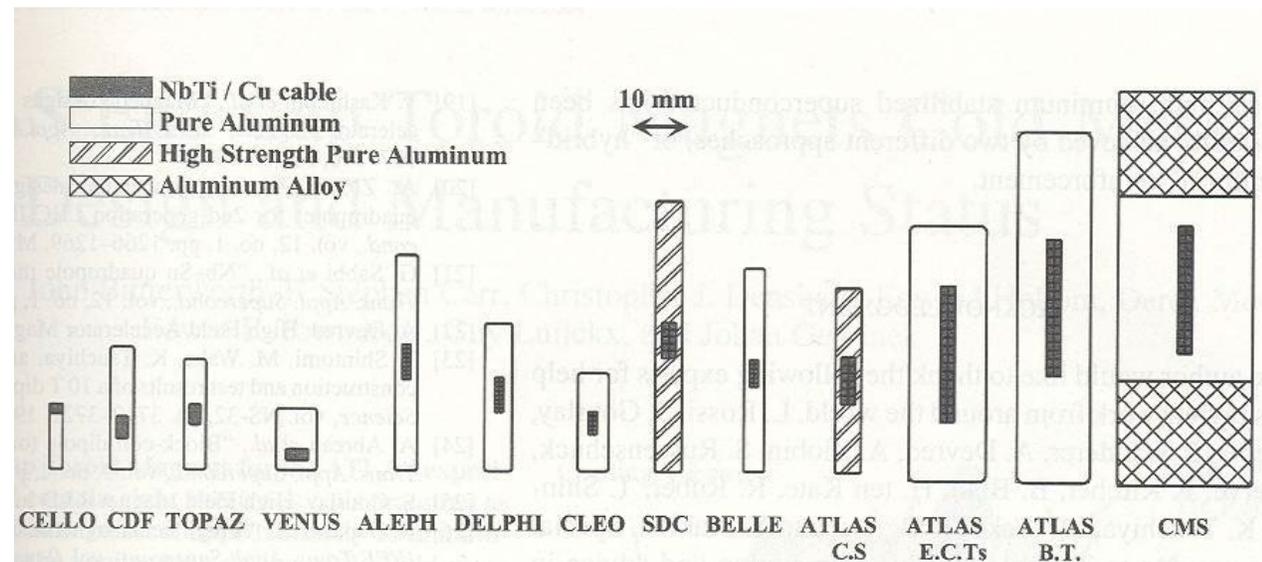
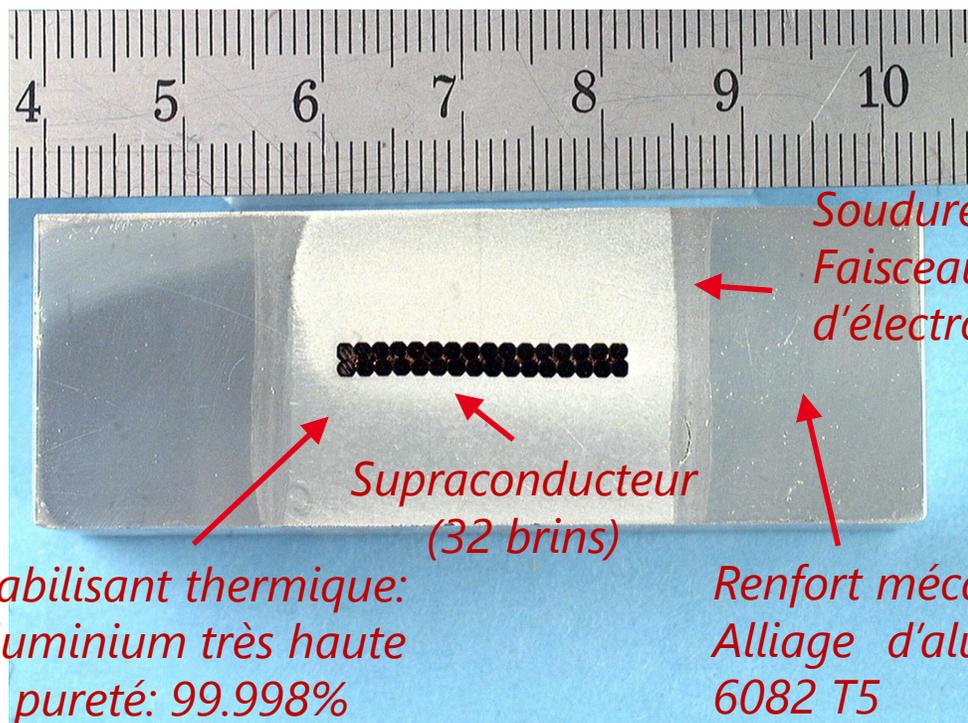


Parmi les aimants de détecteur, **CMS** a à la fois :

- la plus large **énergie stockée** (2.6 GJ)
- la plus large **densité d'énergie stockée** (11.6 kJ/kg)



Le Conducteur de CMS



Réalisation des modules



*Polymérisation
CB-1*

Finition CB0

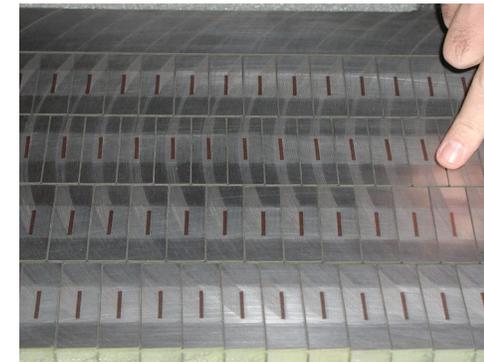


*Bobinage
CB+1*

*Réalisation
cylindre CB+2*



Coupe du bobinage

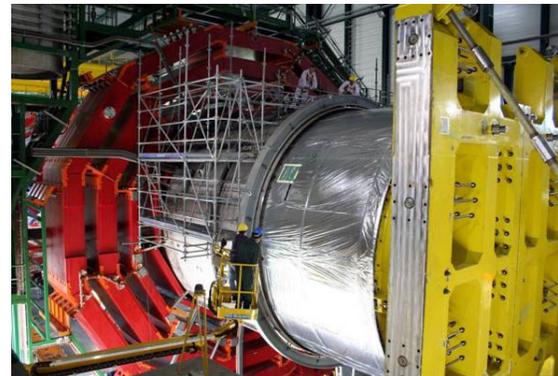


L'assemblage

Assemblage vertical de la bobine : permet un couplage mécanique précis



Retournement et insertion



Jonctions



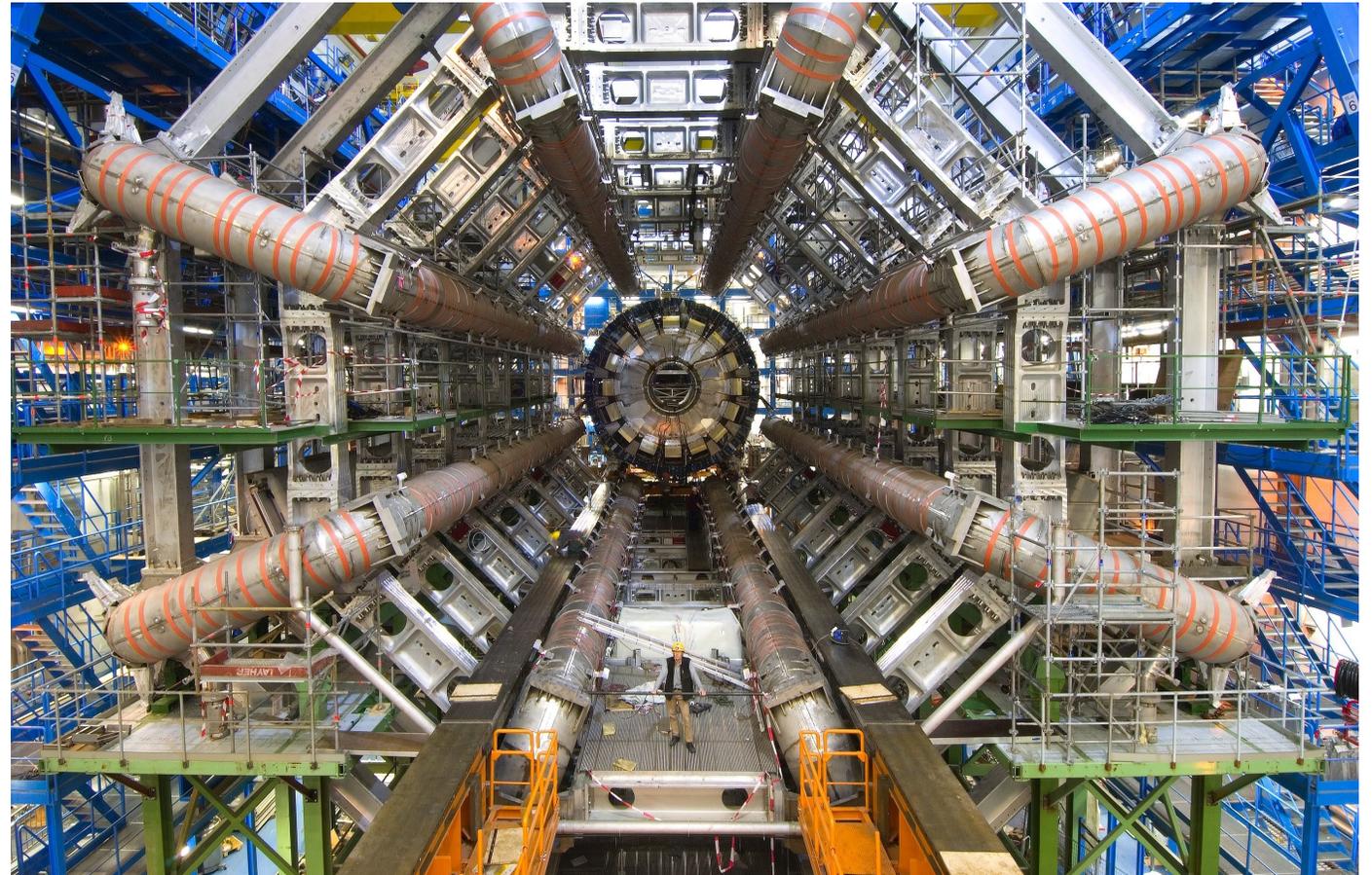
Le rôle de la physique des particules dans la supraconductivité

La physique de particules a permis :

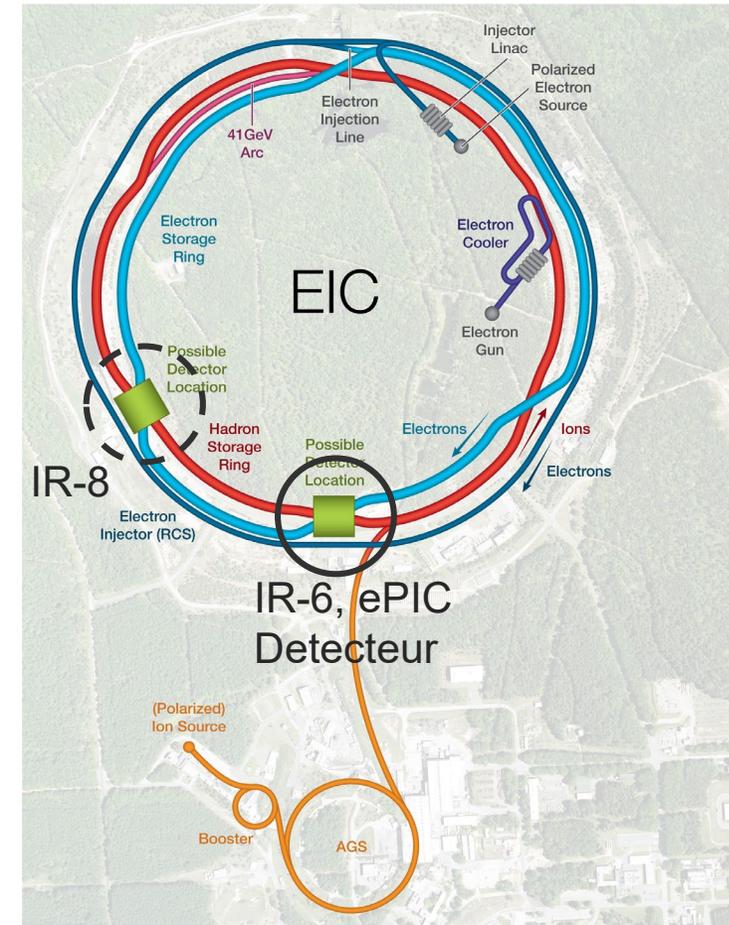
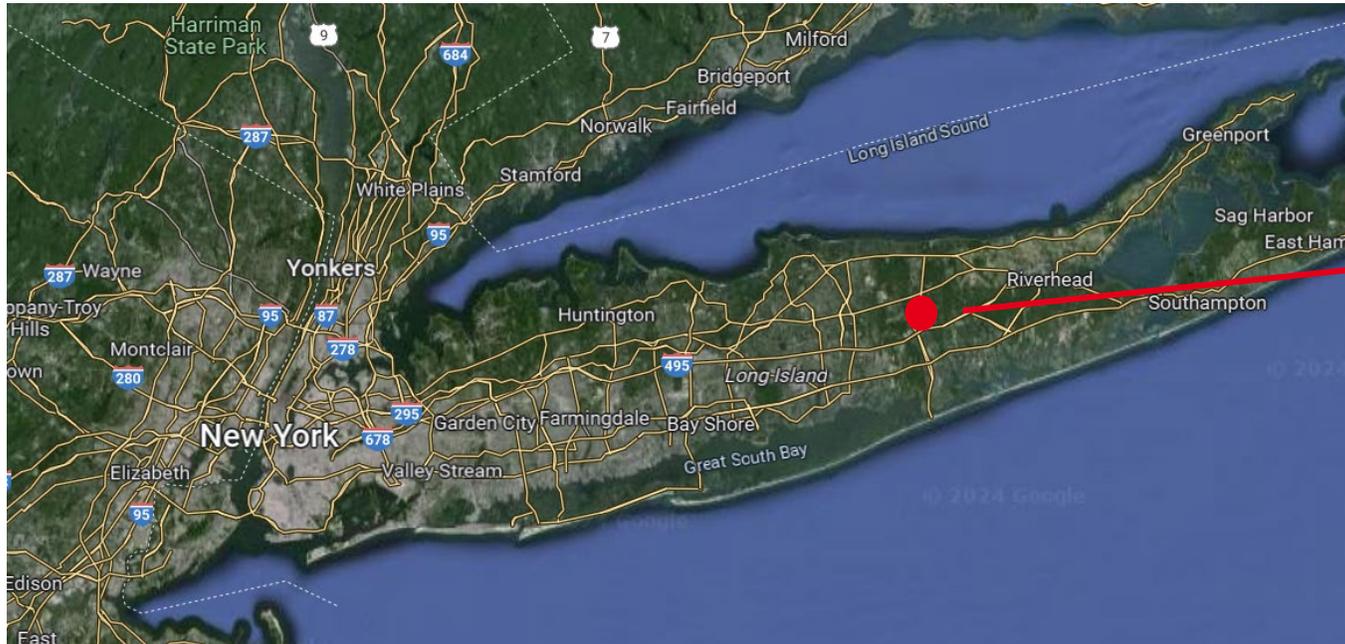
- Développer la filière des supraconducteurs
- Développer les industries de fabrications des aimants supra

Aujourd'hui, elle permette:

- R&D des aimants avec différentes formes et types de conducteurs à faible investissement
- **Elle n'est plus le secteur qui pousse le R&D sur les matériaux et les grands investissement**

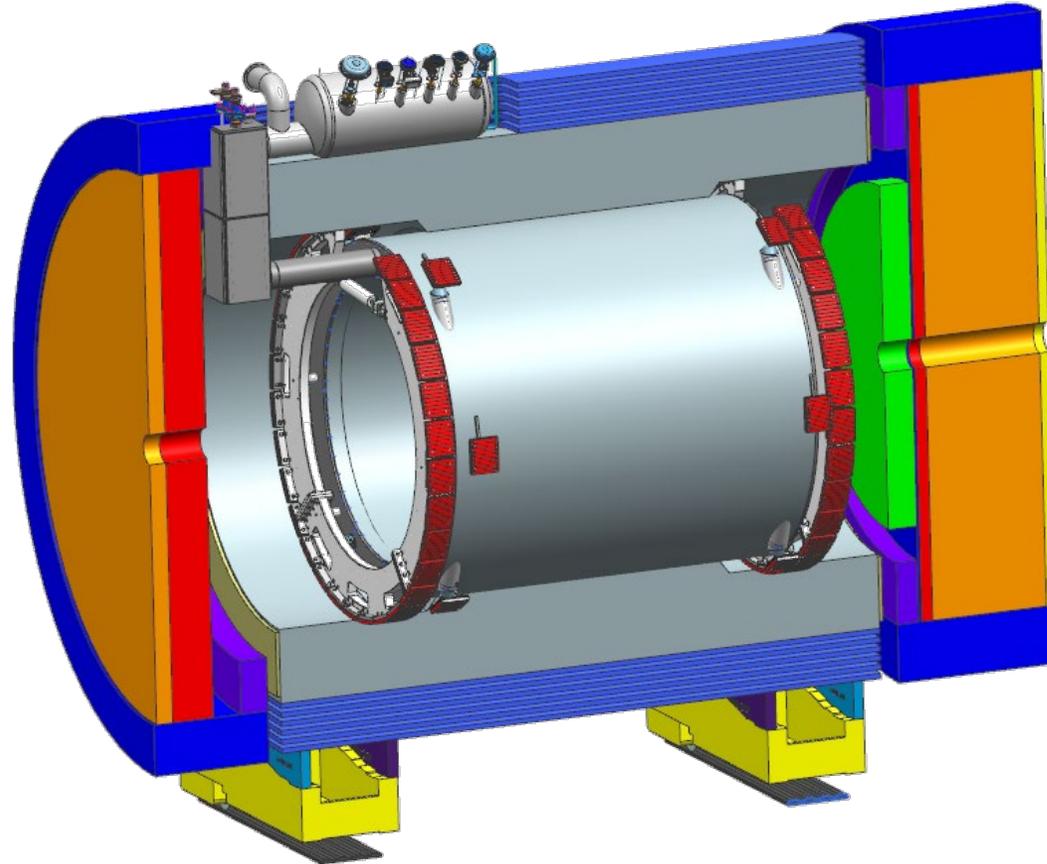


Le « Electron-Ion Collider » au BNL (NY, USA)

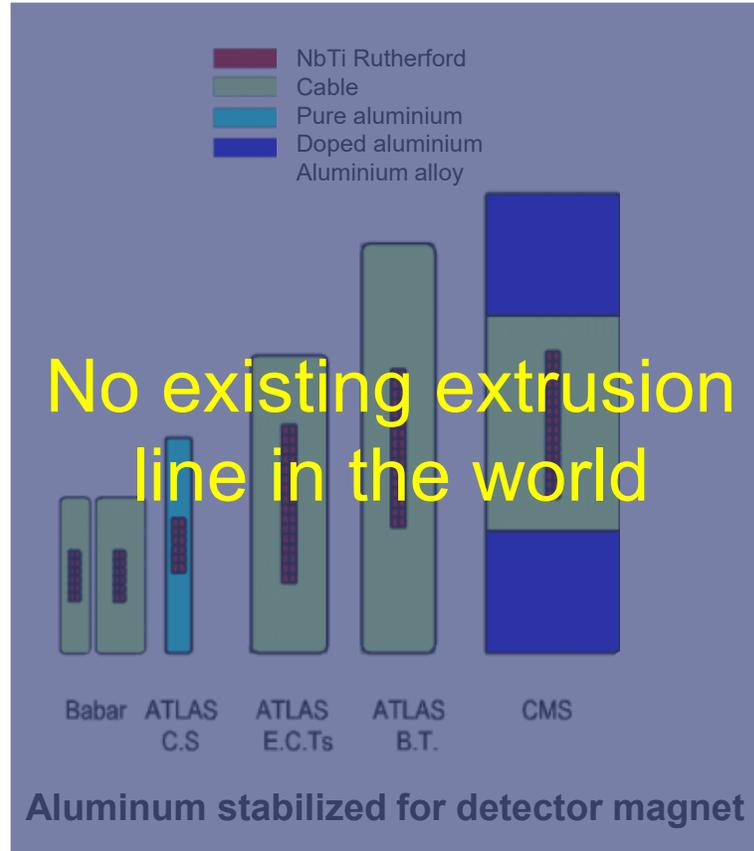
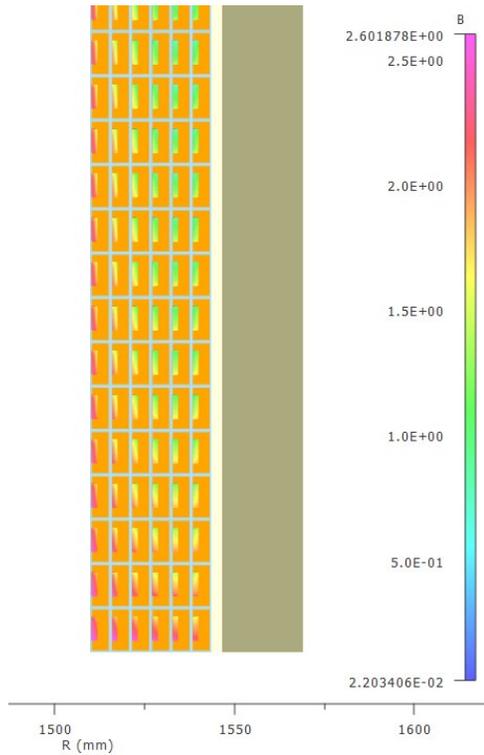


<https://www.bnl.gov/eic/>

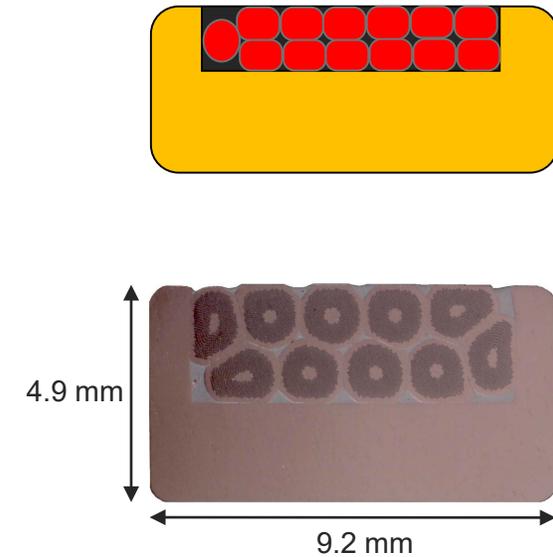
MARCO - Le nouveau solénoïde pour EIC @ BNL



MARCO - Le nouveau solénoïde pour EIC @ BNL



RIC: Rutherford cable In Copper Channel



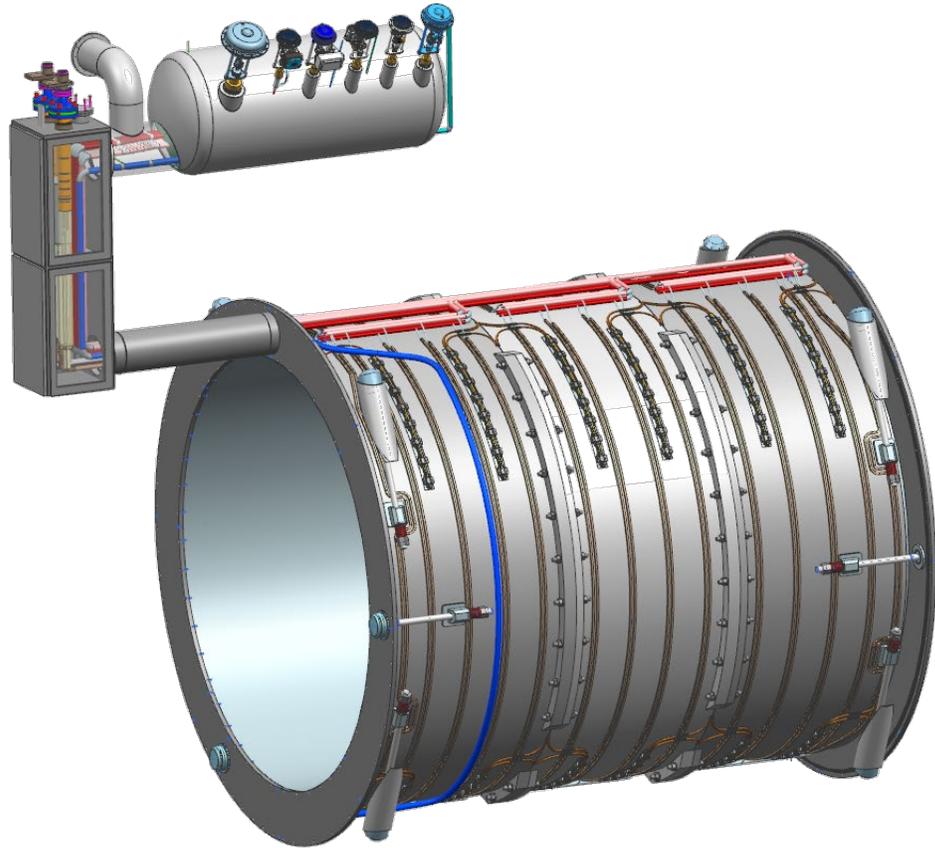
RIC conductor for *Iseult* (MRI magnet)

- Designed at CEA Saclay
- Cable insertion by Luvata at Waterbury*
- Copper section $\sim 37 \text{ mm}^2$

**The insertion line still exists !*

Parameter	Parameter Value	Units
Coil R_{in}	1509.5	mm
Coil R_{out}	1543.1	mm
Coil Length	3492.0	mm
B @ (0,0,0)	2.000	T
Stored Energy	45.7	MJ

MARCO - Le nouveau solénoïde pour EIC @ BNL

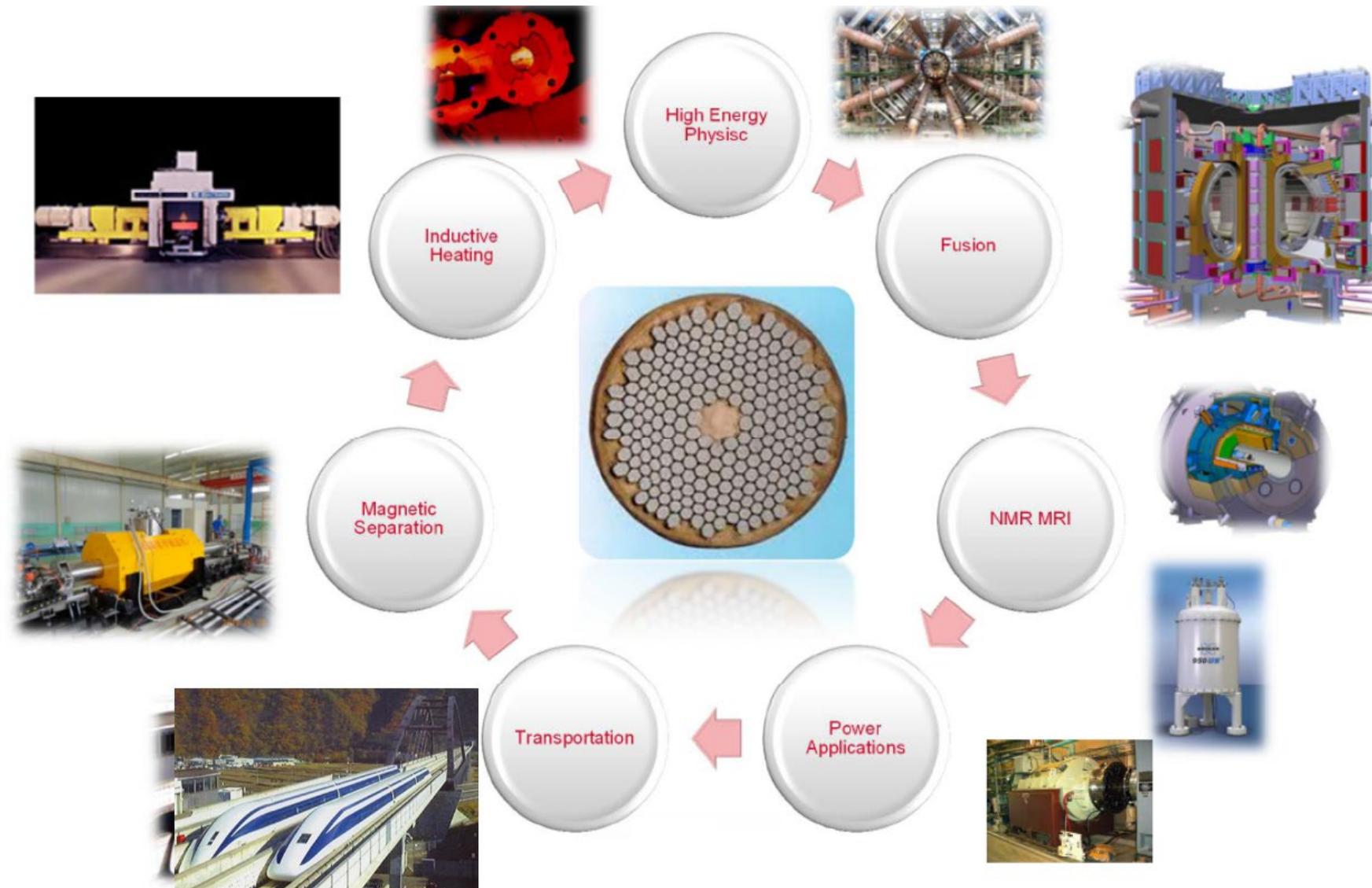


Participation : JLAB, CEA, INFN
Début prévu pour la fabrication : 2026



5 ■ Les autres aimants supraconducteurs

Les autres aimants supraconducteurs

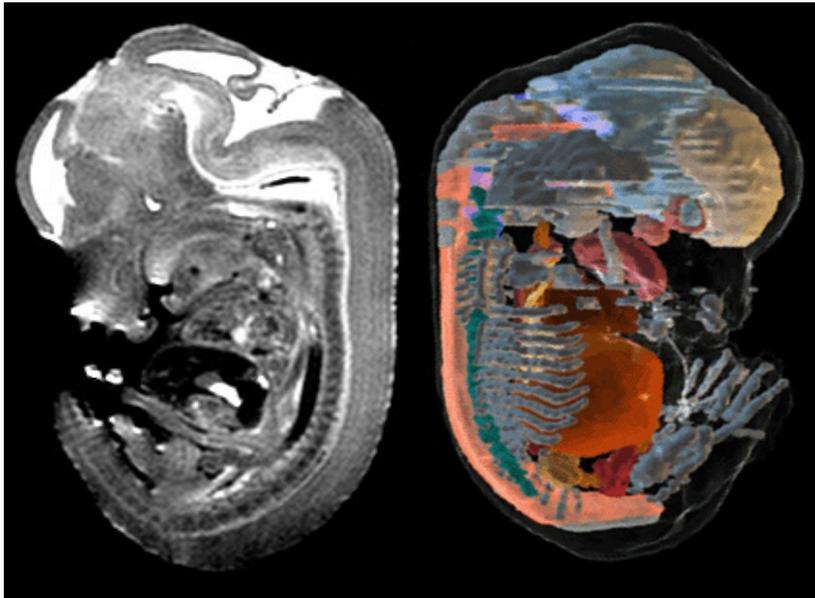


Supraconductivité : une industrie fleurissante

- **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**
L’énergie du soleil comme énergie de demain

Le IRM (Imagerie Résonance Médicale)

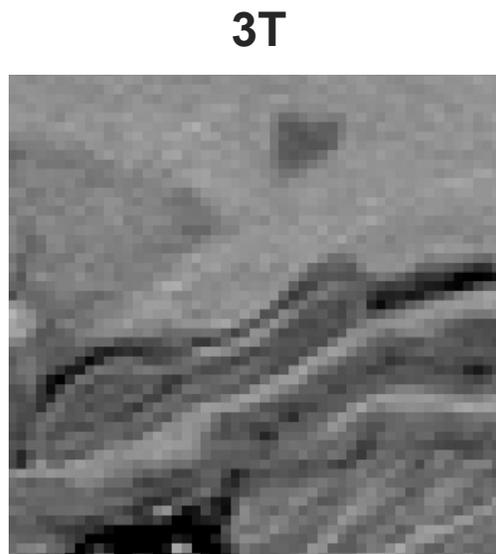
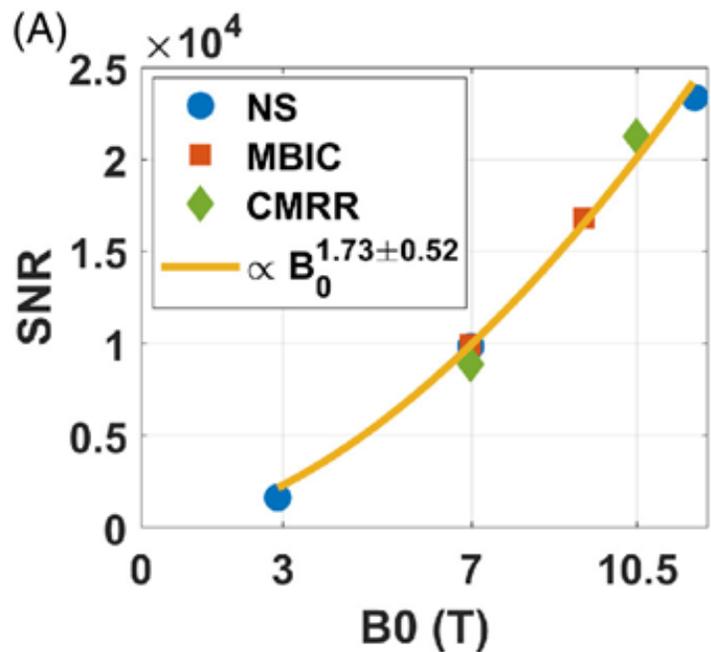
Utilisation du champ magnétique pour voir en 3D l'intérieur du corps humain sans l'endommager



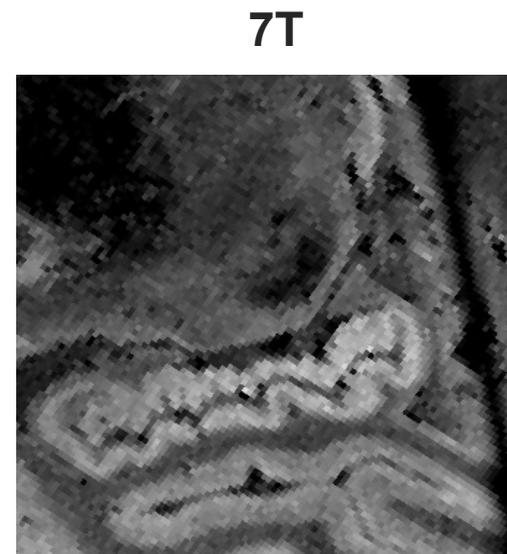
Principe de fonctionnement



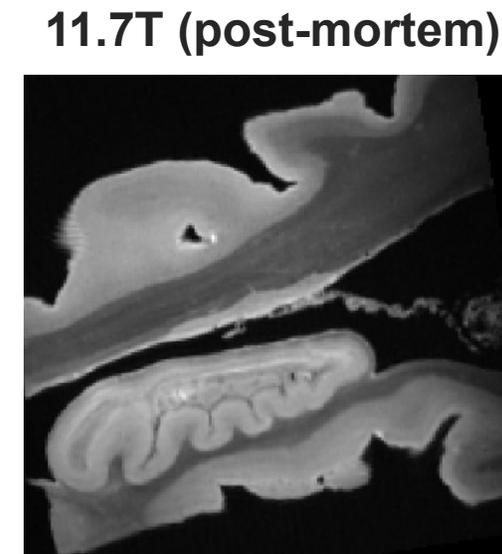
Exemple d'un hippocampes humaine - Courtesy Neurospin/CEA



1 to 2 mm resolution



0.5 to 0.3 mm resolution



0.1 to 0.2 mm resolution

Signal-to-Noise Ratio vs. Field B_0

C. Le Ster et al.

Magn. Reson. Med. 2022;88:2131-2138

Iseult @ CEA



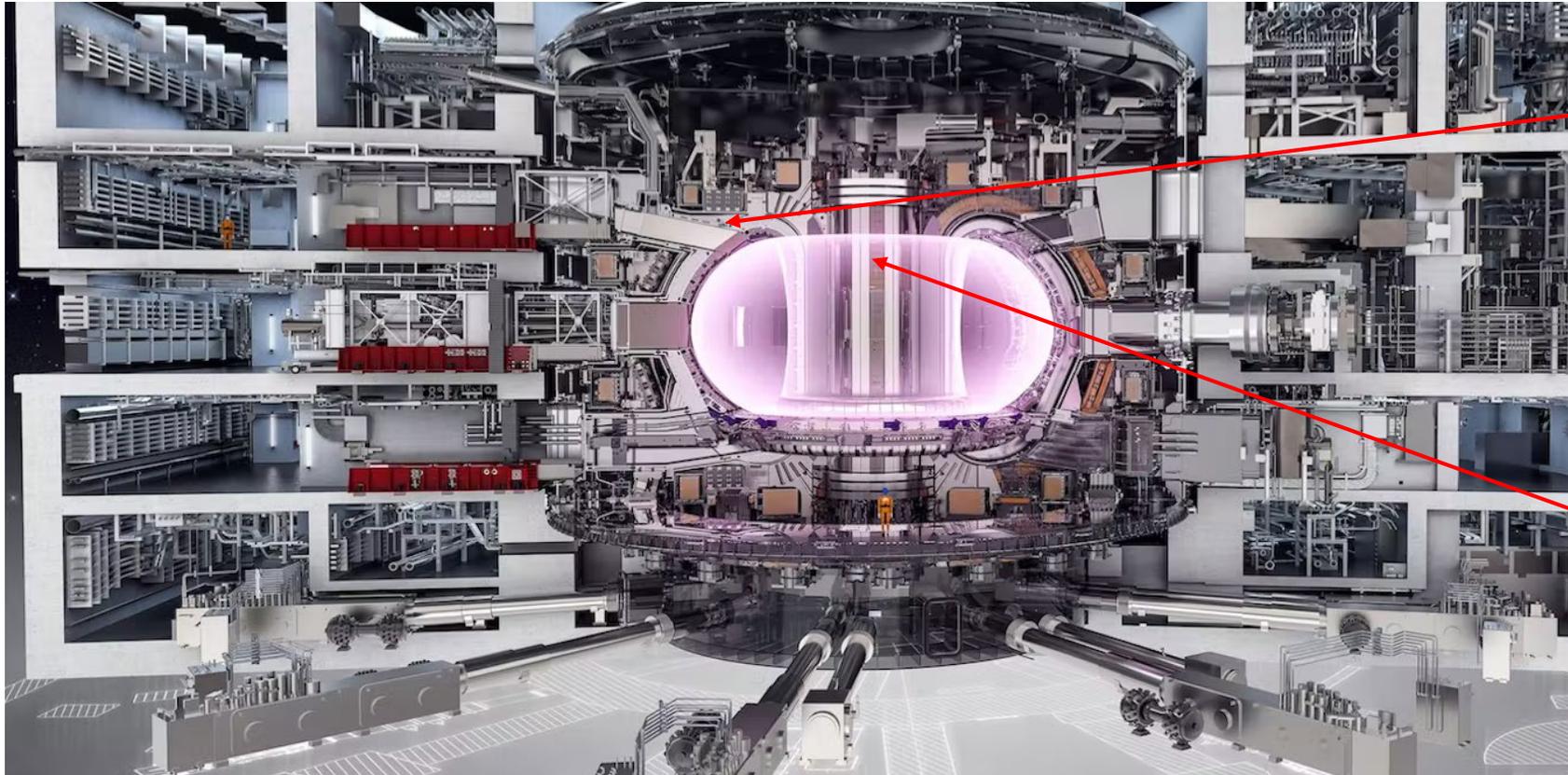
**11.7 T Champ magnétique →
Le IRM le plus puissante au monde!**



Energie stockée	338 MJ
Inductance	308 H
Courant	1483 A
Longueur	5.2 m
Diamètre	5 m
Masse	132 t

La Fusion Nucléaire

Produire de l'énergie propre à partir des isotopes d'hydrogène

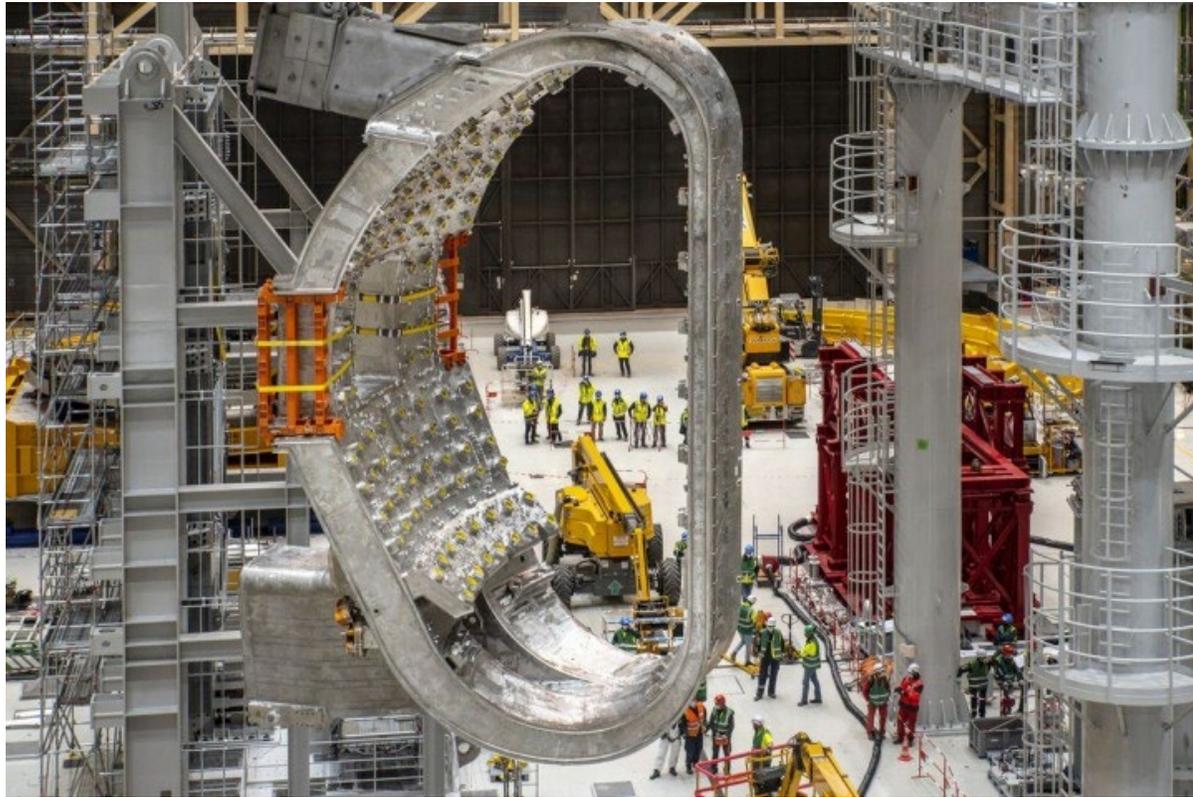


**Bobines toroïdales
@ 11.8 T**

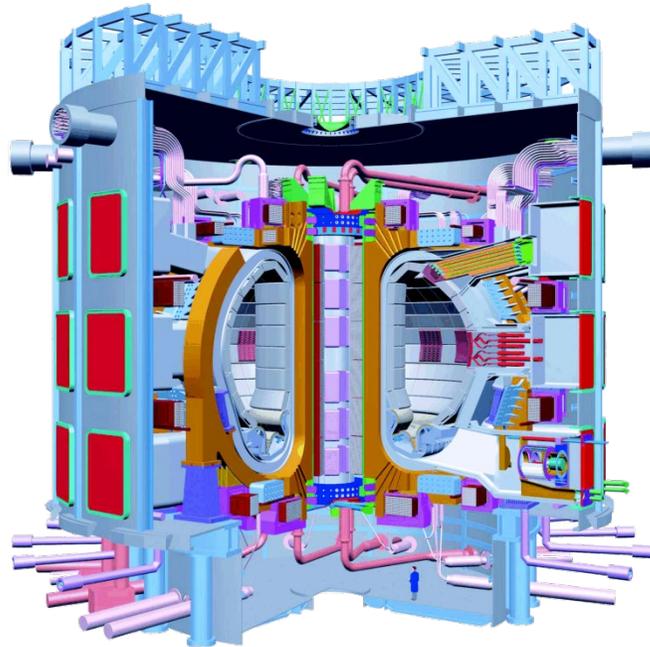
**Plasma
 $T > 100 \cdot 10^6 \text{ K}$**

Projet ITER, Cadarache (FR)

ITER – L'aimant le plus grande au monde



ITER – L'aimant le plus grande au monde



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

- En construction à **Cadarache**,
- Livraison prévue pour ~~2020-2027~~ **2035**
!!,
- Coût **20 G€**

- Maintenir réaction pdt **temps longs**
- Etablir conditions d'un **fonctionnement continu**

- Après ITER
 - **DEMO**
 - **PROTO**

La Fusion 2.0

ITER
LE PLUS CONNU



Première fusion 2029

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

MIT
LE PLUS CRÉDIBLE



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 Bezos Expeditions, Cenovus, fondation souverain de Malaisie...

TRI ALPHA
LE PLUS SENSATIONNEL



Pas de date précise

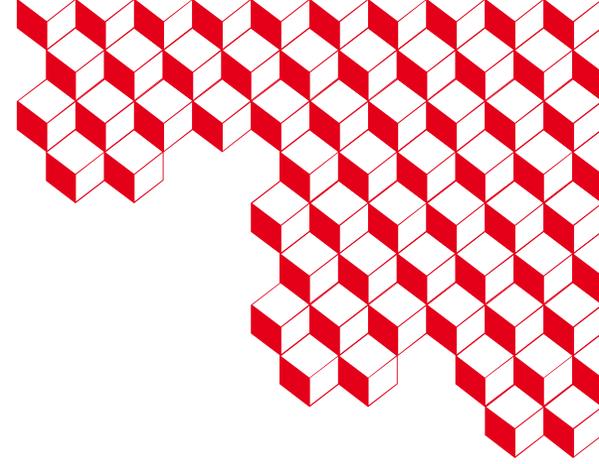
Investisseurs Goldman Sachs, Vulcan Capital, Venrock...

La levée de fonds dans le monde a dépassé le milliard de \$

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



irfu



Merci

Contactez-nous si vous êtes intéressés

CEA SACLAY

91191 Gif-sur-Yvette Cedex

France

Valerio.calvelli@cea.fr

Bibliographie

1. M. Wilson - “Superconducting Magnets”, 1983
2. L. Dresner - “Stability of Superconductors”, 1995
3. F.M. Asner - “High Field Superconducting Magnets”, 1999
4. K.H. Mess, P. Schmuser, S. Wolf – “Superconducting Accelerator Magnets”, 1996
5. A. Devred - “Supraconducteurs à basse température critique pour électroaimants”, 2002
6. Y. Iwasa - “Case Studies in Superconducting Magnets”, 2009
7. “LHC design report v.1: the main LHC ring”, 2004
8. D. Dietderich, “Development of High Current Nb₃Sn Rutherford Cables for NED and LARP”, 2008.
9. S. Russenschuck, “ROXIE : A Computer Code for the Integrated Design of Accelerator Magnets”, 1999
10. L. Rossi, E. Todesco, “Electromagnetic design of superconducting quadrupoles”, 2006

Remerciements



Pour leur aide merci à:

D. Simon, L. Quettier, P. Fazilleau, H. Felice, C. Lorin, E. Rochepault, C. Berriaud