
AIMANTS SUPRACONDUCTEURS

Philippe Fazilleau
CEA/DSM/IRFU/SACM
philippe.fazilleau@cea.fr

Plan du cours

1. Brève Histoire de la Supraconductivité
2. Conducteurs supraconducteurs
 - ✓ Stabilité et Protection
 - ✓ Contraintes Mécaniques
 - ✓ Cryogénie
 - ✓ Exemples de conducteurs
3. Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC
 - ✓ Q-Pôles
 - ✓ CMS
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire
 - ✓ ITER
5. Aimants pour le médical
 - ✓ Neurospin

Bibliographie

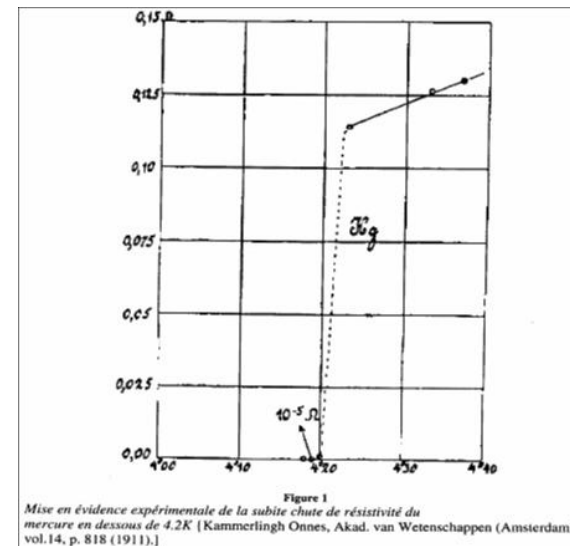
- « CERN ACCELERATOR SCHOOL » : mesures magnétiques , physique générale des accélérateurs, lumière synchrotron , supraconductivité.
- « Magnétostatique », E. Durand.
- « Superconducting Magnets », Martin N. Wilson
- « Les Supraconducteurs », P. Tixador
- « Superconductivity of Metals and Alloys », P.G.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

1. **Brève Histoire de la Supraconductivité**
2. Conducteurs supraconducteurs
 - ✓ Stabilité et Protection
 - ✓ Contraintes Mécaniques
 - ✓ Cryogénie
 - ✓ Exemples de conducteurs
3. Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC
 - ✓ Q-Pôles
 - ✓ CMS
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire
 - ✓ ITER
5. Aimants pour le médical
 - ✓ Neurospin

Brève histoire de la supraconductivité

1908 : Kamerlingh Onnes réalise la liquéfaction de l' hélium qui , à la pression atmosphérique, bout à 4.2 K

1911 :Le savant Hollandais observe la disparition brutale de la résistivité du mercure au dessous de 4.2 K. C' est la découverte de la supraconductivité.



Certains métaux purs tels Pb, Sn , Al sont supraconducteurs mais les meilleurs conducteurs électriques tels Cu , Ag , Au ne possèdent pas la supraconductivité.

Brève histoire de la supraconductivité

- **1933** : mise en évidence du *diamagnétisme parfait* des supraconducteurs (Meisner et Ochsenfeld)

Effet Meisner

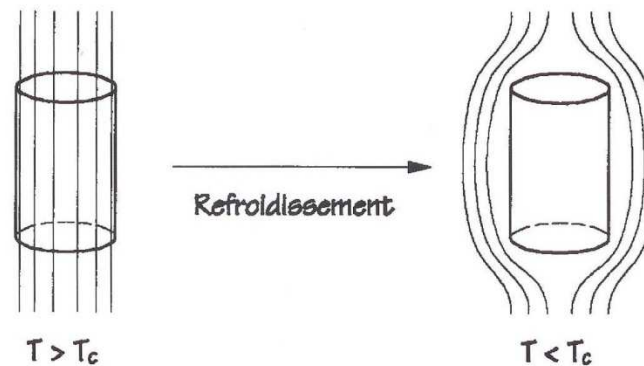


FIG. 2 – *Effet Meissner* : les lignes de champ créées à l'intérieur d'un corps par un champ magnétique extérieur sont expulsées lorsque le corps est refroidi en dessous de sa température de transition.

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.

Brève histoire de la supraconductivité

- **1913** : Découverte d' un **champ critique**
- **1920** : Découverte d' **une densité de courant critique et de l'existence de 2 types de supraconducteurs**. Le type 1 ne peut supporter que des densités de courant et des champs magnétiques faibles. Dans le type 2 , le flux pénètre de façon discontinue mais il autorise des valeurs de champ et de courant plus élevées.
- **1957** : **Théorie BCS de Bardeen, Cooper et Schrieffer**. La supraconductivité est due au transport de charge par des paires d' électrons.

Surface critique

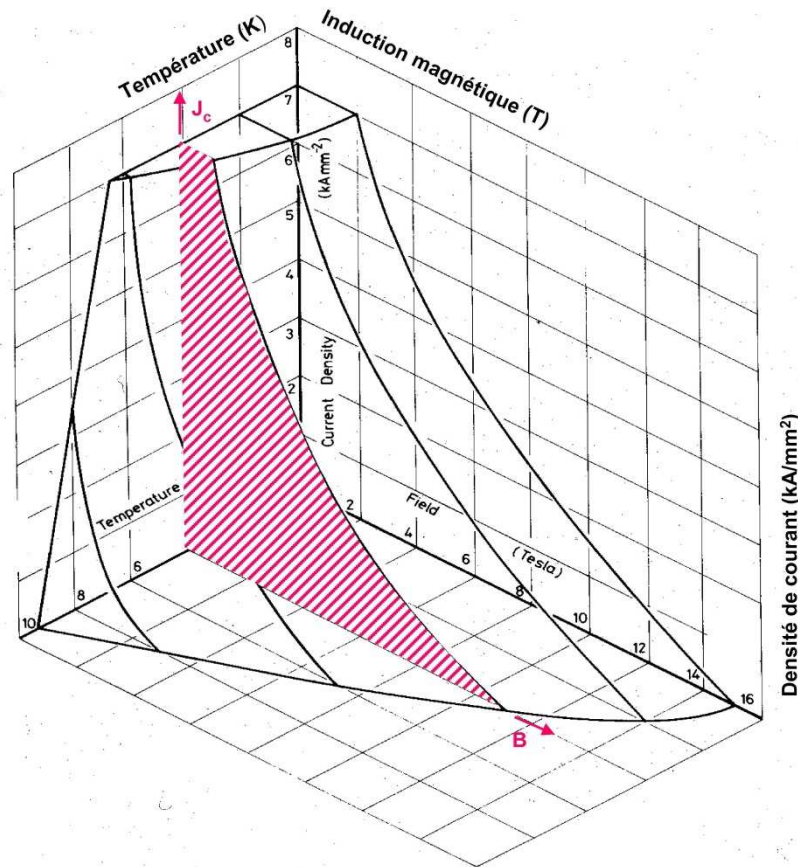


Diagramme de phase du Niobium-Titane (NbTi)

La partie hachurée donne la courbe $J_c(B, T)$ à 4 K, c'est-à-dire la densité de courant maximale dans la supraconducteur refroidi à la température de l'hélium liquide et soumis à une induction magnétique B .

Caractéristique de courant critique NbTi & Nb₃Sn

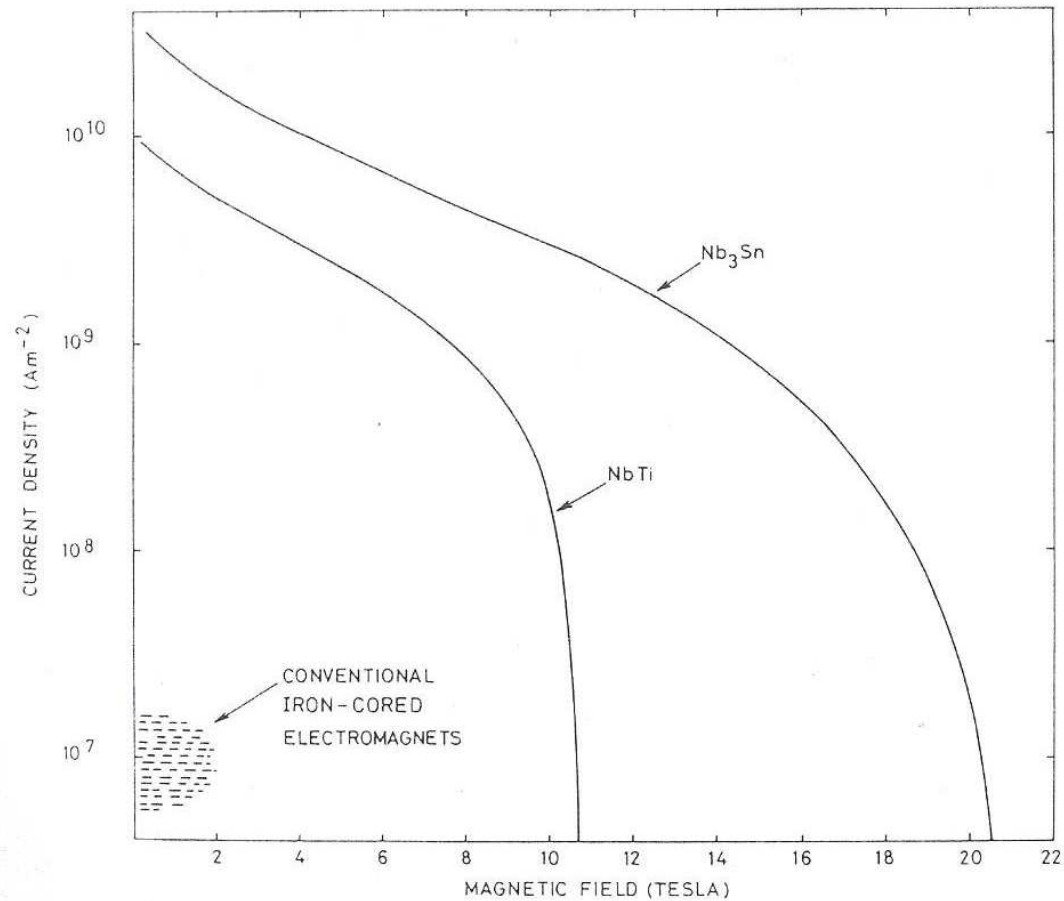


Fig. 1.2 Critical curves for the two common technological superconductors, niobium titanium and niobium tin, at a constant temperature of 4.2 K. Superconductivity prevails below the curves and normal resistivity above. Shaded area at bottom left illustrates the usual operating range for conventional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

Brève histoire de la supraconductivité

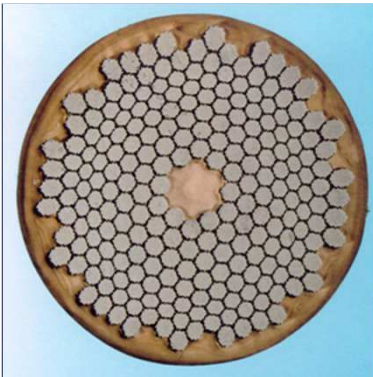
- Début des années **1960** : apparition du composé intermétallique d'étain et niobium Nb_3Sn puis de l'alliage niobium-titane NbTi. Ces matériaux sont assez performants magnétiquement et surtout **mécaniquement** pour réaliser des électroaimants.
- Il faut gérer les phénomènes qui apparaissent lors du brusque retour à l'état normal, le « **Quench** » (ou transition).
- On découvre qu'il faut ajouter du cuivre au supraconducteur pour assurer sa « **stabilisation** ».
- **1986** : découverte des supraconducteurs à haute température critique :...125K pour Ti-Sr-Ca-Cu-O

1. Brève Histoire de la Supraconductivité
2. **Conducteurs supraconducteurs**
 - ✓ **Stabilité et Protection**
 - ✓ Contraintes Mécaniques
 - ✓ Cryogénie
 - ✓ Exemples de conducteurs
3. Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC
 - ✓ Q-Pôles
 - ✓ CMS
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire
 - ✓ ITER
5. Aimants pour le médical
 - ✓ Neurospin

Position du problème

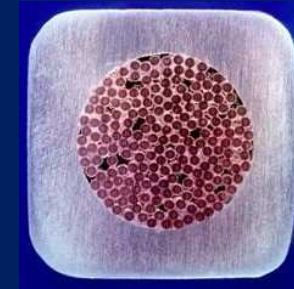
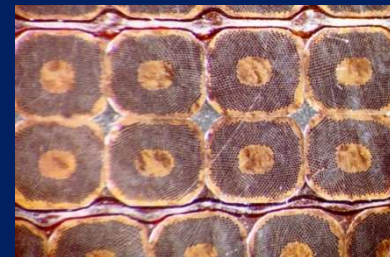
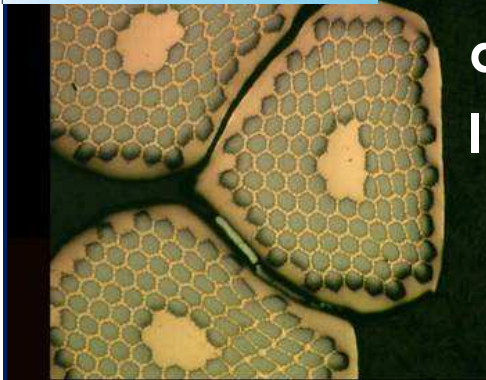


Conducteur supraconducteur à basse température critique dans un électroaimant \Rightarrow prise en compte des propriétés électriques et thermiques du matériau supraconducteur et de sa matrice normale, de celles de l'isolation, de l'environnement cryogénique (fluide réfrigérant).



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

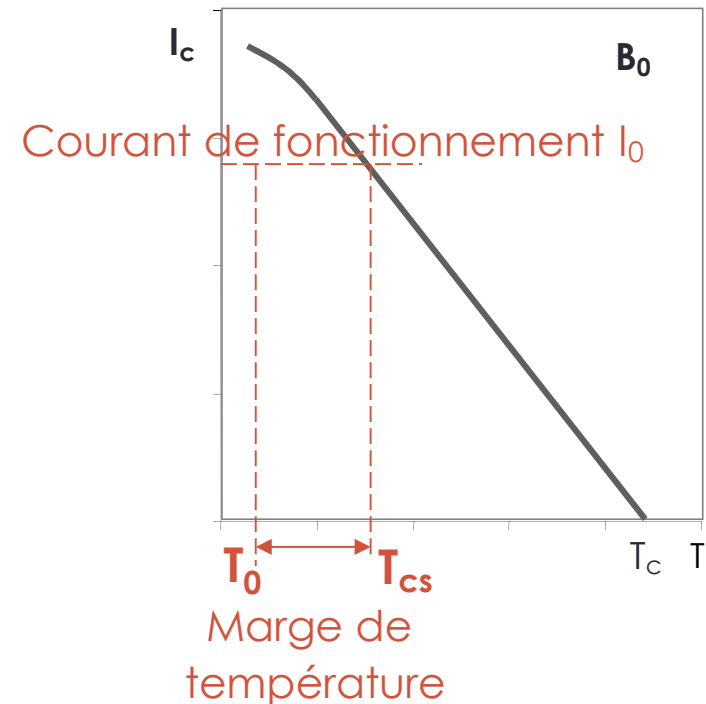
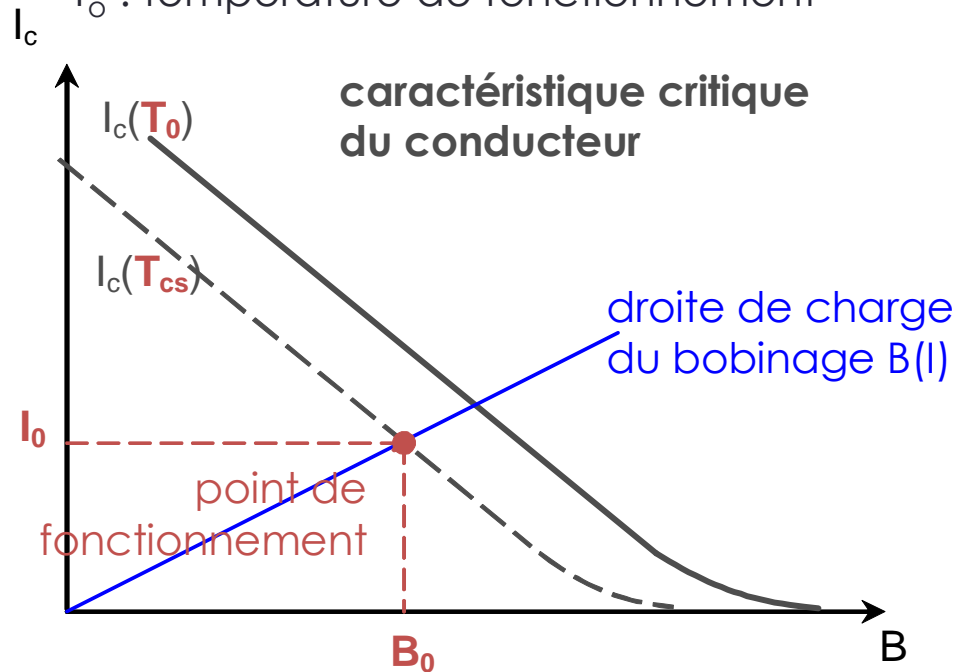
- Assurer la sécurité thermique du bobinage lors d'une transition accidentelle : *protection* de l'aimant.



Fonctionnement d'un aimant supraconducteur

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

T_0 : température de fonctionnement



Marge de température

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

Fonctionnement d'un aimant supraconducteur

Marge enthalpique du conducteur

Énergie volumique minimale nécessaire pour faire transiter le conducteur :

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

Quelques ordres de grandeur

Composite NbTi – Cu avec Cu/NbTi = 2

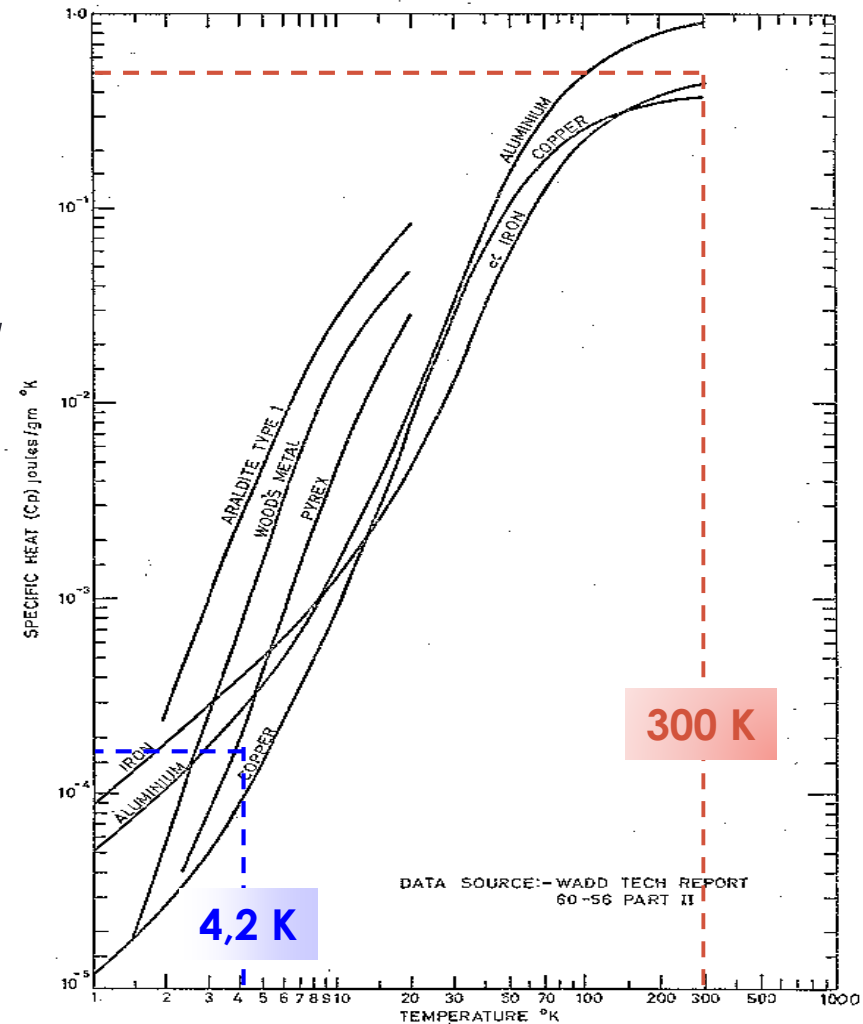
$T_0 = 4,5 \text{ K}$ et $\Delta T = 1,2 \text{ K}$: $\Delta H = 3\,300 \text{ J/m}^3$

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

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

Marge de stabilité ?

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



Qu'est ce que la stabilité thermique d'un supraconducteur ?

Stabilité du point de fonctionnement

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

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

Deux classes de perturbations

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

Trois figures de mérite

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

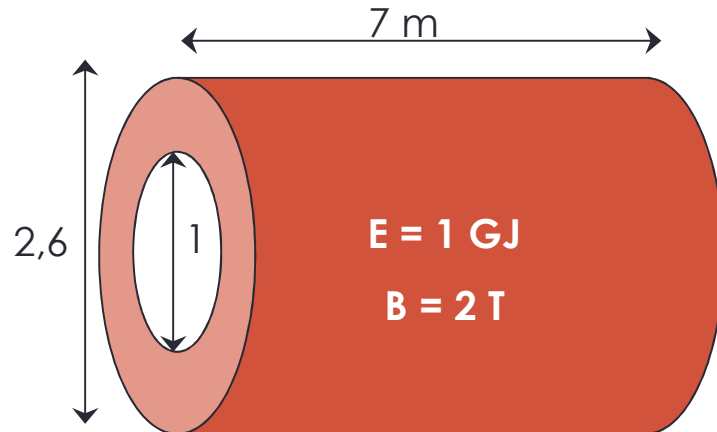
- ✓ La **marge en température** du conducteur, ΔT
- ✓ La **MPZ** (minimum propagating zone) qui donne une idée des **lois d'échelle** générales et des facteurs qui doivent être optimisés lors d'un dimensionnement. Elle permet de comparer **les performances d'un supraconducteur** dans un aimant.
- ✓ La **MQE** (minimum quench energy), **quantité minimale de chaleur**, déposée instantanément en un point, nécessaire pour provoquer un quench ; elle est utile pour un calcul prédictif du comportement thermique d'un aimant donné.

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

Protection des aimants supraconducteurs

Pourquoi doit-on protéger un aimant supraconducteur ?

Aimant résistif en cuivre



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

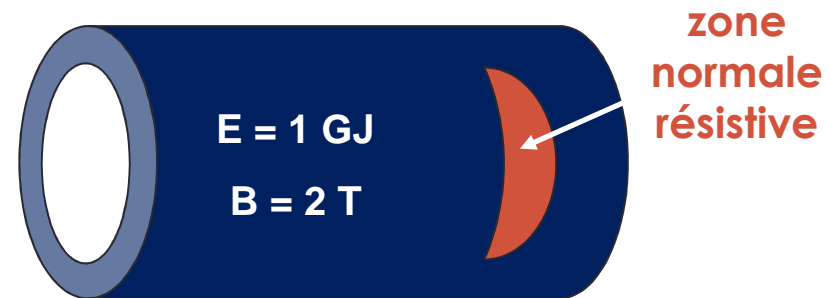
$$V_{tot} = \pi (1,3^2 - 0,5^2) 7 = 32 \text{ m}^3$$

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



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

Aimant supraconducteur



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

$$\Rightarrow \text{épaisseur} / 10$$

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

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

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

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



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


Protection en cas de *quench*

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

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



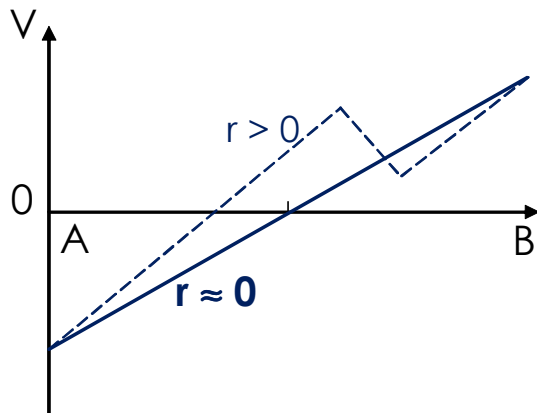
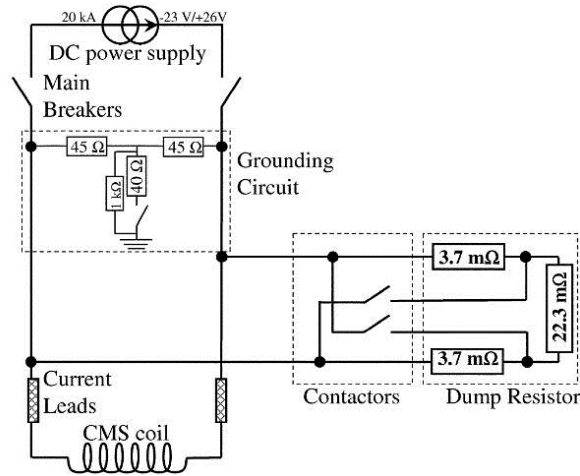
inconvenient : fortes pertes cryogéniques



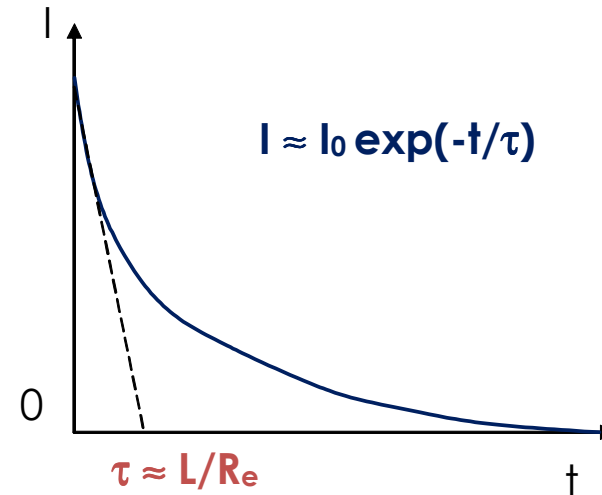
inconvenient : décharge rapide dans résistance extérieure
 ⇒ **forte tension aux bornes du bobinage**

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

Schéma typique de protection (CMS)



r : résistance de la zone transitée



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

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

1. Brève Histoire de la Supraconductivité
2. **Conducteurs supraconducteurs**
 - ✓ Stabilité et Protection
 - ✓ **Contraintes Mécaniques**
 - ✓ Cryogénie
 - ✓ Exemples de conducteurs
3. Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC
 - ✓ Q-Pôles
 - ✓ CMS
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire
 - ✓ ITER
5. Aimants pour le médical
 - ✓ Neurospin

Contraintes mécaniques

$$\sigma \sim JBR$$

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

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

 *Contrainte d'une boucle de rayon 200 mm, portant 150 A/mm², dans 10 T:*

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

1. Brève Histoire de la Supraconductivité
2. **Conducteurs supraconducteurs**
 - ✓ Stabilité et Protection
 - ✓ Contraintes Mécaniques
 - ✓ **Cryogénie**
 - ✓ Exemples de conducteurs
3. Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC
 - ✓ Q-Pôles
 - ✓ CMS
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire
 - ✓ ITER
5. Aimants pour le médical
 - ✓ Neurospin

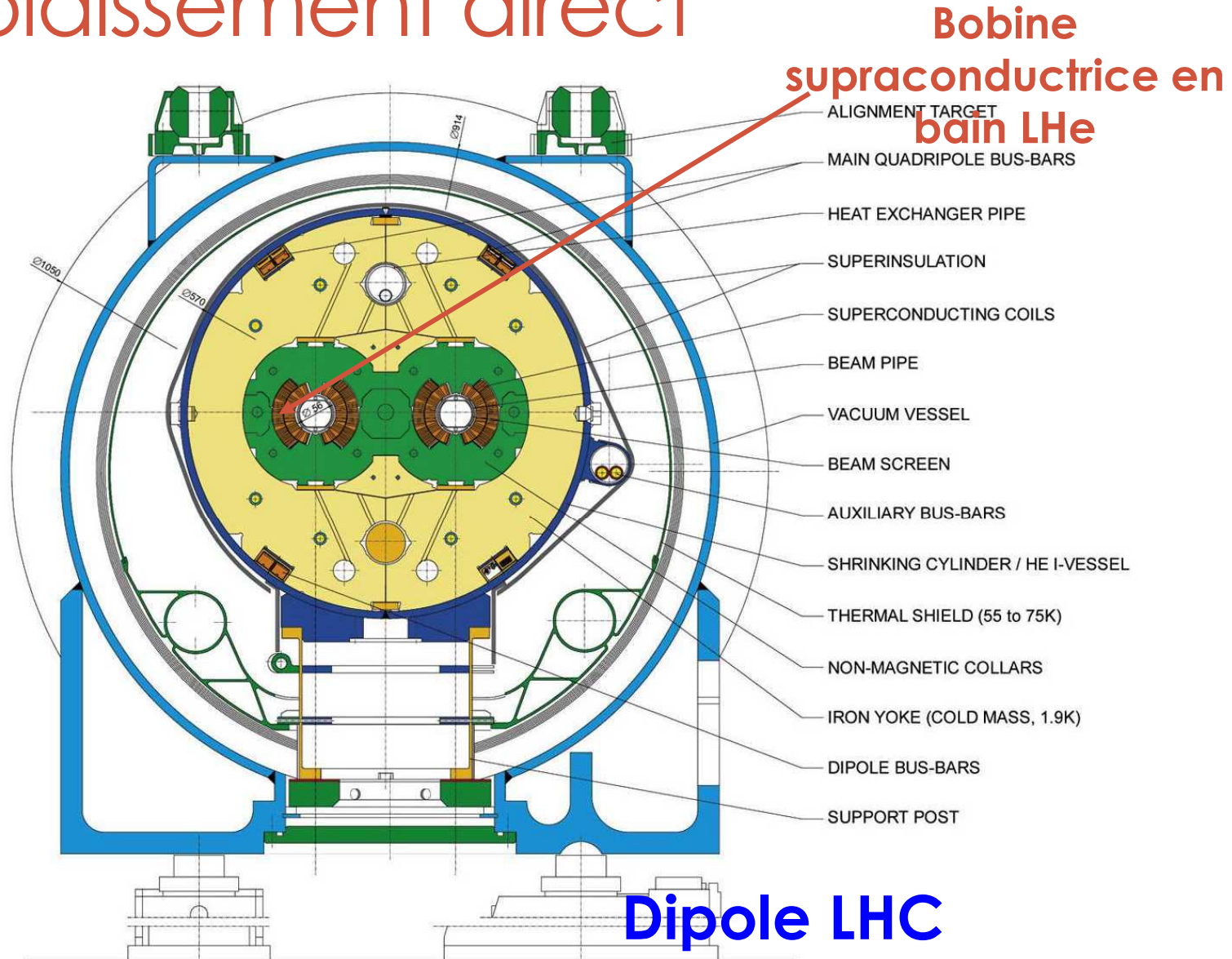
Contraintes cryogéniques

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

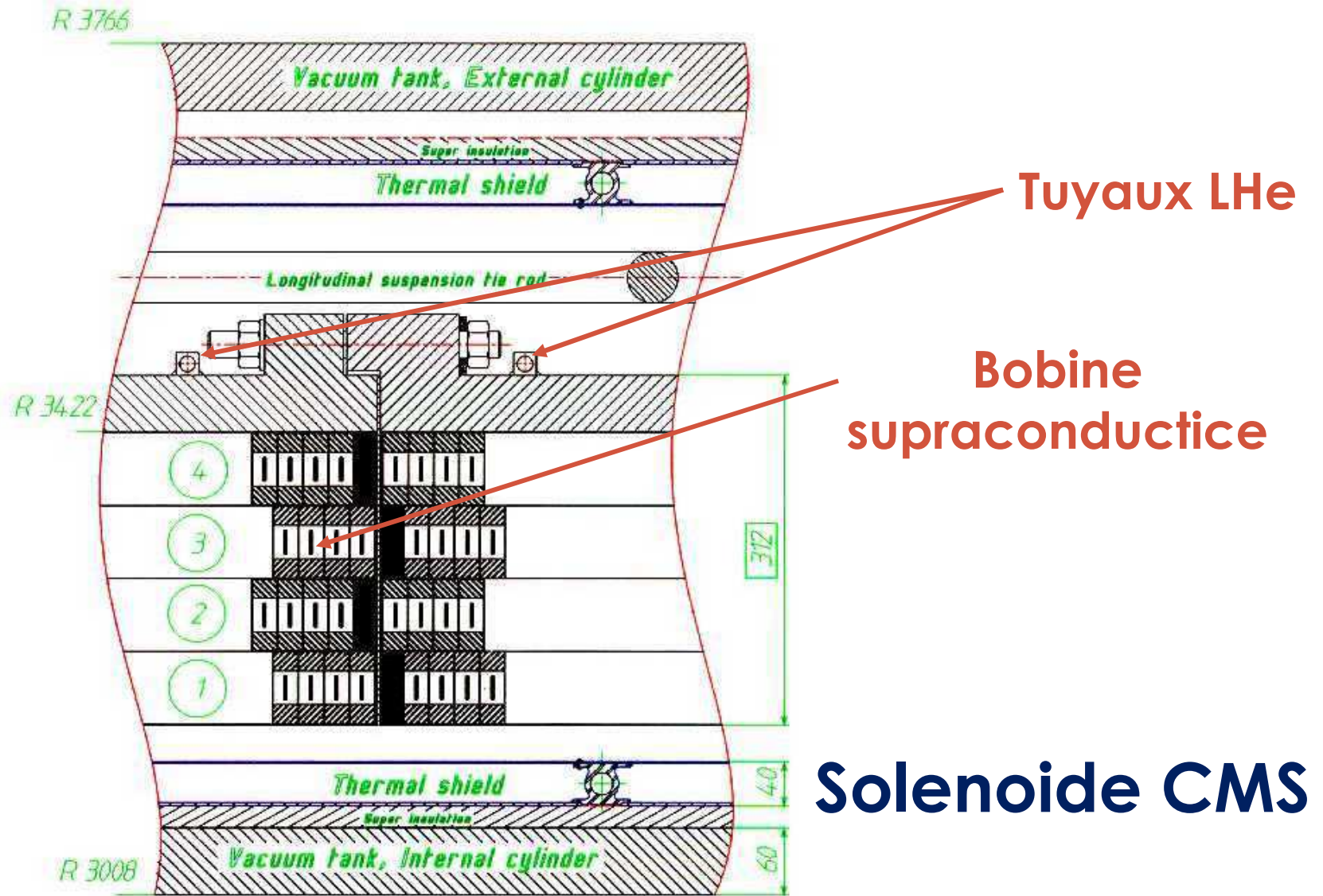
$$Q(rJ^2, \dots) < h P/A (T_c - T_{\text{bain}})$$

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

Refroidissement direct



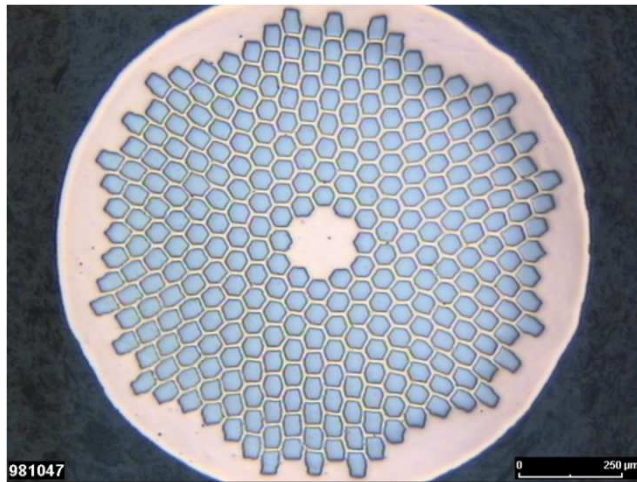
Refroidissement indirect



1. Brève Histoire de la Supraconductivité
2. **Conducteurs supraconducteurs**
 - ✓ Stabilité et Protection
 - ✓ Contraintes Mécaniques
 - ✓ Cryogénie
 - ✓ **Exemples de conducteurs**
3. Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC
 - ✓ Q-Pôles
 - ✓ CMS
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire
 - ✓ ITER
5. Aimants pour le médical
 - ✓ Neurospin

Brins et câbles

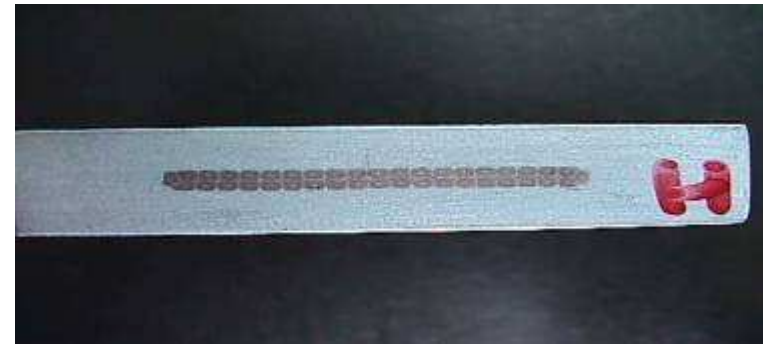
Les supraconducteurs sont formés de **brins multifilamentaires**, où des centaines à milliers de filaments sont enrobés dans une matrice stabilisante, twistés (5-50 mm) pour assurer la stabilité en champ variable et champ propre.



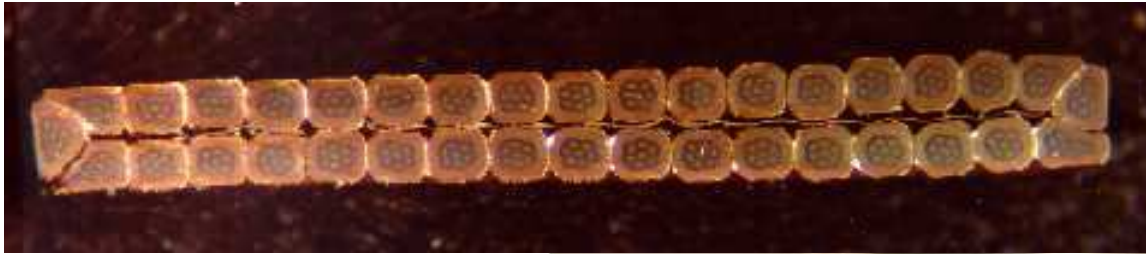
← Brin Atlas Cu/NbTi

↓ Câble Rutherford pour le dipole LHC

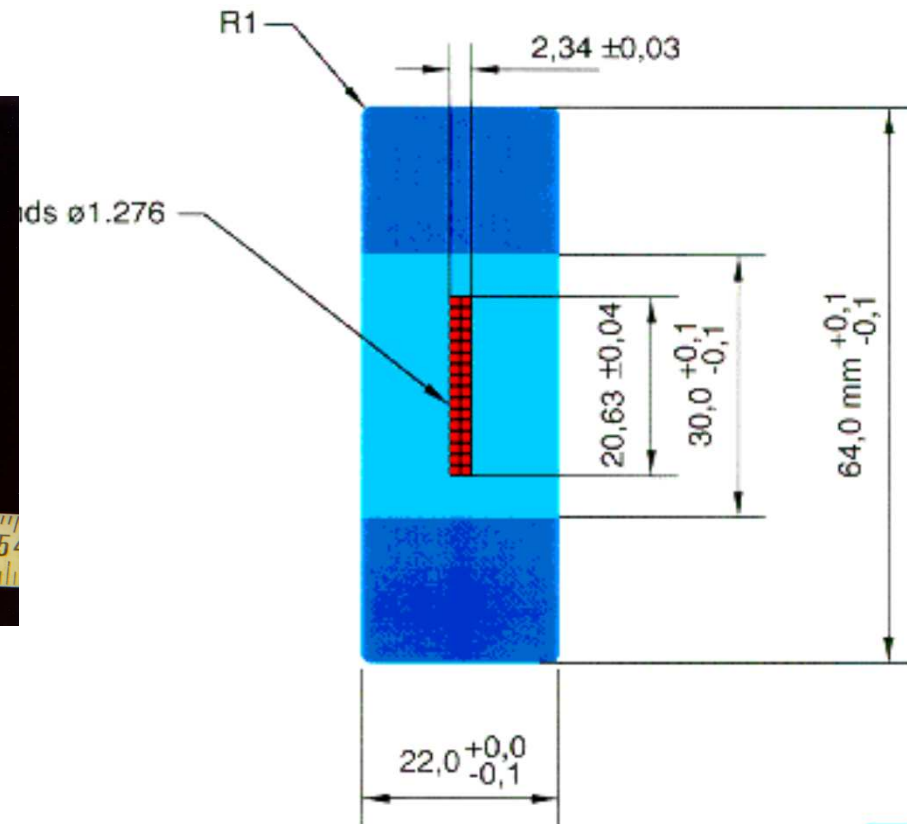
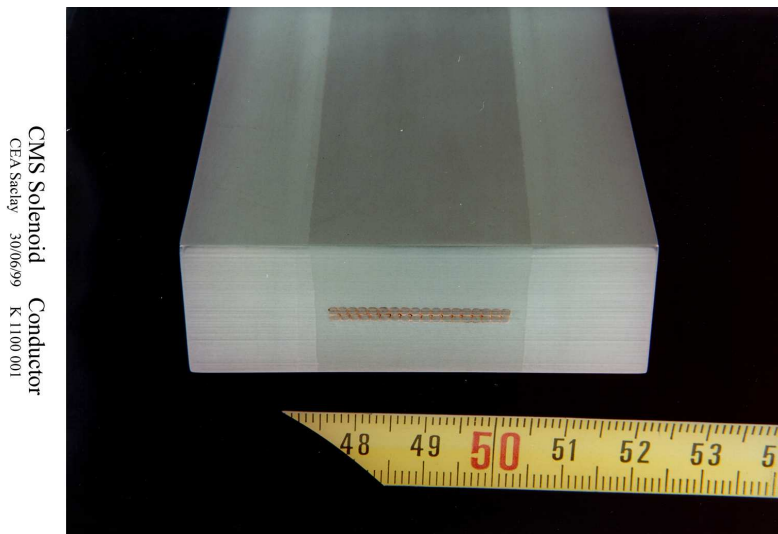
conducteur ATLAS (Rutherford coextr. with pure Al) ↓



Câble de Rutherford



Exemple de conducteur pour détecteurs : CMS



Conductor Ic at 4.2 K and 5 Tesla 55.6 kA

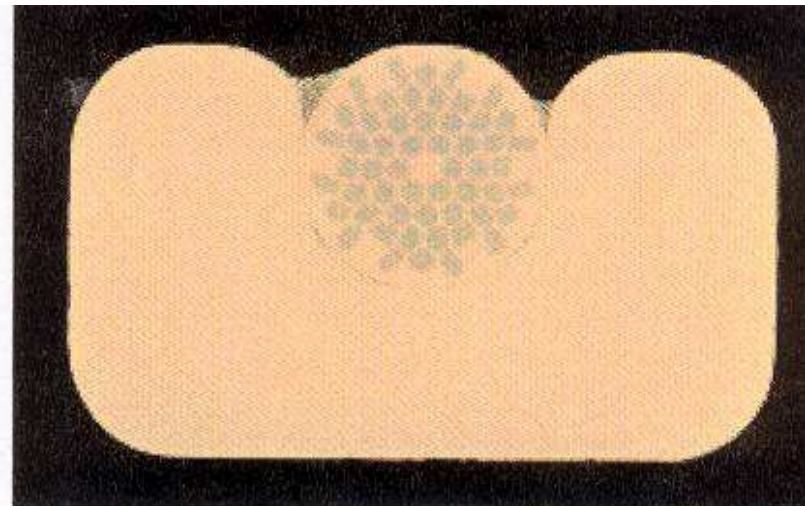
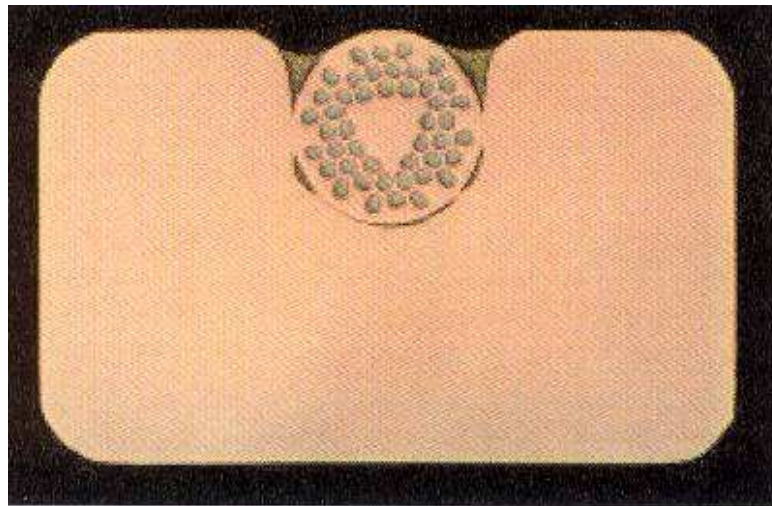
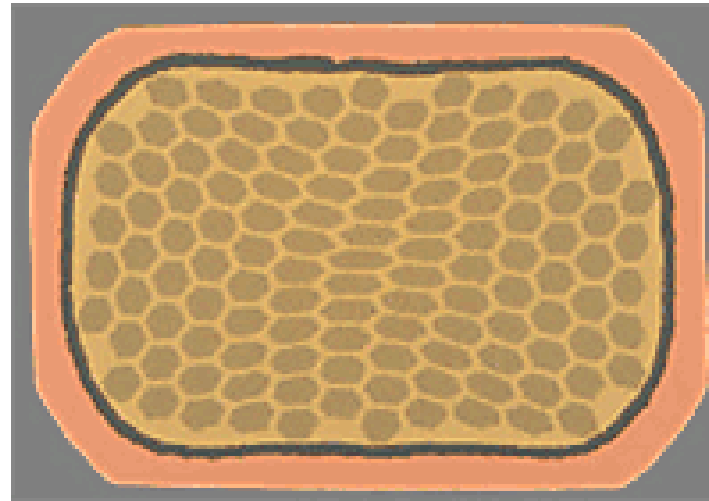
Cu/SC ratio 1.1:1

- Al 99.998
- Alloy

Conducteur ITER

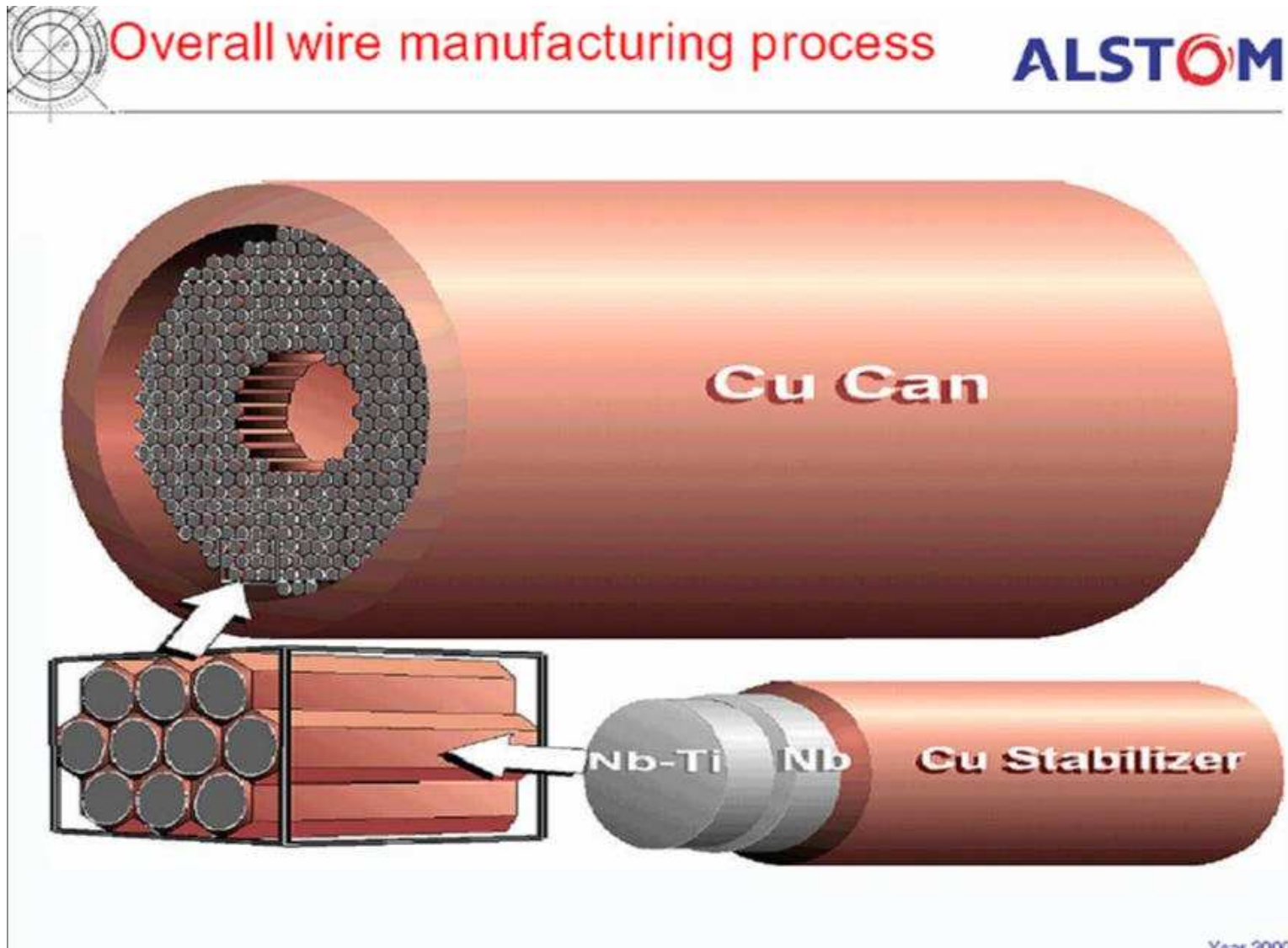


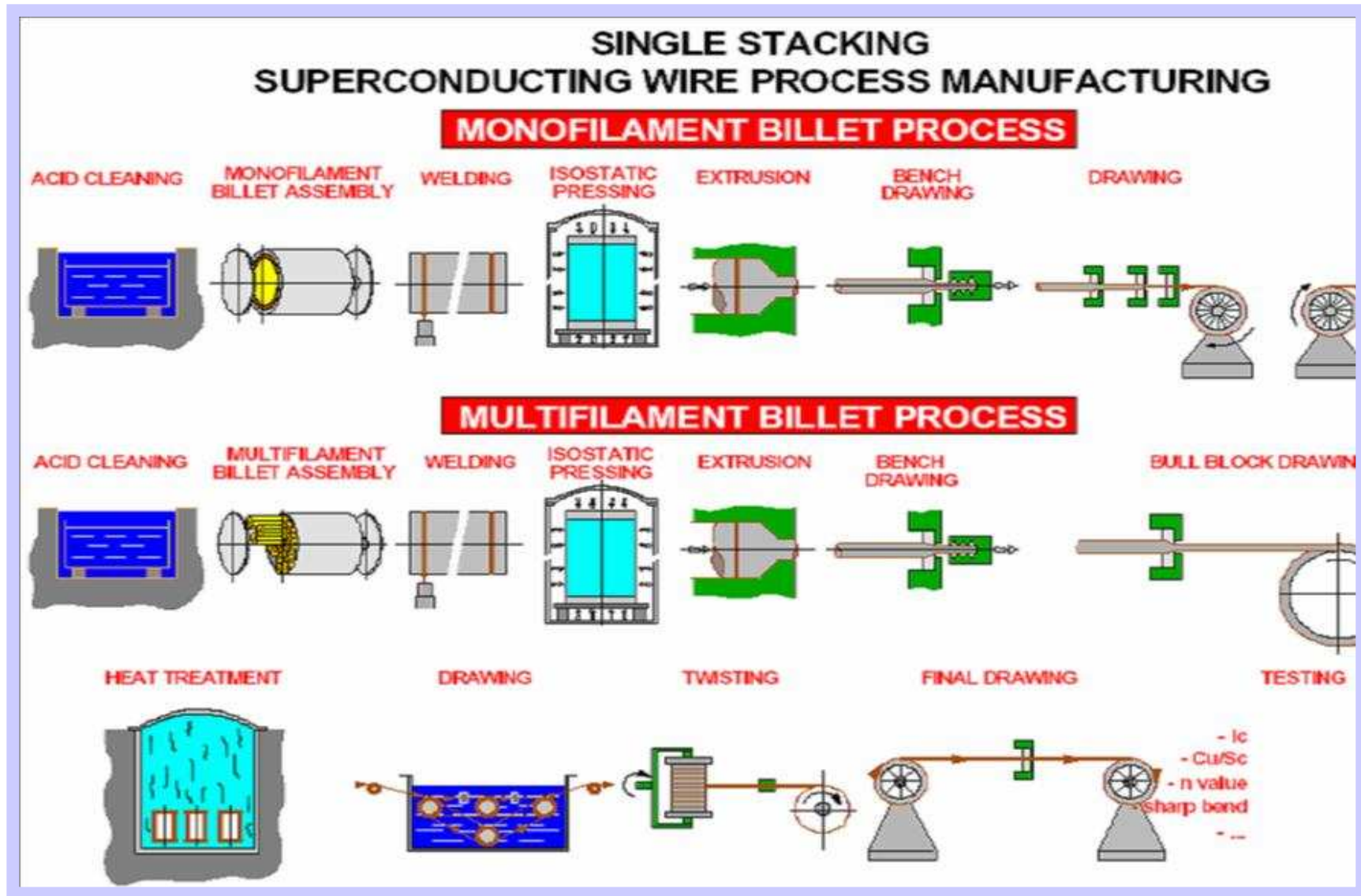
Conducteurs d'IRM-RMN



Wire in Channel

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





Production des cables SC

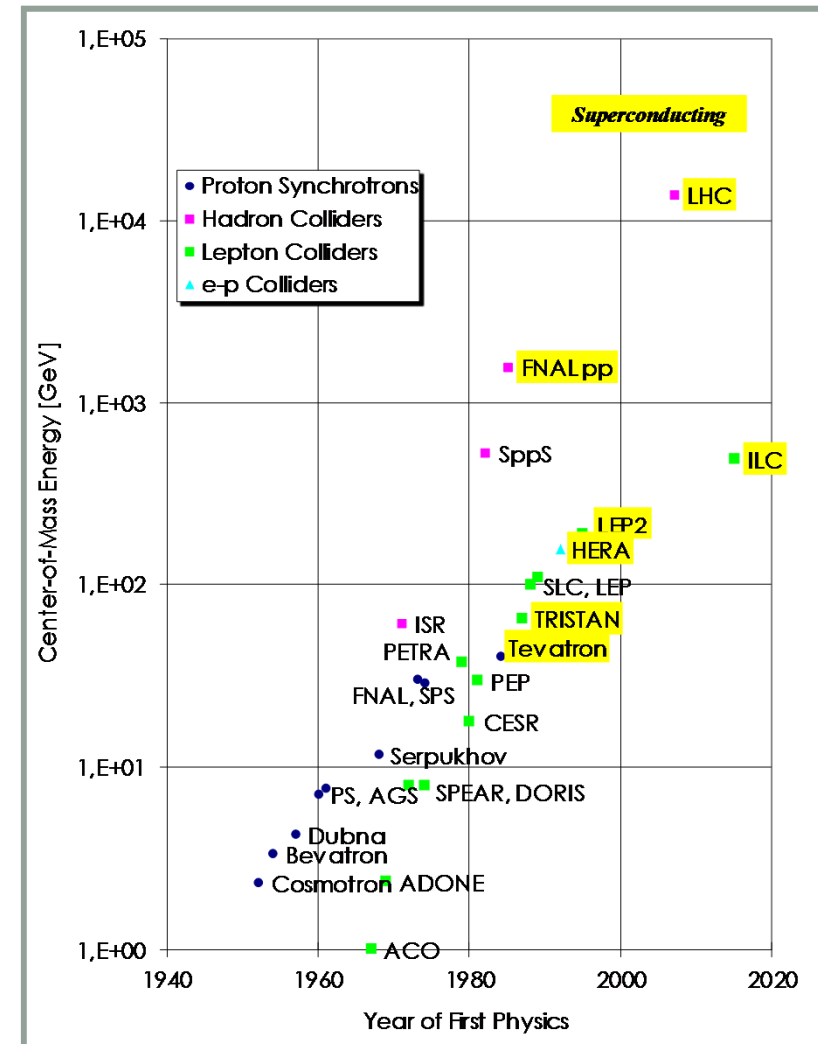


1. Brève Histoire de la Supraconductivité
2. Conducteurs supraconducteurs
 - ✓ Stabilité et Protection
 - ✓ Contraintes Mécaniques
 - ✓ Cryogénie
 - ✓ Exemples de conducteurs
3. **Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC**
 - ✓ Q-Pôles
 - ✓ CMS
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire
 - ✓ ITER
5. Aimants pour le médical
 - ✓ Neurospin

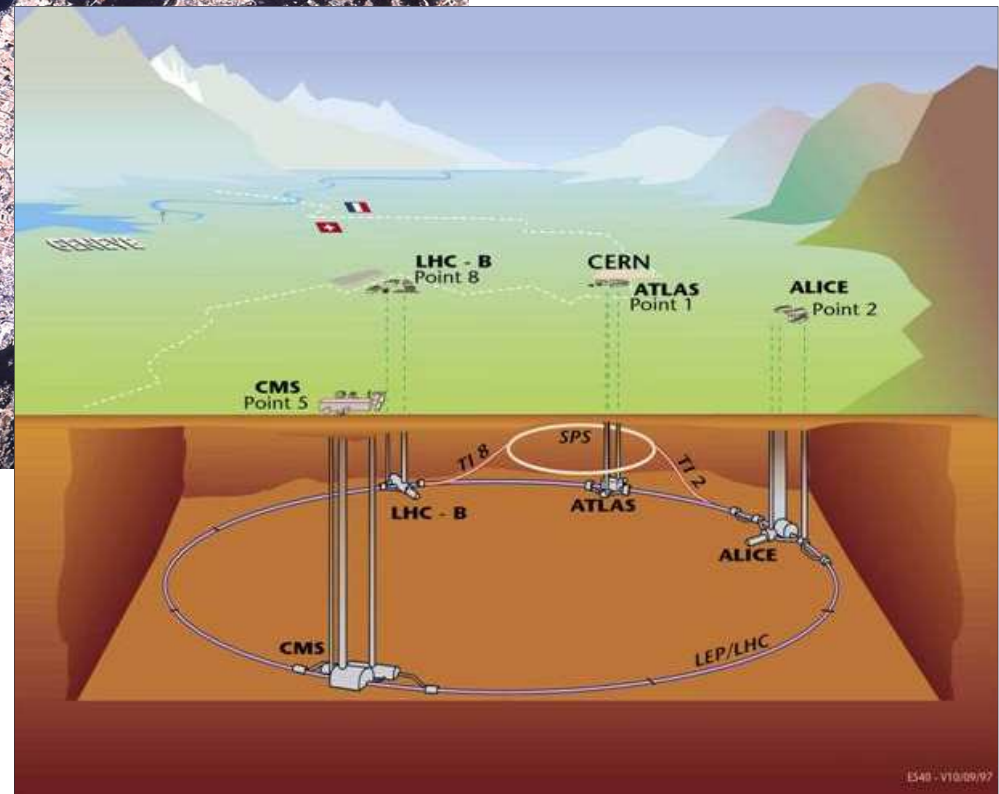
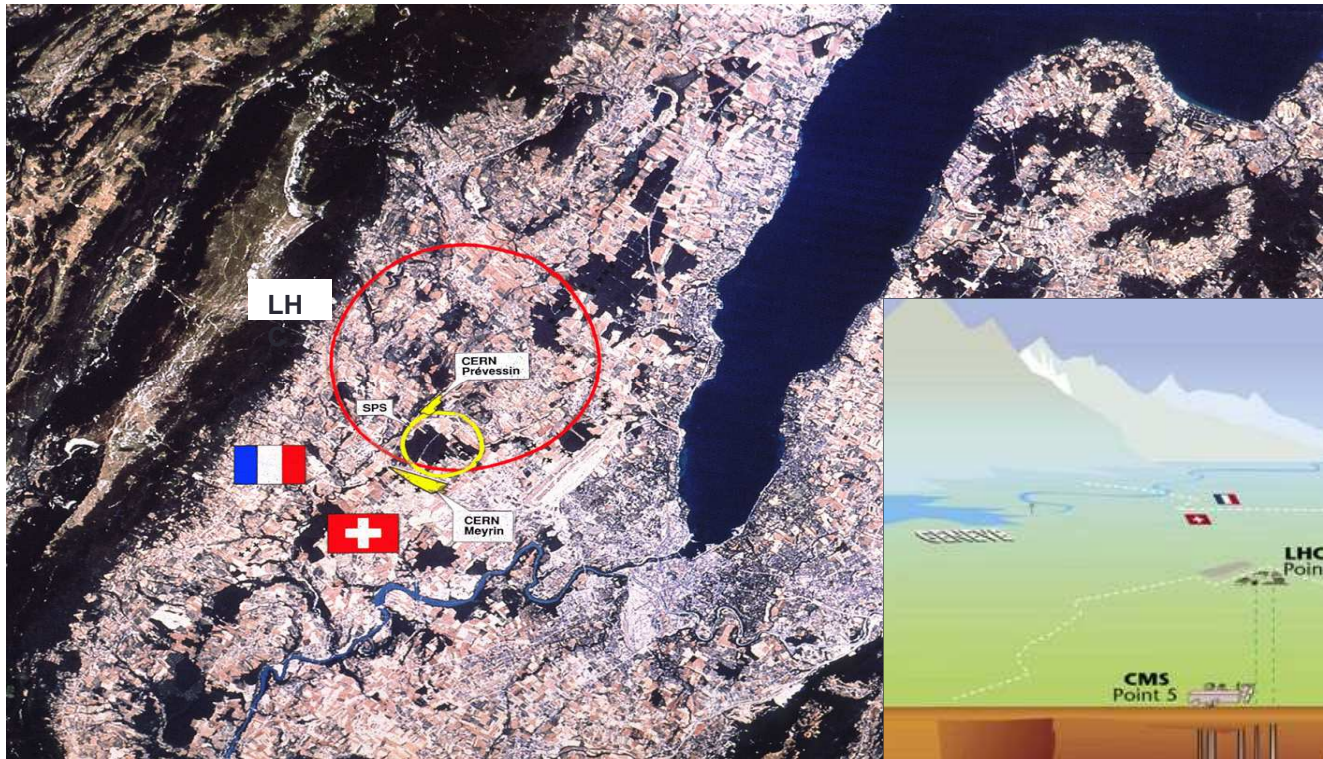
L'énergie des accélérateurs

Un développement exponentiel depuis les années 50.

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



Vue du LHC et de ses détecteurs



Supraconductivité et aimants d'accélérateurs

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

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

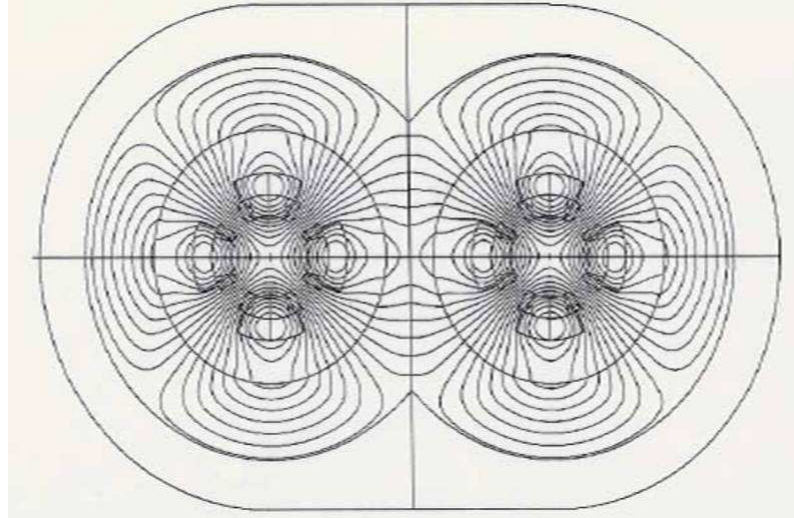
Pour le LHC $E = 7\,000\text{ Gev}$, $B = 8.33\text{ T}$, $r = 2\,800\text{ m}$

| | LHC actuel (aimants SC) | LHC à aimants résistifs |
|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| Champ magnétique | 8.3 T (propriétés NbTi) | 1.8 T (fer) |
| Circonférence | 27 km | 125 km |
| Puissance des aimants | 40 MW | 900 MW |
| Densité de courant | 400 A/mm² | 10 A/mm² |

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

1. Brève Histoire de la Supraconductivité
2. Conducteurs supraconducteurs
 - ✓ Stabilité et Protection
 - ✓ Contraintes Mécaniques
 - ✓ Cryogénie
 - ✓ Exemples de conducteurs
3. **Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC**
 - ✓ **Q-Pôles**
 - ✓ CMS
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire
 - ✓ ITER
5. Aimants pour le médical
 - ✓ Neurospin

Principaux composants des quadripôles LHC

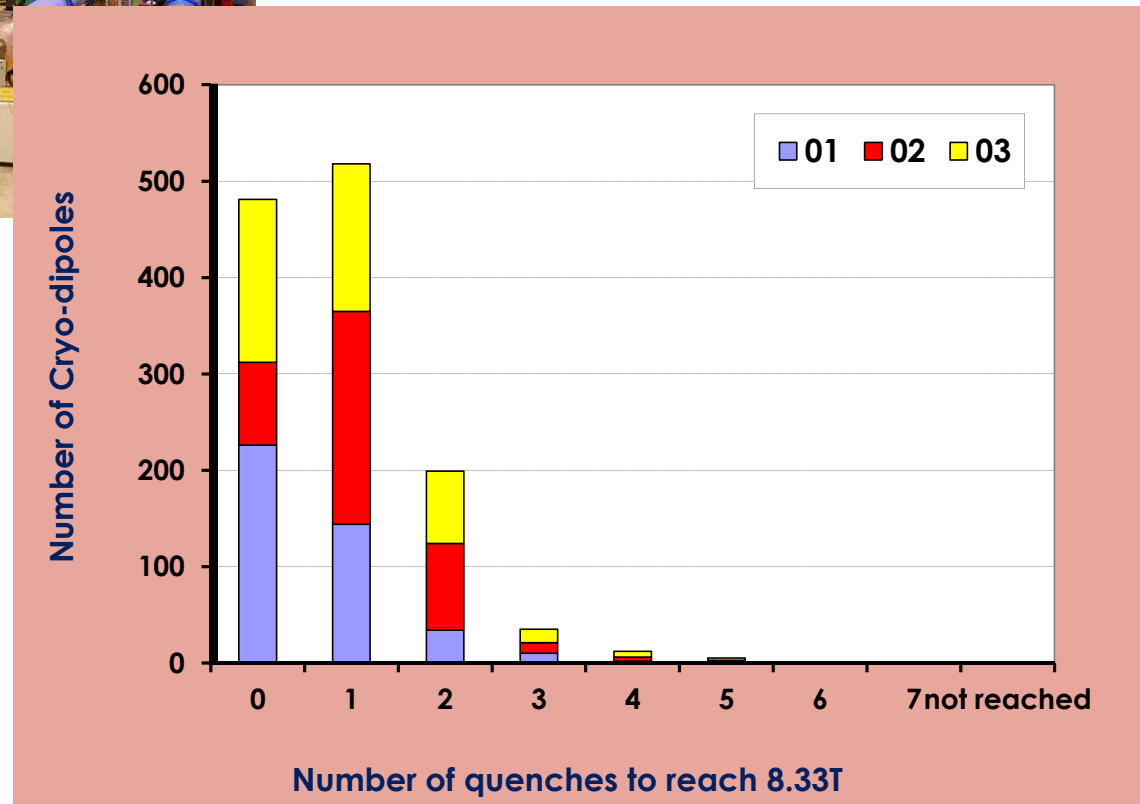


- ✓ Coupe transversale d'un quadripôle LHC,
- ✓ le circuit magnétique comprend deux ensembles frettés : une telle structure est appelée 2 en 1 (les faisceaux circulant en sens inverse dans chaque ouverture),
- ✓ les deux ouvertures ont un diamètre de 56 mm et une longueur d'environ 3 m,
- ✓ les bobines sont destinées à fonctionner en hélium superfluide à une température de 1.9 K. Dans la dernière version, le courant nominal est d'environ 12000 A pour un gradient de 220 T/m.

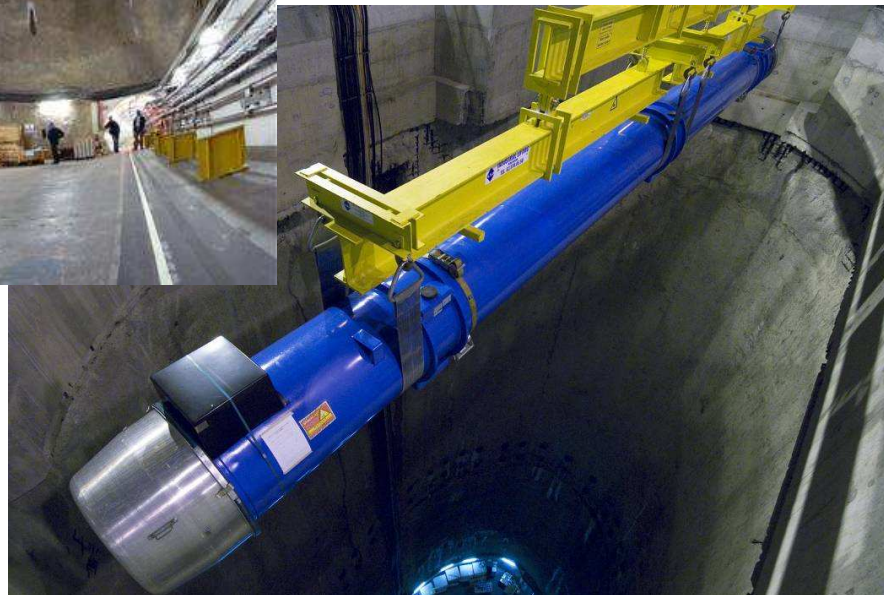
Fabrication industrielle



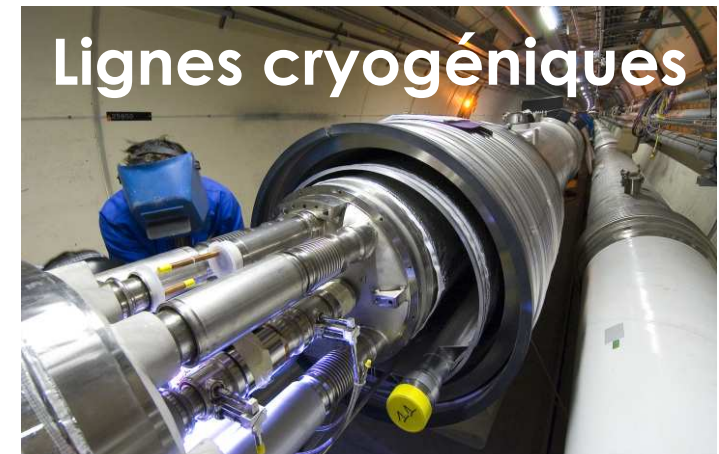
Tests-cryogéniques au CERN



Quadripôles LHC



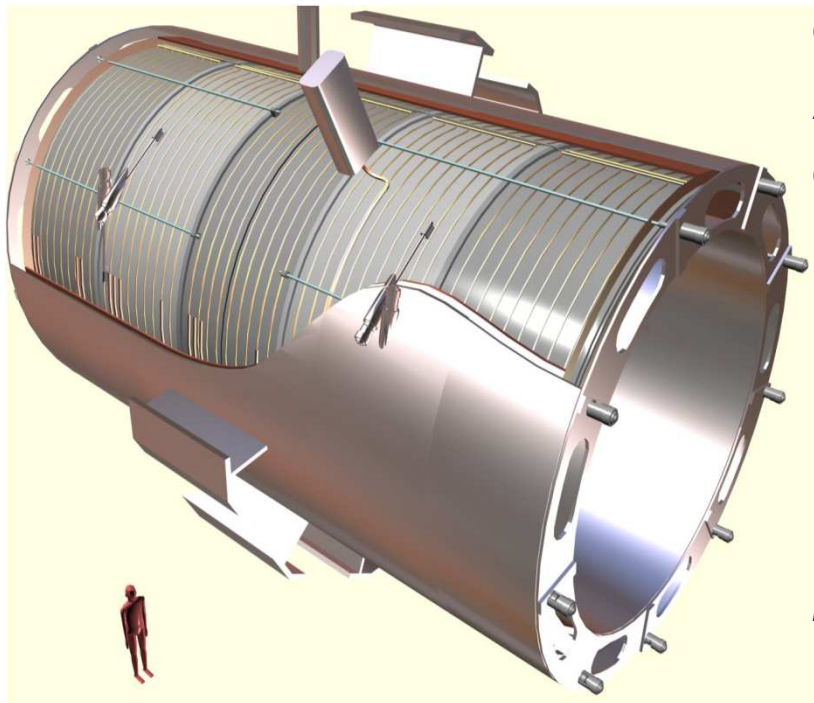
Jonctions électriques



Lignes cryogéniques

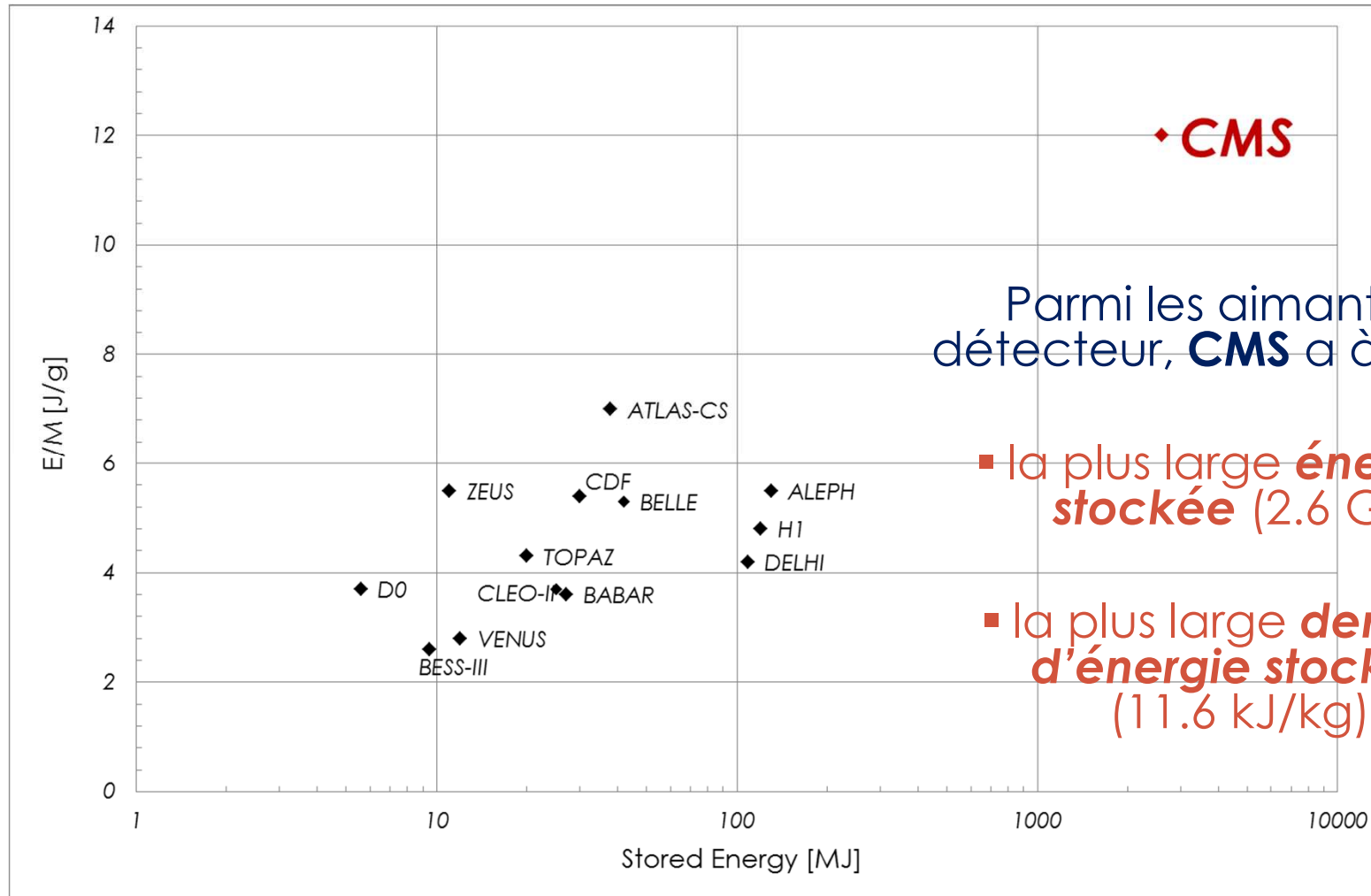
1. Brève Histoire de la Supraconductivité
2. Conducteurs supraconducteurs
 - ✓ Stabilité et Protection
 - ✓ Contraintes Mécaniques
 - ✓ Cryogénie
 - ✓ Exemples de conducteurs
3. **Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC**
 - ✓ Q-Pôles
 - ✓ **CMS**
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire
 - ✓ ITER
5. Aimants pour le médical
 - ✓ Neurospin

Solénoïde CMS (Compact Muon Solenoid)



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

Energie de CMS

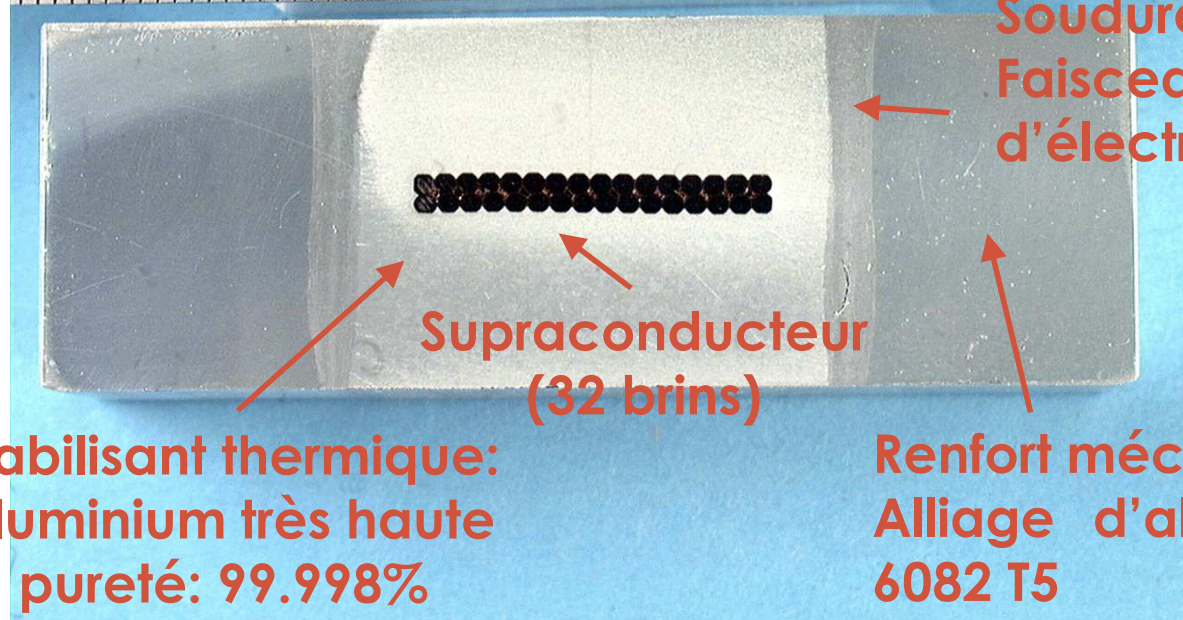
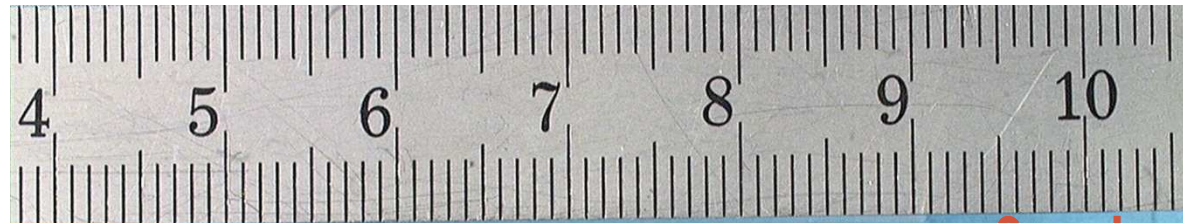


Parmi les aimants de détecteur, **CMS** a à la fois :

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

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

Solénoïde CMS

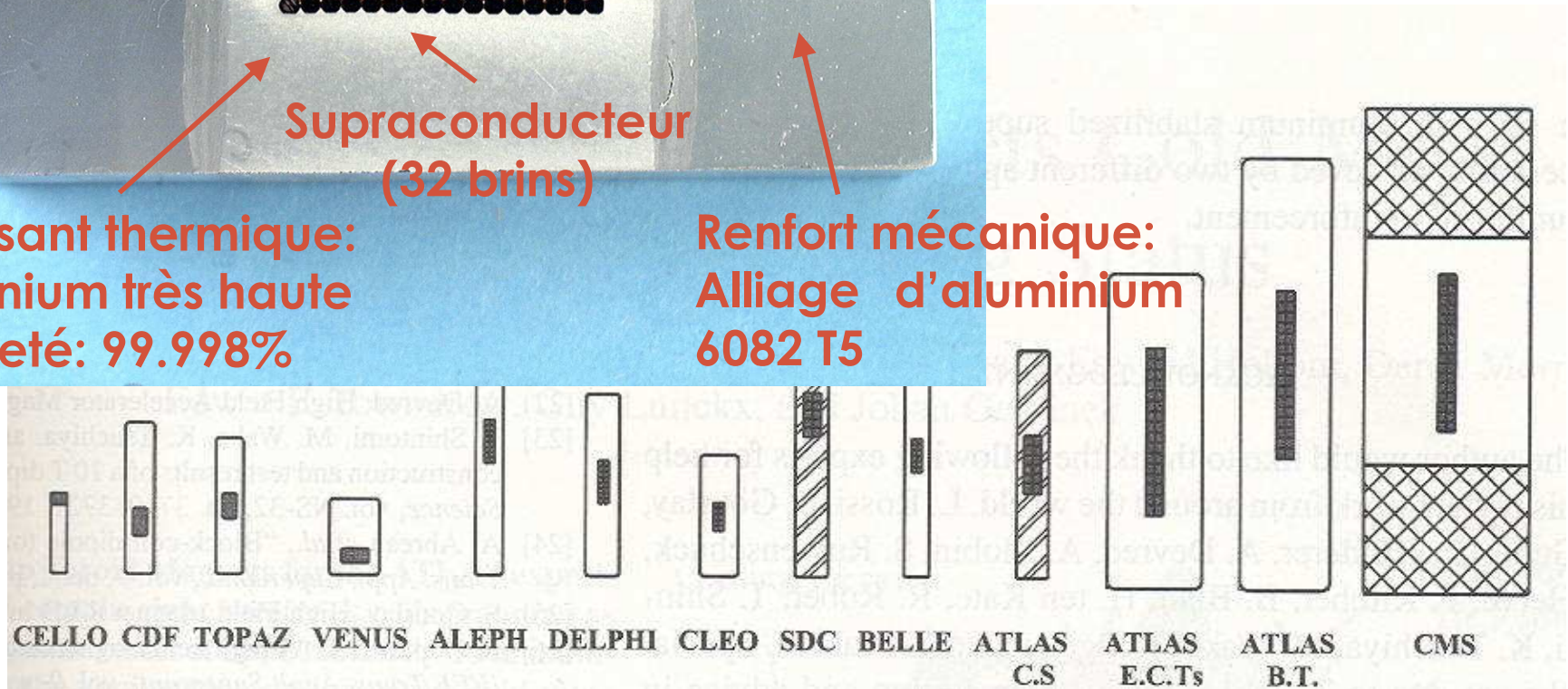


Soudure par Faisceau d'électron

Supraconducteur (32 brins)

Stabilisant thermique: Aluminium très haute pureté: 99.998%

Renfort mécanique: Alliage d'aluminium 6082 T5



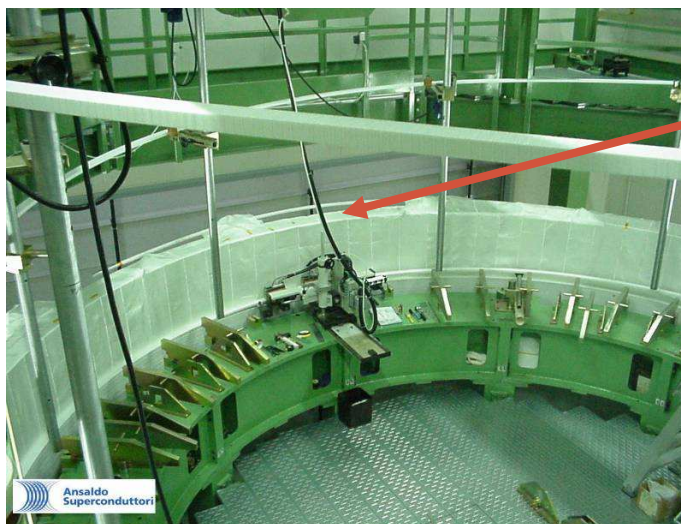
Réalisation des modules (fin juin 2004)



Polymérisation
CB-1



Finition
CB0

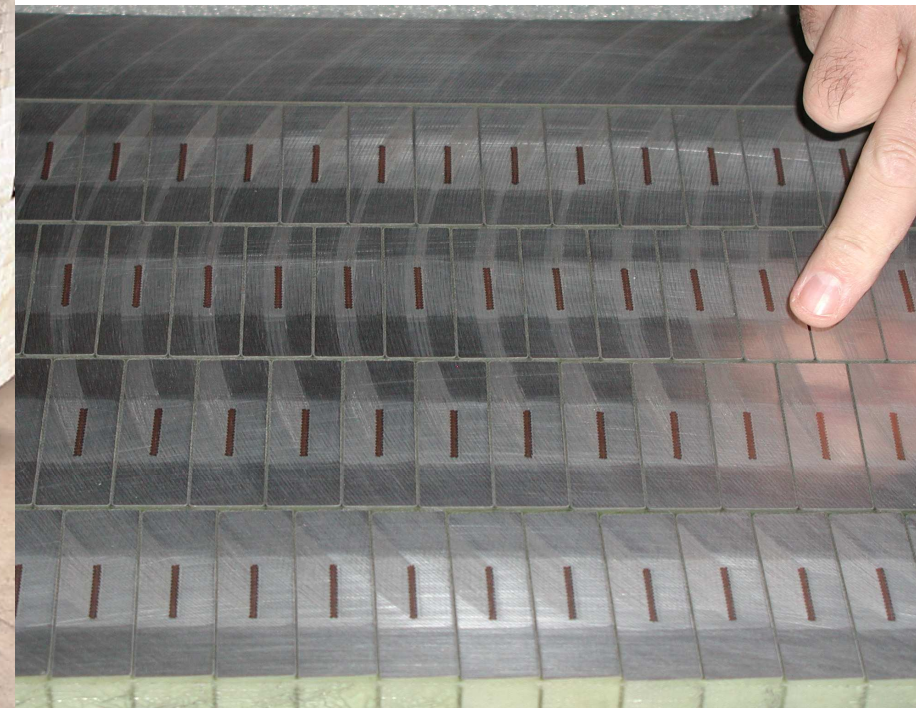


Bobinage
CB+1



Réalisation
cylindre
CB+2

Bobine prototype



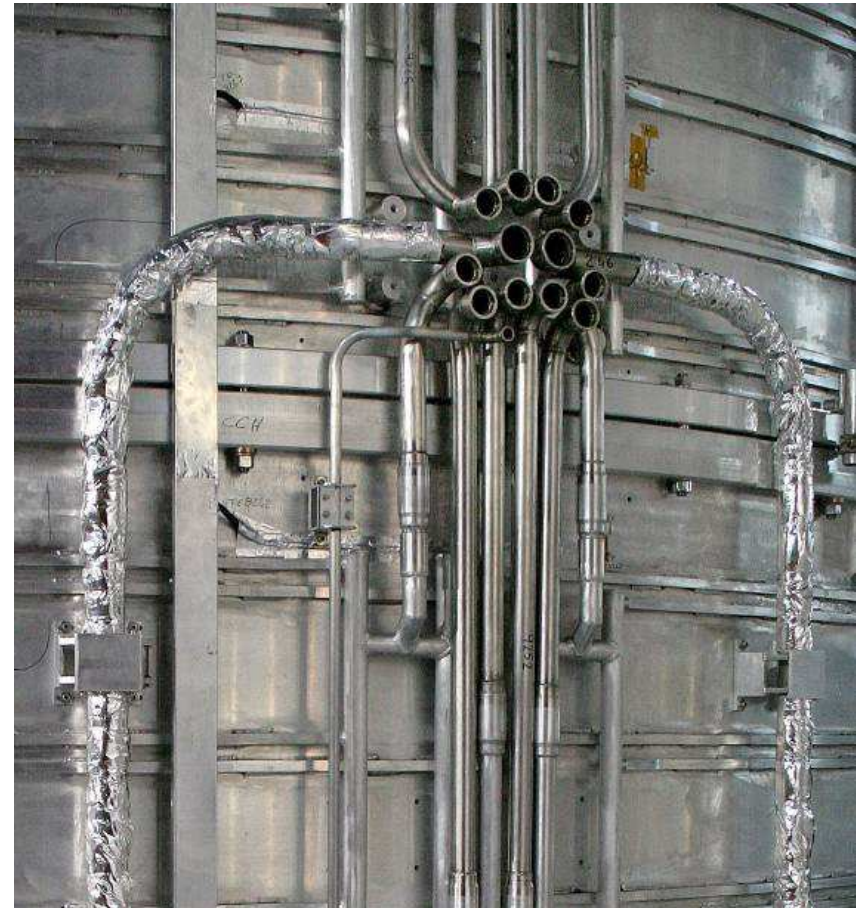
Assemblage de la bobine en vertical



**Permet en particulier un
couplage mécanique
précis**



Jonctions



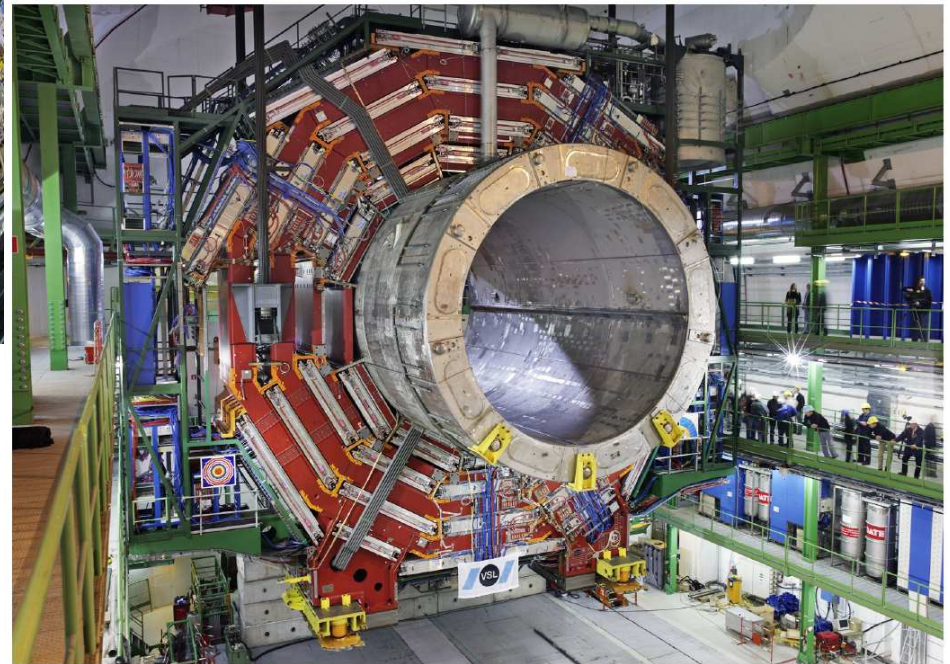
Retournement et insertion



Descente de la bobine en caverne



Début de la descente

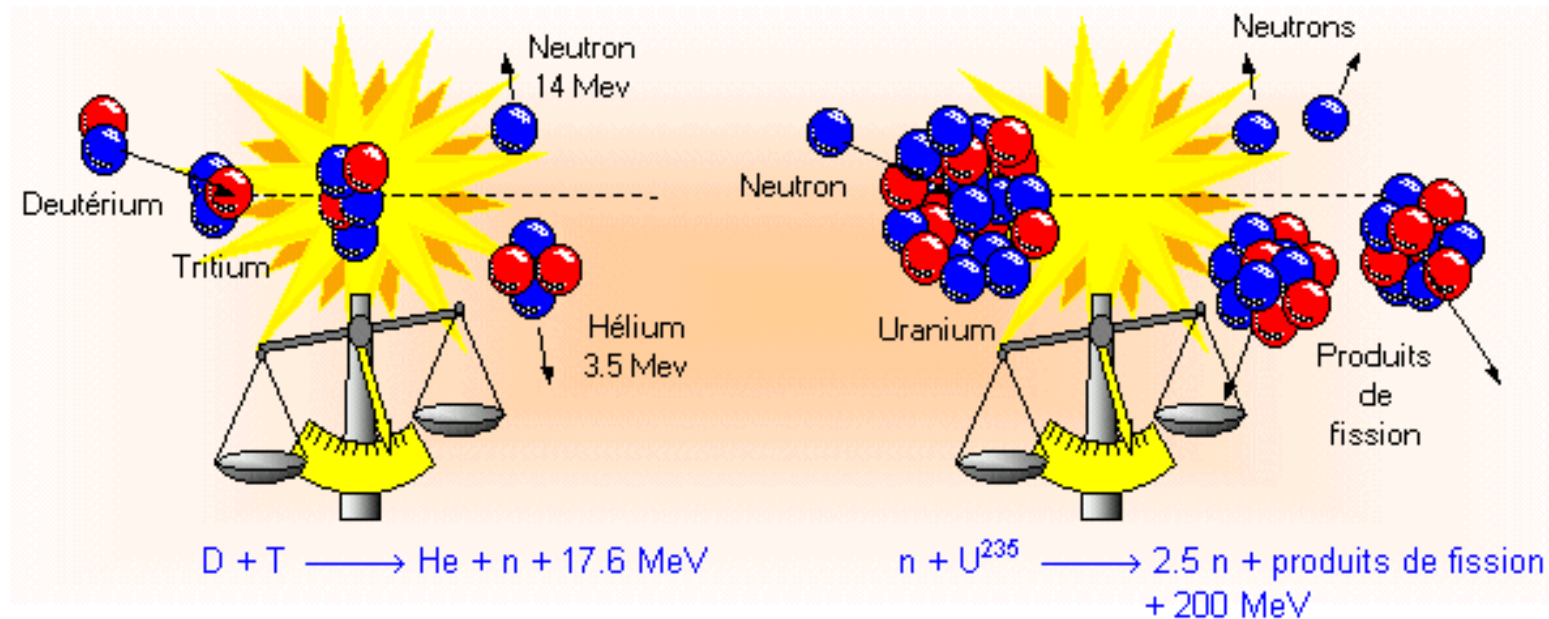


YB0 landing in the CMS experiment hall

Atterrissage en caverne
10 h après

1. Brève Histoire de la Supraconductivité
2. Conducteurs supraconducteurs
 - ✓ Stabilité et Protection
 - ✓ Contraintes Mécaniques
 - ✓ Cryogénie
 - ✓ Exemples de conducteurs
3. Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC
 - ✓ Q-Pôles
 - ✓ CMS
4. **Aimants pour la fusion thermonucléaire**
 - ✓ ITER
5. Aimants pour le médical
 - ✓ Neurospin

La Fusion thermonucléaire contrôlée



La Fusion thermonucléaire contrôlée

Point d'ignition, le plasma doit satisfaire trois conditions :

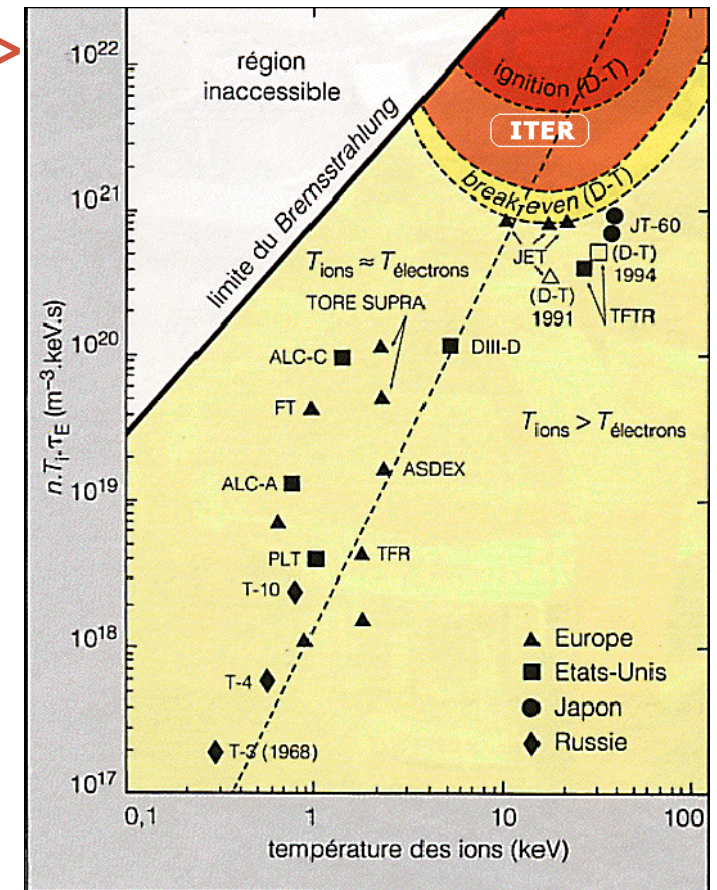
- Température (T) > 100-200 million de degré Celsius.
- Temps de confinement de l'énergie (t) >
- Densité (n_e) > $2-3 \times 10^{20}$ particules m^{-3}
(approx. 1/1000 gram m^{-3})

Critère de Lawson :

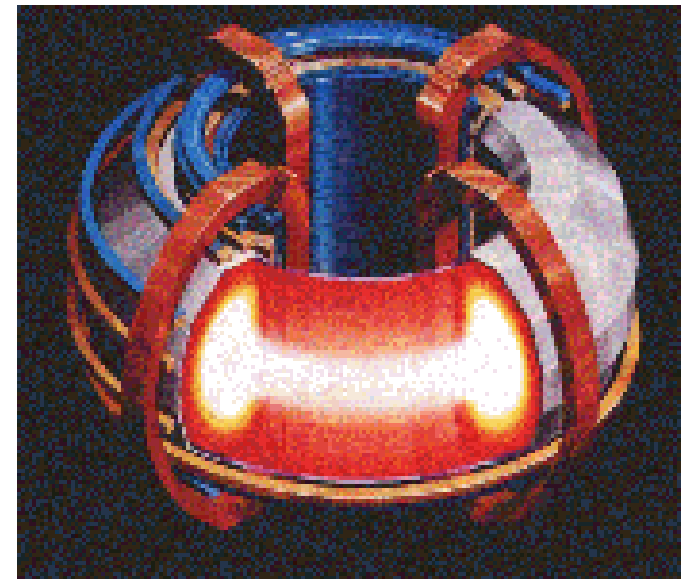
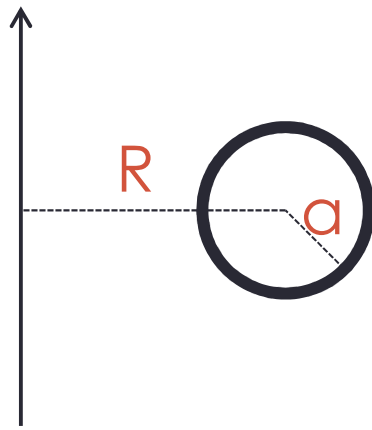
Le critère de Lawson présente les conditions qu'il faut réaliser pour faire s'entretenir la réaction de fusion D+T.

Ce maintien est assuré lorsque

$$n_e * T * t > 5 \times 10^{21} m^{-3}.keV.s$$



Paramètres importants



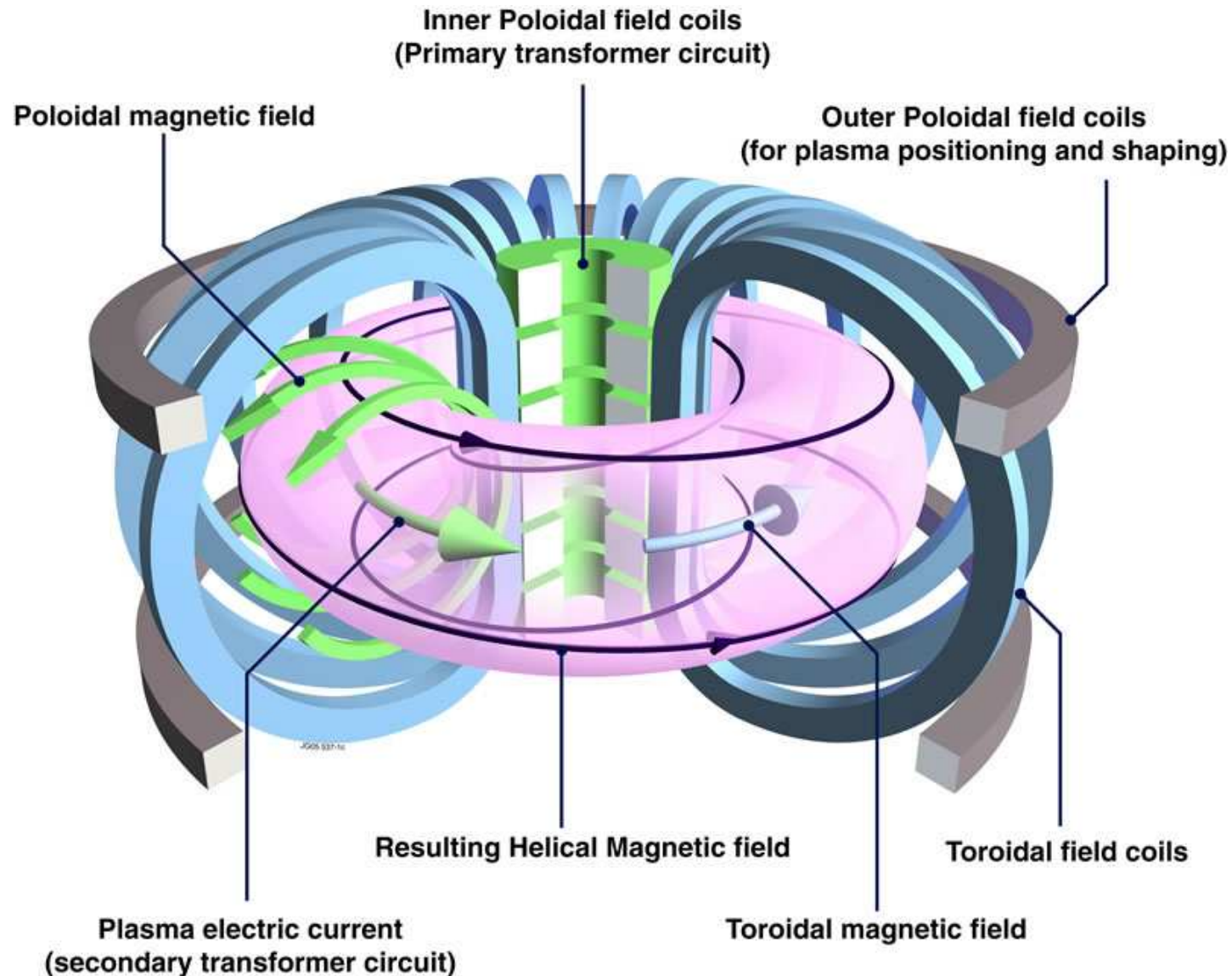
$$P_{\text{LH}} = 2.84 M^{-1} B_T^{0.82} n_e^{0.58} R a^{0.81}$$

(Puissance de fusion)

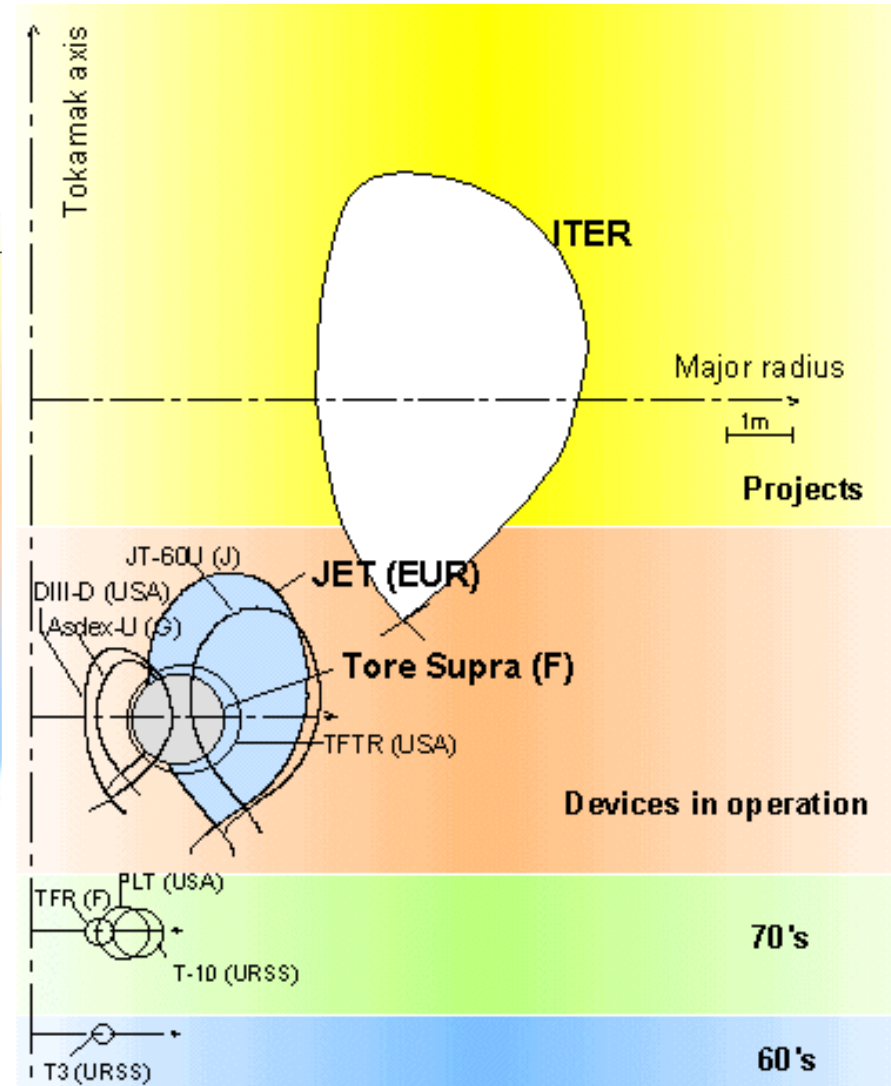
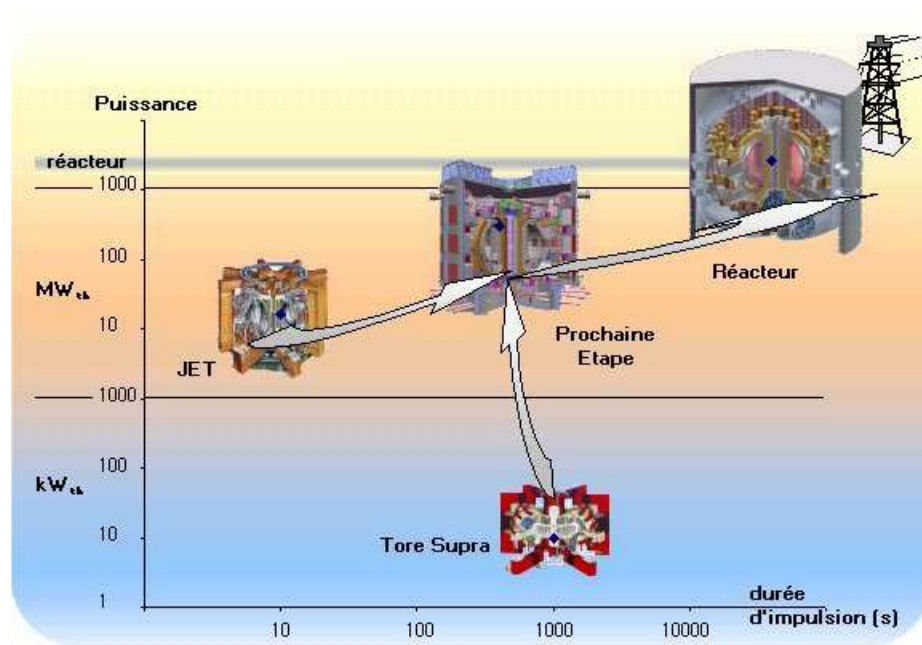
$$t_{\text{E,th}} = 0.0562 I_p^{0.93} B_T^{0.15} P^{-0.69} n_e^{0.41} M^{0.19} R^{1.97} e^{0.58} k_a^{0.78}$$

(Temps de confinement du plasma)

Machine de Fusion

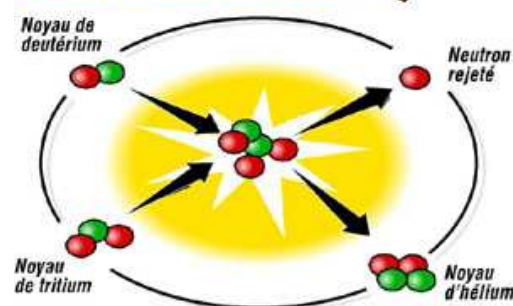
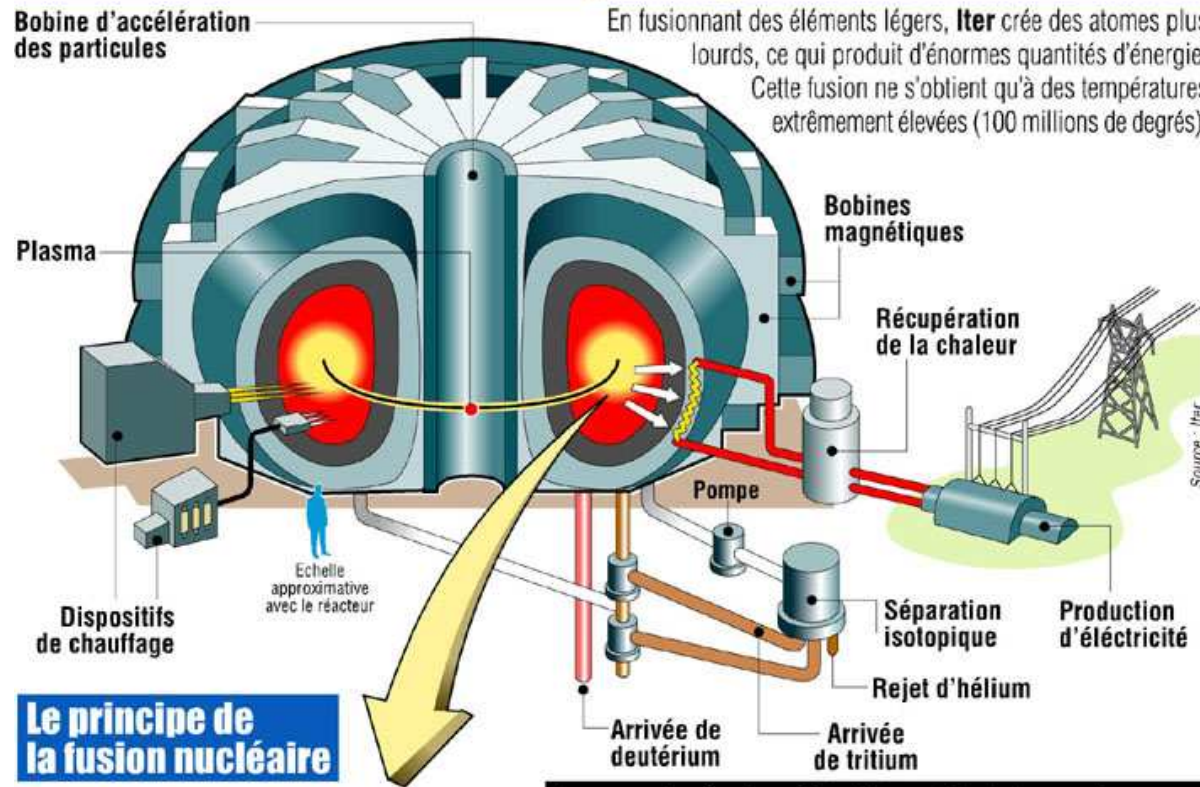


Les progrès de la Fusion



Principe d'une centrale à fusion

Comment ça marche ?



Le cœur du réacteur Tore Supra. C'est dans cet anneau que le gaz chauffé, appelé "plasma", est maintenu en suspension grâce à des électroaimants supraconducteurs

● Neutron ● Proton

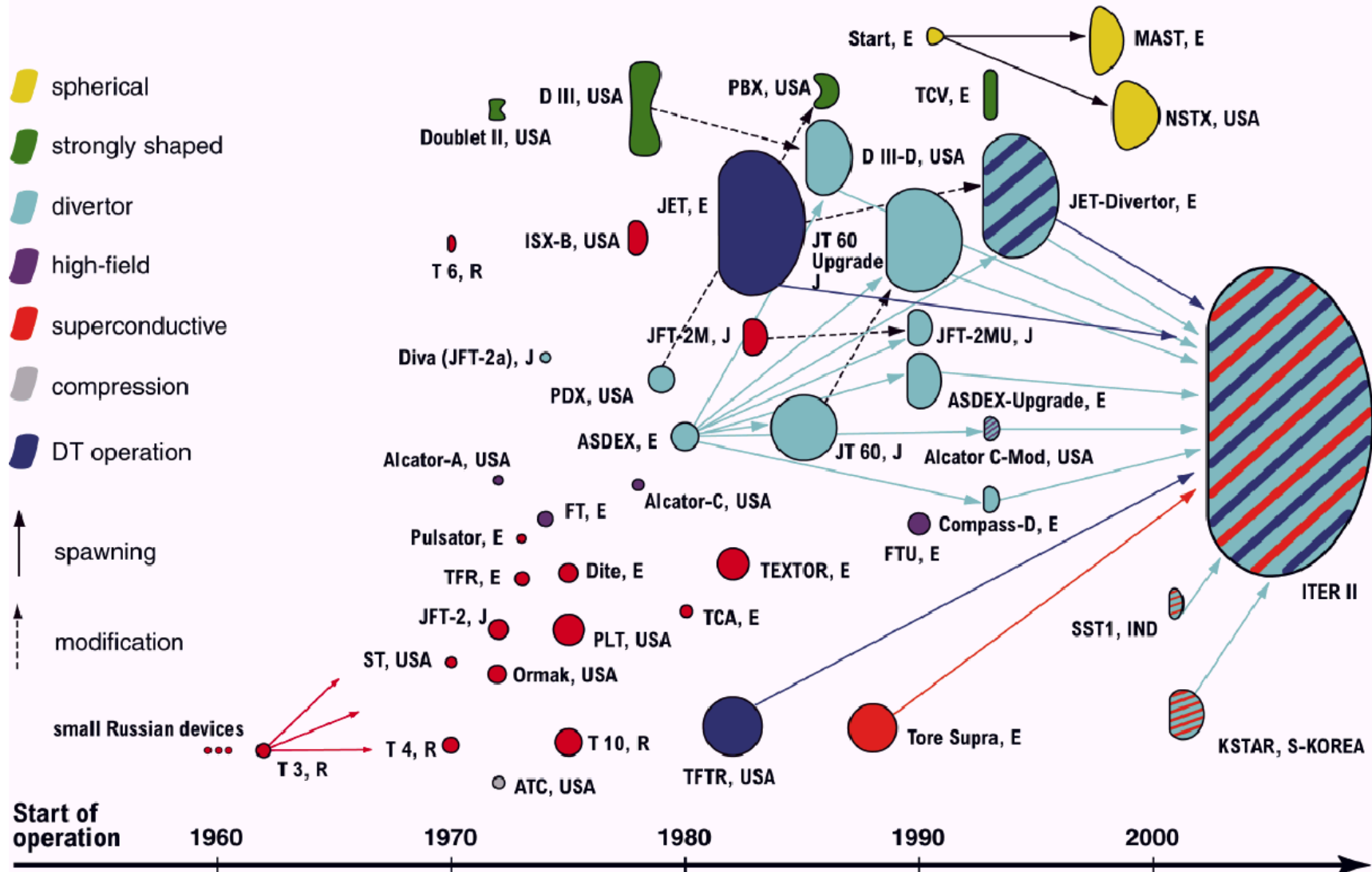
Le principe d'*Iter* sera de faire fusionner des noyaux de deutérium et de tritium, deux formes lourdes de l'hydrogène. Il en résulte une production d'hélium, de neutrons et une grande quantité d'énergie.

Source : Iter

1. Brève Histoire de la Supraconductivité
2. Conducteurs supraconducteurs
 - ✓ Stabilité et Protection
 - ✓ Contraintes Mécaniques
 - ✓ Cryogénie
 - ✓ Exemples de conducteurs
3. Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC
 - ✓ Q-Pôles
 - ✓ CMS
4. **Aimants pour la fusion thermonucléaire**
 - ✓ **ITER**
5. Aimants pour le médical
 - ✓ Neurospin

ITER, dernière marche avant...

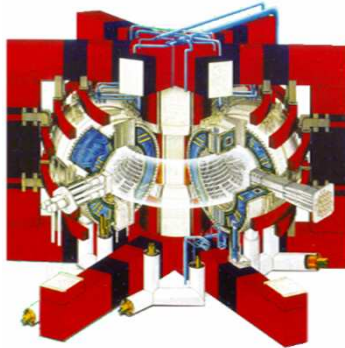
Mayor Tokamak Facilities



Fusion : nécessité des supraconducteurs

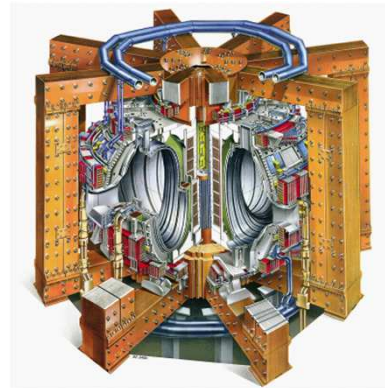
$$Q = P_{fus} / P_{inj}$$

Tore Supra
(partly SC)



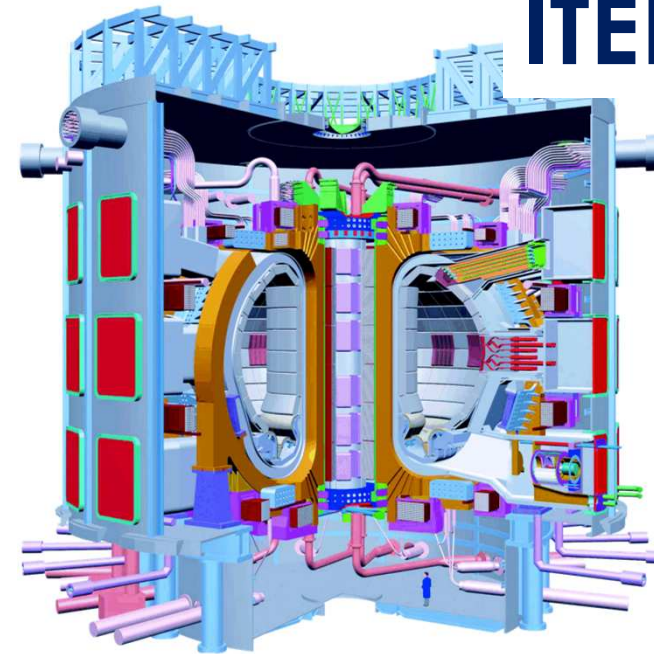
| | |
|----------------|-------------------|
| V_{plasma} | 25 m ³ |
| P_{fusion} | ~ 0 |
| t_{plasma} | ~ 400 s |
| I_{plasma} | 1.5 MA |
| $B_{Toroidal}$ | 4.2 T |
| Q | 0 |

JET (conv.)



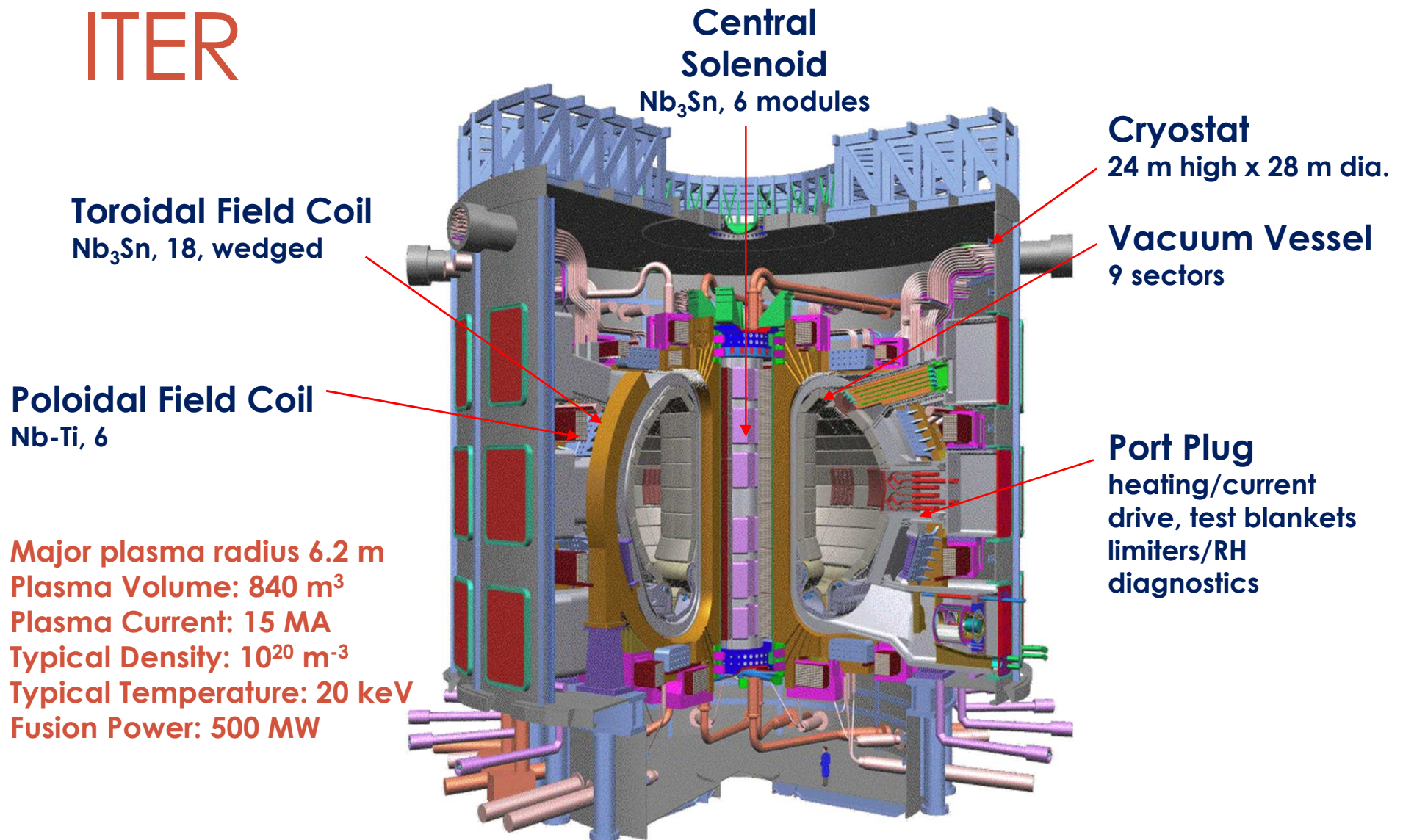
| | |
|----------------|-------------------|
| V_{plasma} | 80 m ³ |
| P_{fusion} | ~ 16 MW |
| t_{plasma} | ~ 30 s |
| I_{plasma} | 5 MA |
| $B_{Toroidal}$ | 3,5 T |
| Q | 0.002 |

ITER (SC)



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

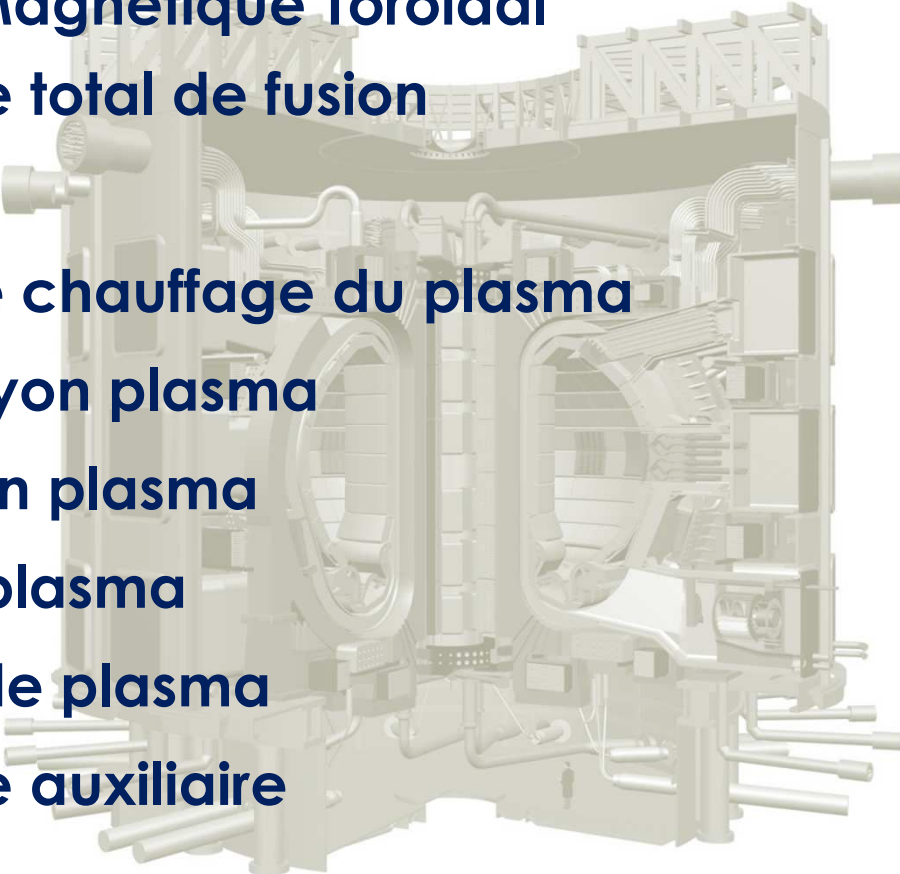
ITER



Major plasma radius 6.2 m
 Plasma Volume: 840 m³
 Plasma Current: 15 MA
 Typical Density: 10²⁰ m⁻³
 Typical Temperature: 20 keV
 Fusion Power: 500 MW

Machine mass: 23350 t (cryostat + VV + magnets)
 - magnet systems: 10150 t; cryostat: 820 t

Paramètres du plasma d'ITER

- 
- ✓ **Champ Magnétique Toroidal** 5,3 T
 - ✓ **Puissance total de fusion** 500 W
 - ✓ **Q** > 10
 - ✓ **Temps de chauffage du plasma** > 400 s
 - ✓ **Grand rayon plasma** 6,2 m
 - ✓ **Petit rayon plasma** 2 m
 - ✓ **Courant plasma** 15 MA
 - ✓ **Volume de plasma** 837 m³
 - ✓ **Puissance auxiliaire** 73 MW

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 MA \cdot t**
- ❖ Courant nominal **68 000 A**
- ❖ Énergie stockée **41 GJ**
- ❖ Force de recentrage/bobine **403 MN**
- ❖ Force verticale/bobine **408 MN**
- ❖ Constante de décharge **11 s**
- ❖ Poids **5362 tonnes**



1. Brève Histoire de la Supraconductivité
2. Conducteurs supraconducteurs
 - ✓ Stabilité et Protection
 - ✓ Contraintes Mécaniques
 - ✓ Cryogénie
 - ✓ Exemples de conducteurs
3. Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC
 - ✓ Q-Pôles
 - ✓ CMS
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire
 - ✓ ITER
5. **Aimants pour le médical**
 - ✓ Neurospin

Aimants d'IRM et RMN

Spectroscopie RMN pour les applications chimiques, biochimique et pharmaceutiques,

Imagerie IRM pour la médecine et la recherche médicale

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

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

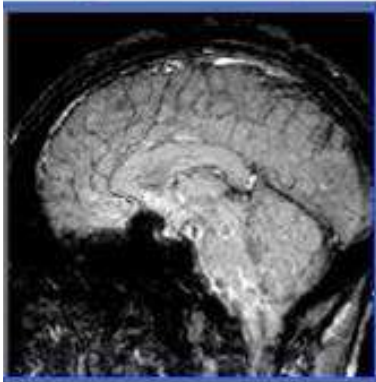
$\Rightarrow 42.77 \text{ MHz/T}$ pour le proton

La qualité du signal RMN est relié :

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

Influence de la valeur du champ – IRM

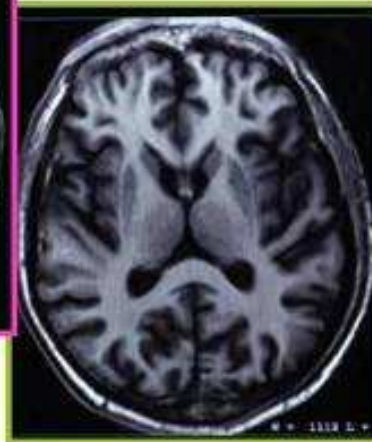
0.23 T



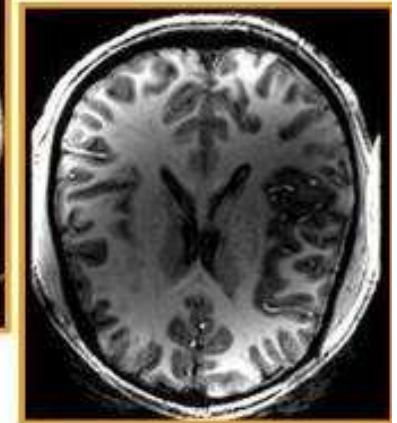
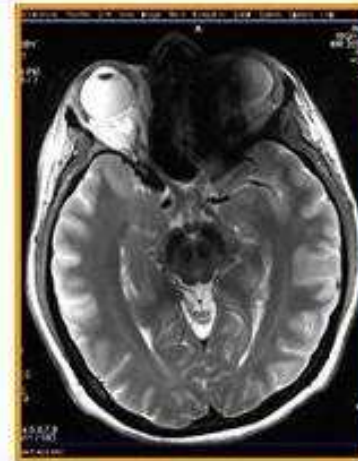
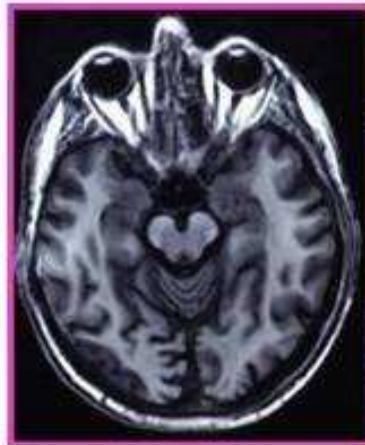
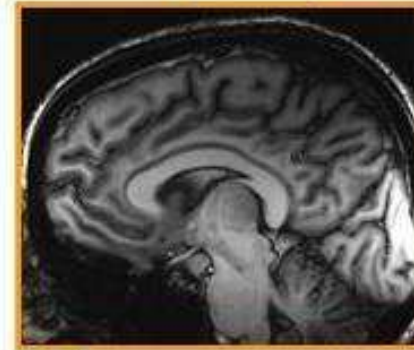
1.5 T



3 T

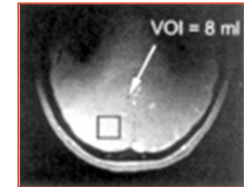


7 T



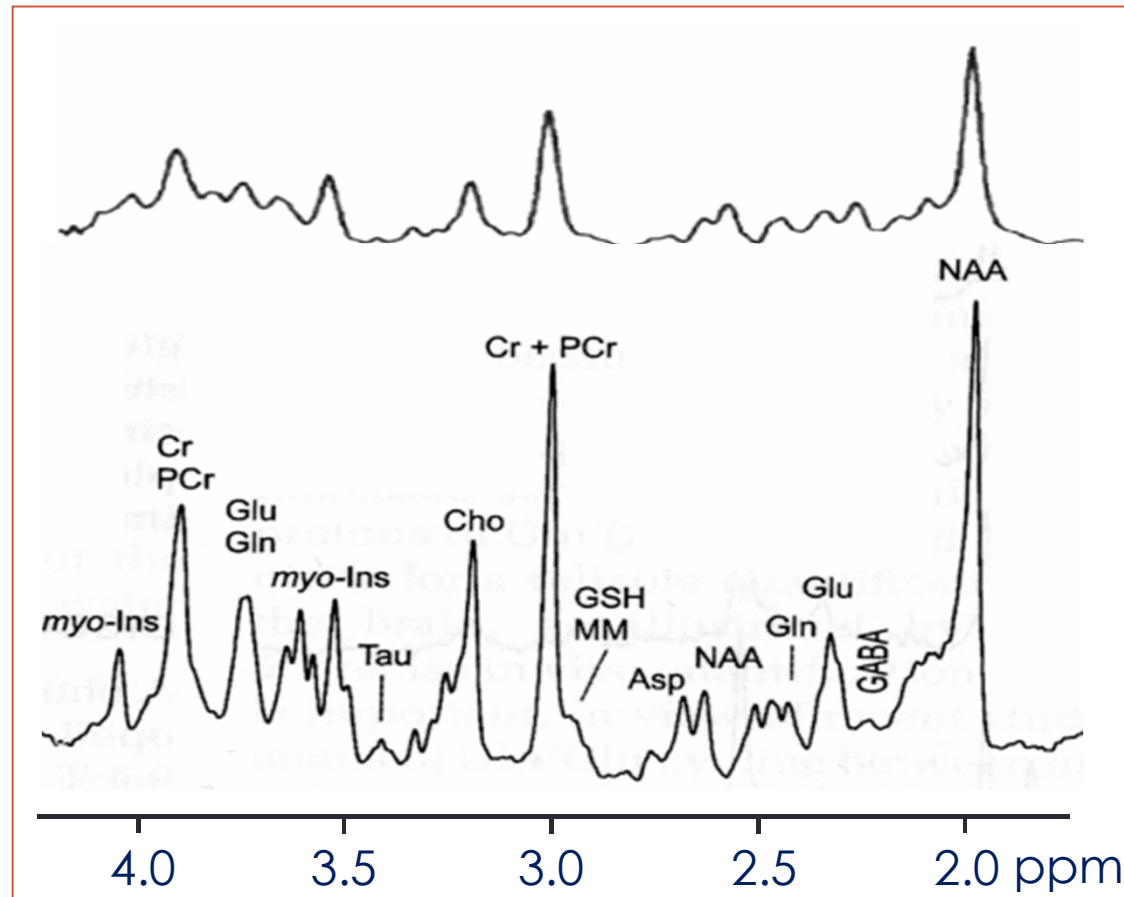
Résolution spectrale - RMN

Spectroscopie RMN ^1H dans le cerveau humain :



2 Tesla :
 (Frahm et al.)

7 Tesla :
 (Tkac et al.)



Caractéristiques d'un système IRM

La **résonance du proton** est utilisé.

Le diamètre utile est supérieur à 500 mm (-> 900 mm) pour permettre l'imagerie d'un corps entier \Rightarrow homogénéité de champ $\Delta B/B_0 \cong 10^{-4} - 10^{-6}$ sur un DSV de 500 mm.

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

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

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

Consommation réduite d'He grâce à l'emploi de cryocooler: 80-100 cm³ He/heure.

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

L'IRM demain: vers les *Très Hauts Champs*

Repousser les limites physiques :

résolution spatiale, temporelle, spectrale

Scanners IRM **médicaux**: 0,1-1,5 tesla

Scanners « **recherche** »: 3 – 5 tesla

Scanners « **très haut champ** » : 7 tesla et plus



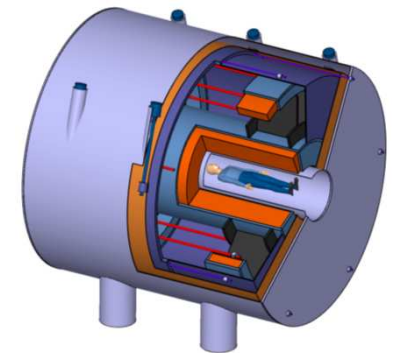
Aimant 1.5T (GE) du SHF/CEA



Aimant 3.0T (Bruker)
du SHFJ



Aimant 9.4 T GE 600 mm
(USA)



B0 11.7 T

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

1. Brève Histoire de la Supraconductivité
2. Conducteurs supraconducteurs
 - ✓ Stabilité et Protection
 - ✓ Contraintes Mécaniques
 - ✓ Cryogénie
 - ✓ Exemples de conducteurs
3. Aimants d'accélérateurs et détecteurs : le LHC
 - ✓ Q-Pôles
 - ✓ CMS
4. Aimants pour la fusion thermonucléaire
 - ✓ ITER
5. **Aimants pour le médical**
 - ✓ **Neurospin**

Centre NEUROSPIN

Maîtrise d'ouvrage : Direction des Sciences du Vivant (cea)

Projet 2002-2007

Collaboration interne **DSV - DSM/IRFU** (conception aimants, gradients, antennes, gestion de projet) et **CEA-Saclay** (réalisation du bâtiment)

Situé à **Saint-Aubin** sur le centre de Saclay

Environ **150 chercheurs à terme** (50% permanents)

Centre européen avec accueil de groupe étrangers

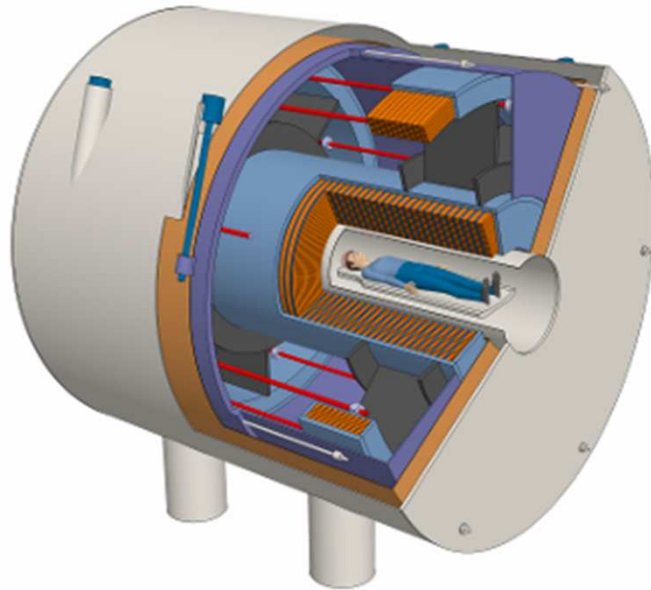
Equipement de **4 Imageurs/Spectrographes R.M.N**

Recherche clinique **3T 7T 11,75T**

Recherche Pré-clinique **17T**



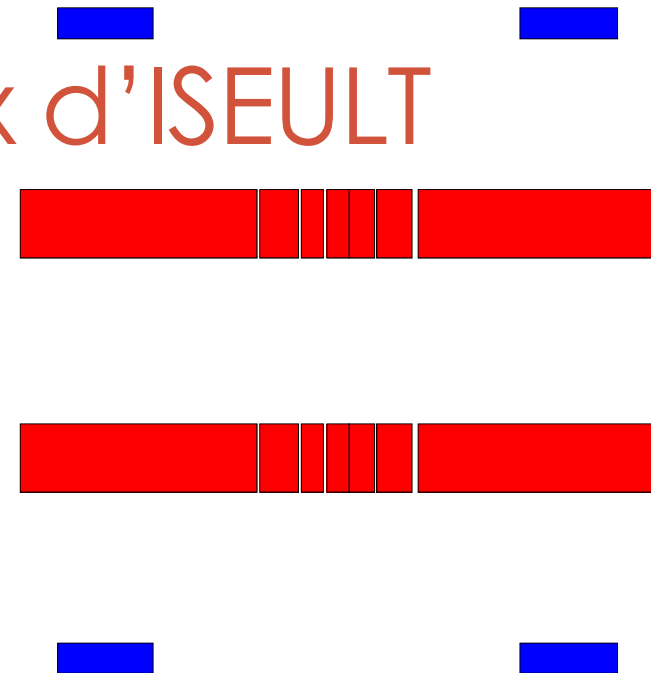
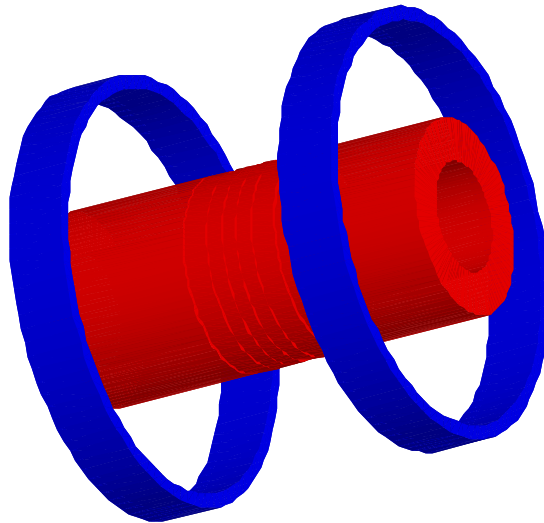
ISEULT



| | |
|--|--|
| B0 | 11.75 T horizontal |
| Supraconducteur | NbTi |
| Diamètre interne | ≥ 90 cm |
| Dérive | ≤ 0.05 ppm/h |
| Homogénéité | ≤ 0.25 ppm/25 cm dsv ≤ 0.10 ppm/10 cm dsv |
| Champ de fuite axial/radial | 5 G : 9.6 m / 5.1 m 1 G : 14.2 m / 8.8 m |

ISEULT : un aimant produisant un champ de **11,75 T** homogène spatialement et stable dans le temps dans un diamètre de **900 mm**.

Paramètres principaux d'ISEULT



| | |
|---|--------------------------|
| Stored Energy | 298 MJ |
| Operating current | 1411 A |
| Critical current on the load line | 1534 A |
| Temperature margin | 1 K |
| Winding volume (Cable + Hell + Spacers) | 9.7 m³ |
| Winding pack length | 4.m |
| Winding inner diameter | 1.m |
| Winding outer diameter | 4.m |
| Current density inside winding | 28 A/mm ² |
| Estimated magnet weight | 150 tons |

Blindage actif et homogénéité

