

INTRODUCTION A LA CRYOGENIE ET LA SUPRACONDUCTIVITE

FLUIDES CRYOGENIQUES
DIAGRAMME DE PHASE
PROPRIETES USUELLES
SUPRACONDUCTIVITE
DOMAINE SUPRACONDUCTEUR
EXEMPLES

TECHNIQUES DU VIDE

NOTIONS GENERALES
OBTENTION - GAMMES
EXEMPLES DE MATERIEL
ETANCHEITE

CRYOGENIE II

PROPRIETES DES MATERIAUX
THERMIQUE, MECANIQUE, ELECTRIQUE
TRANSFERTS THERMIQUES
MISE EN OEUVRE DES BASSES TEMPERATURES
Séquence : Cryogénie Argon H1

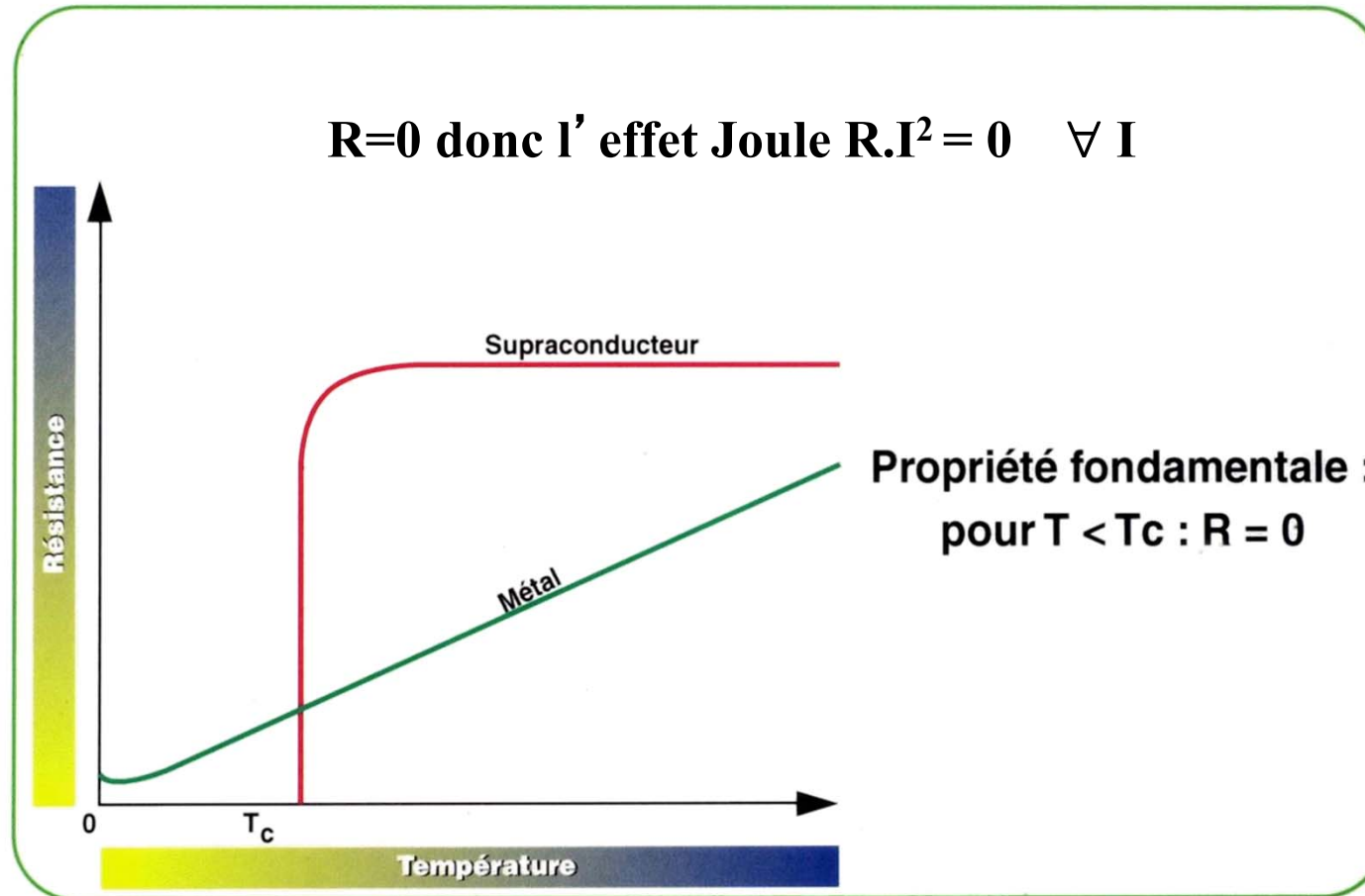
SUPRACONDUCTIVITE II

DETAILS SUR L'ETAT SUPRACONDUCTEUR
EXEMPLES DES CABLES SUPRA POUR AIMANTS
Séquence : Quadrupôle HERA

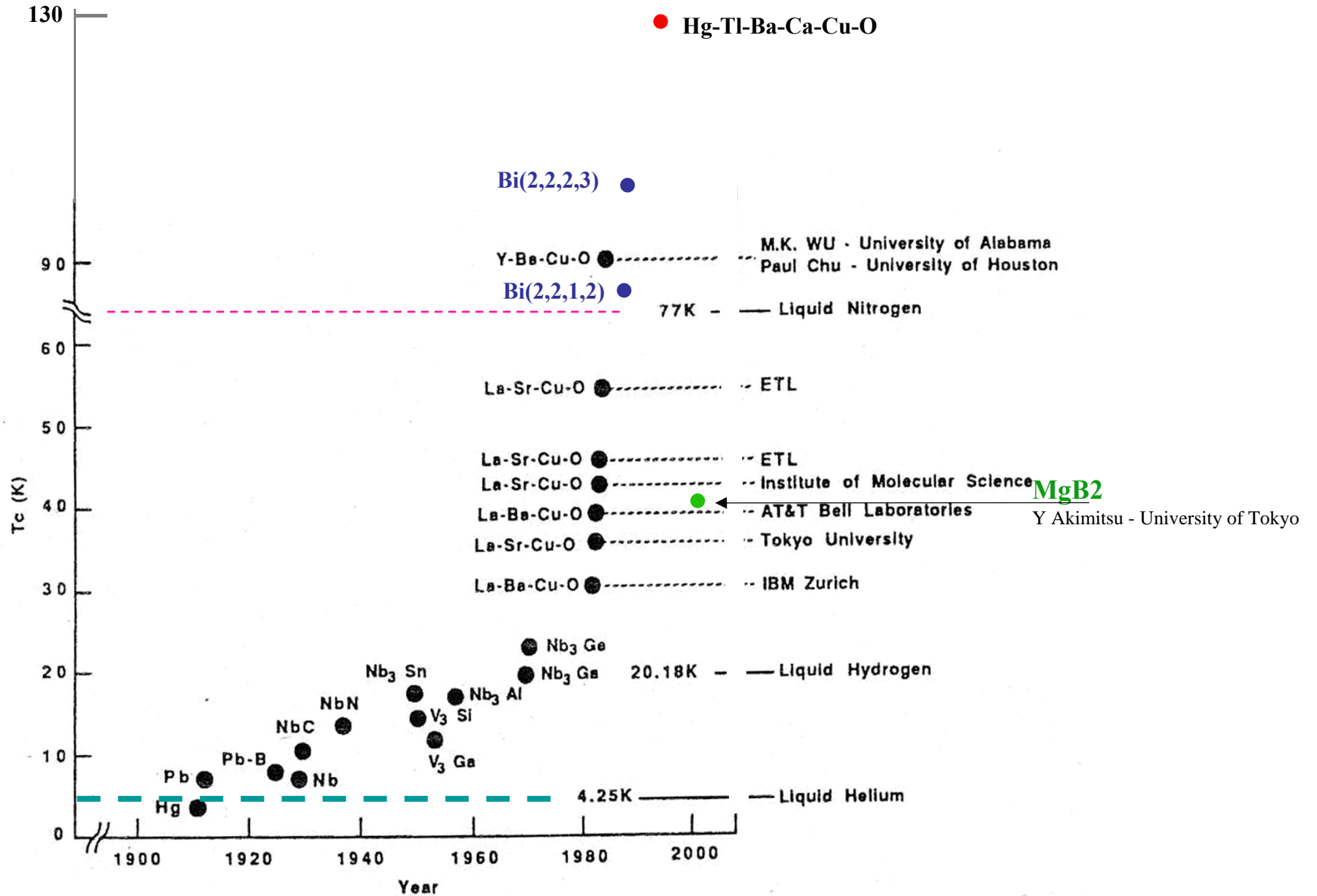
La supraconductivité

Applications aux aimants et cavités

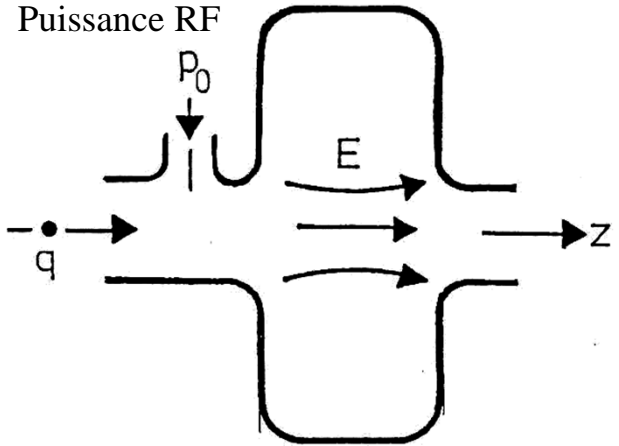
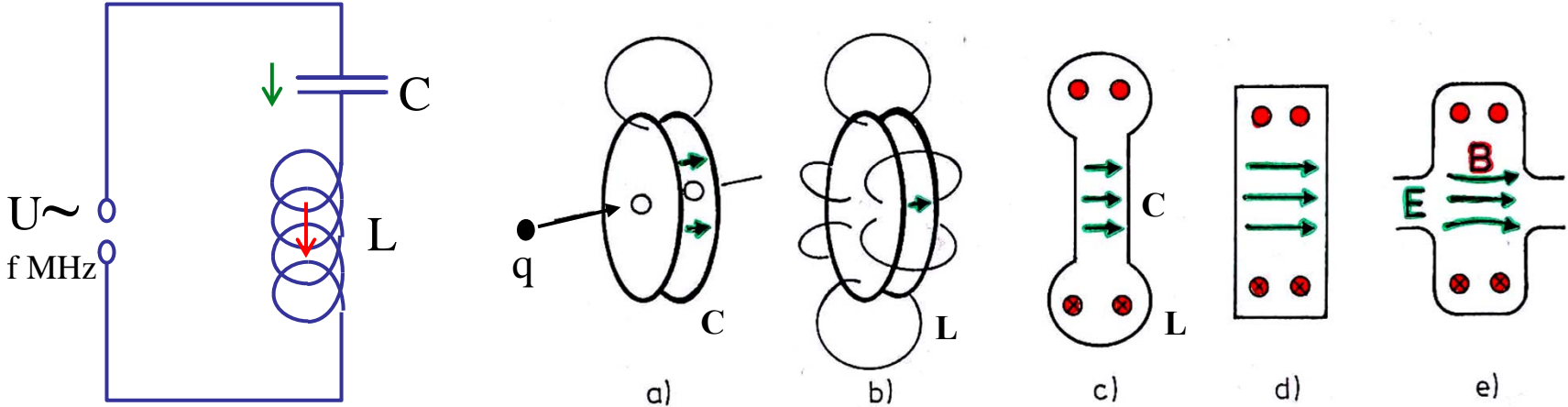
La supraconductivité



Développements actuels



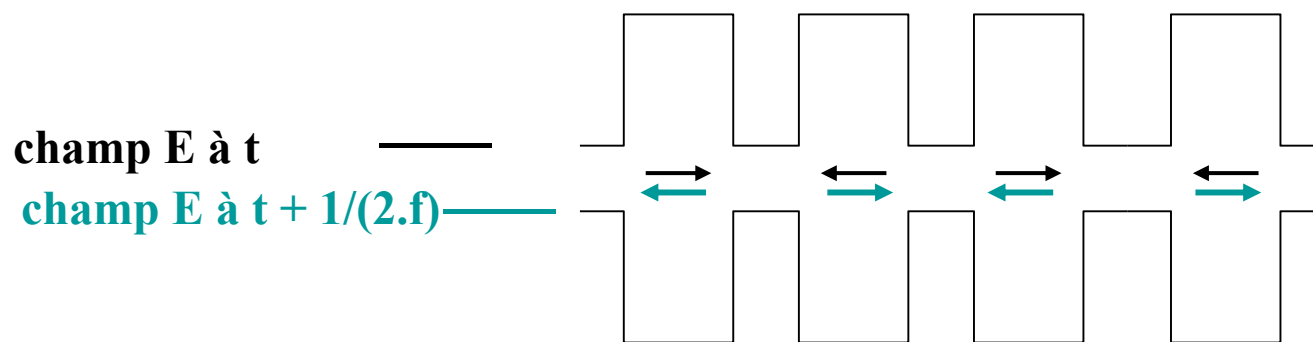
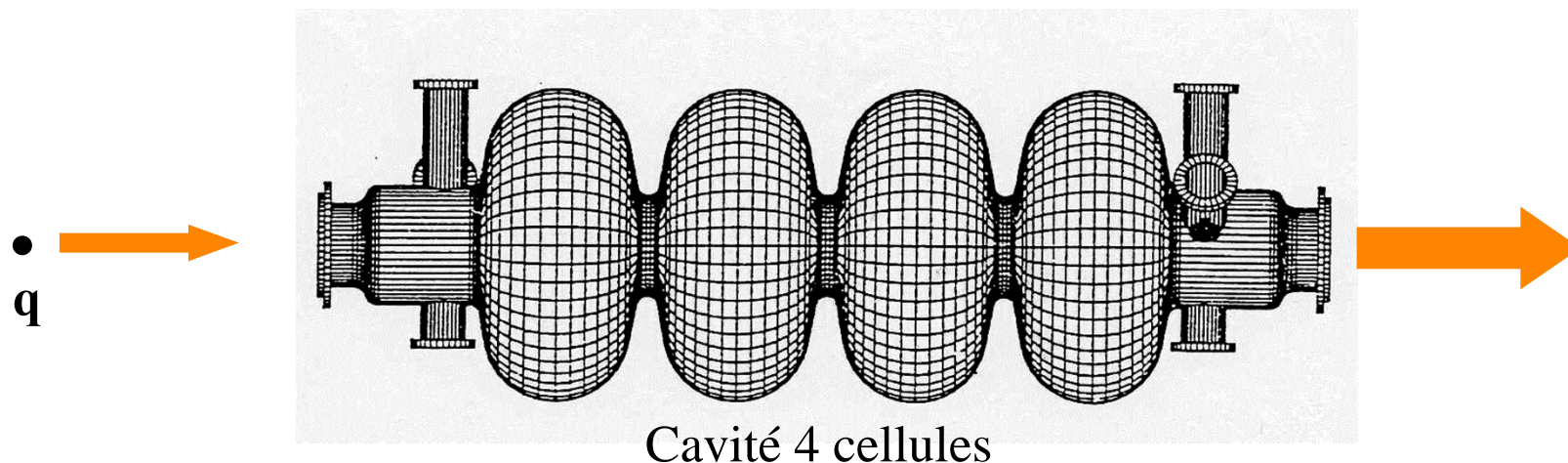
Cavité résonante RF



\Leftrightarrow Circuit Inductance + Capacité

E champ électrique accélérateur
B champ magnétique
 pulsés en fréquence

La supraconductivité et les accélérateurs : Cavités résonantes RF pour l'accélération faisceau



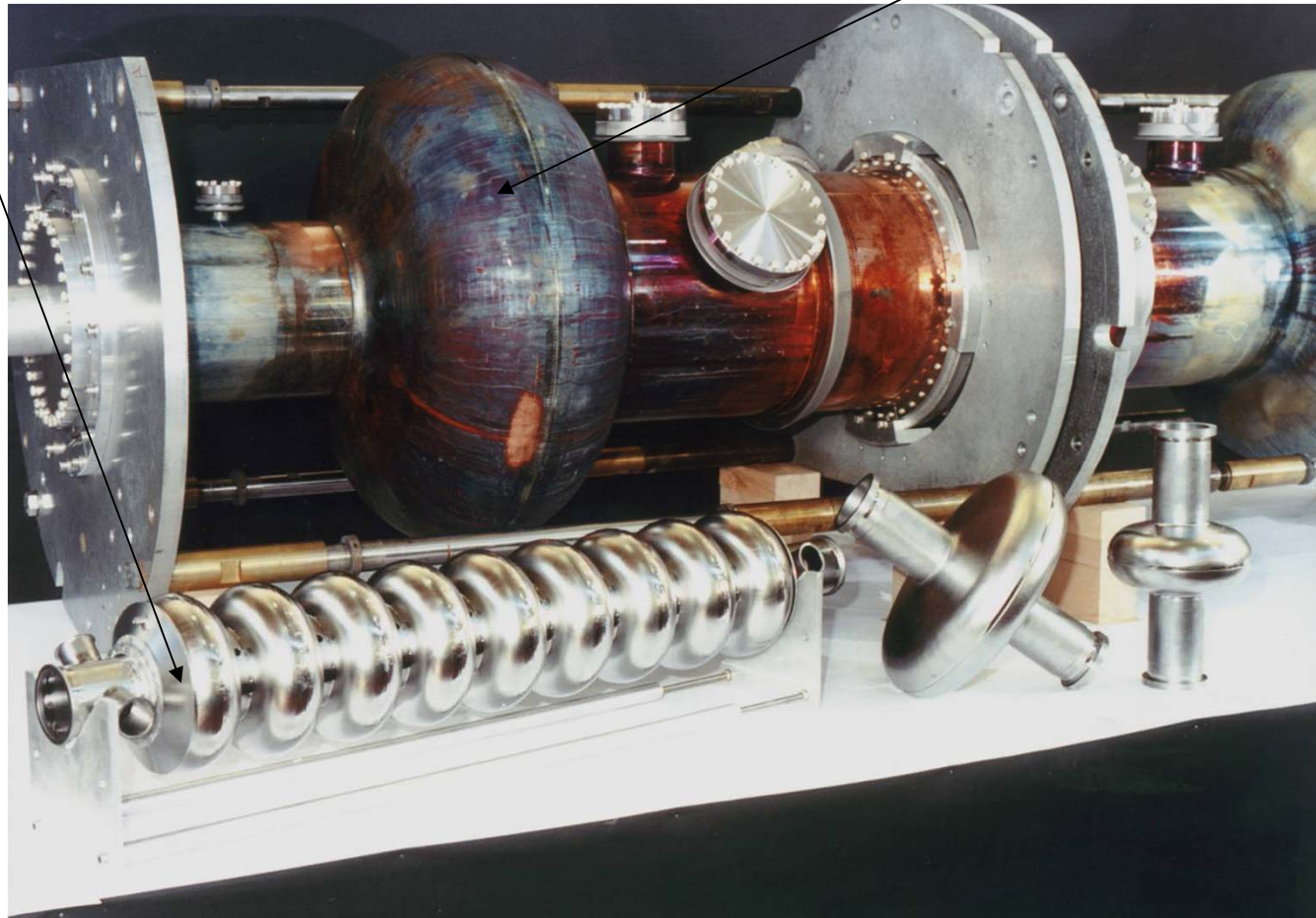
Objectif (futur):
 $E_{acc} > 40 \text{ MV/m}$

Champ électrique accélérateur pulsé

Exemples de cavités supraconductrices :

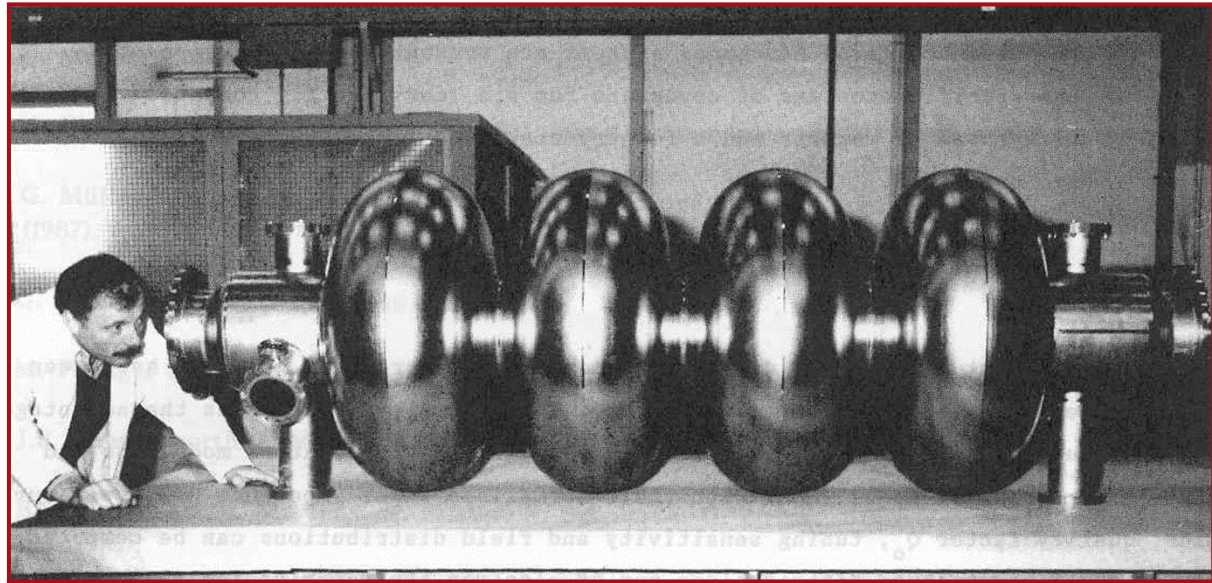
Cavités multicellules, monocellule en Nb massif (Tesla-1300 MHz ...)

Cavité Cu avec dépôt Nb en interne (SOLEIL-352 MHz, LHC -400 MHz)

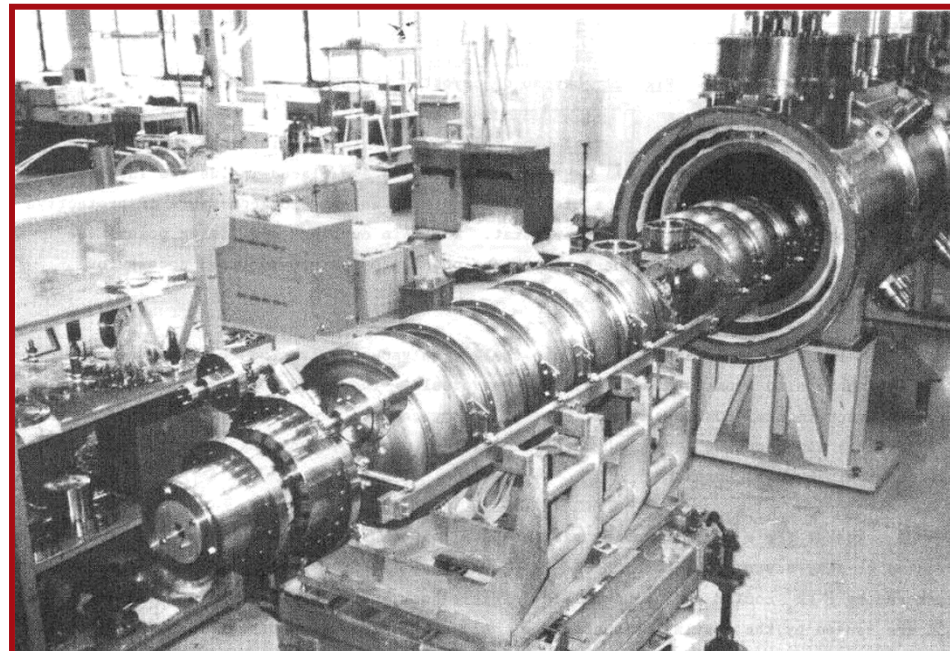


Exemples de cavités supraconductrices :

Cavité Nb LEP

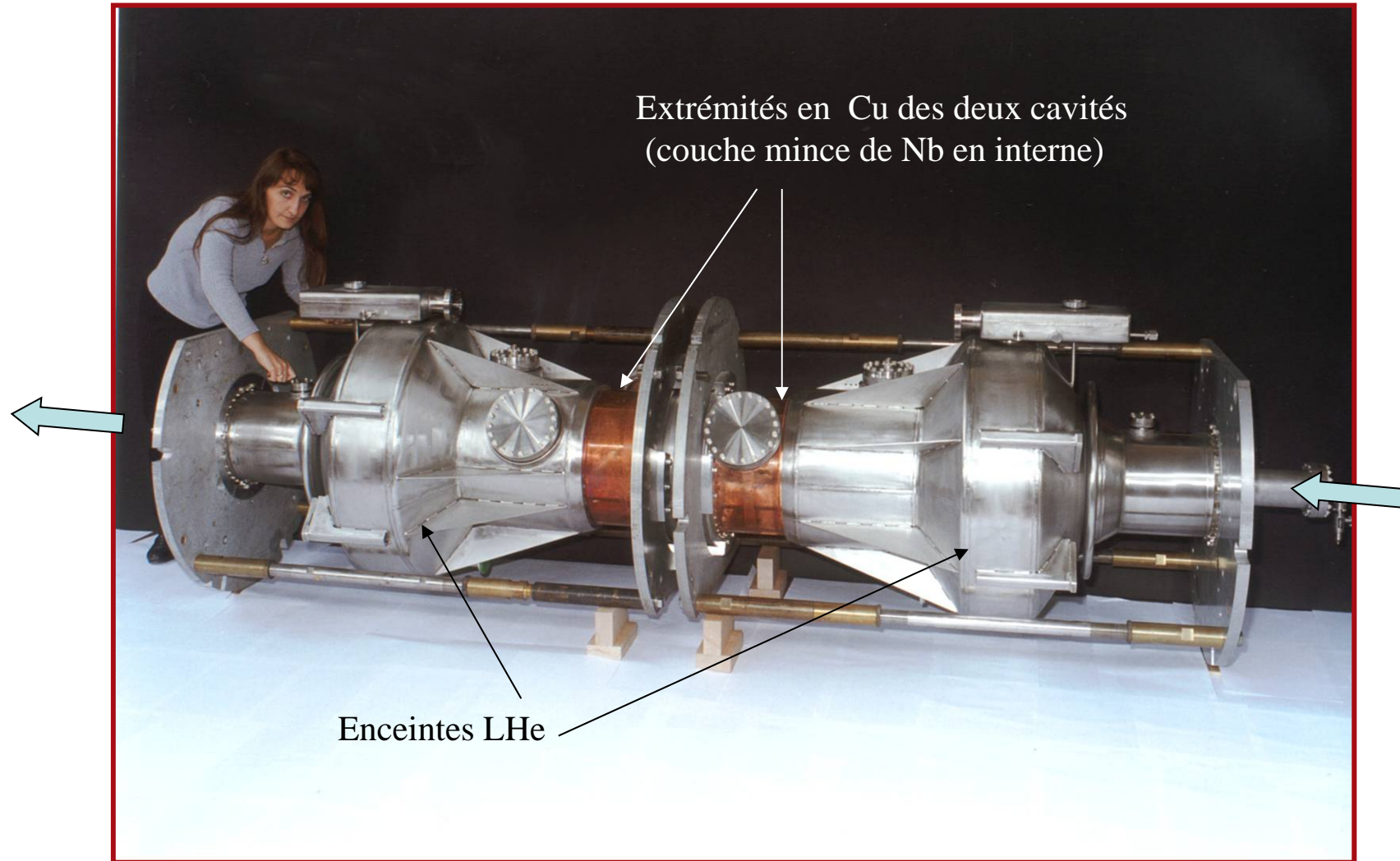


Cavité Tristan
et son cryostat



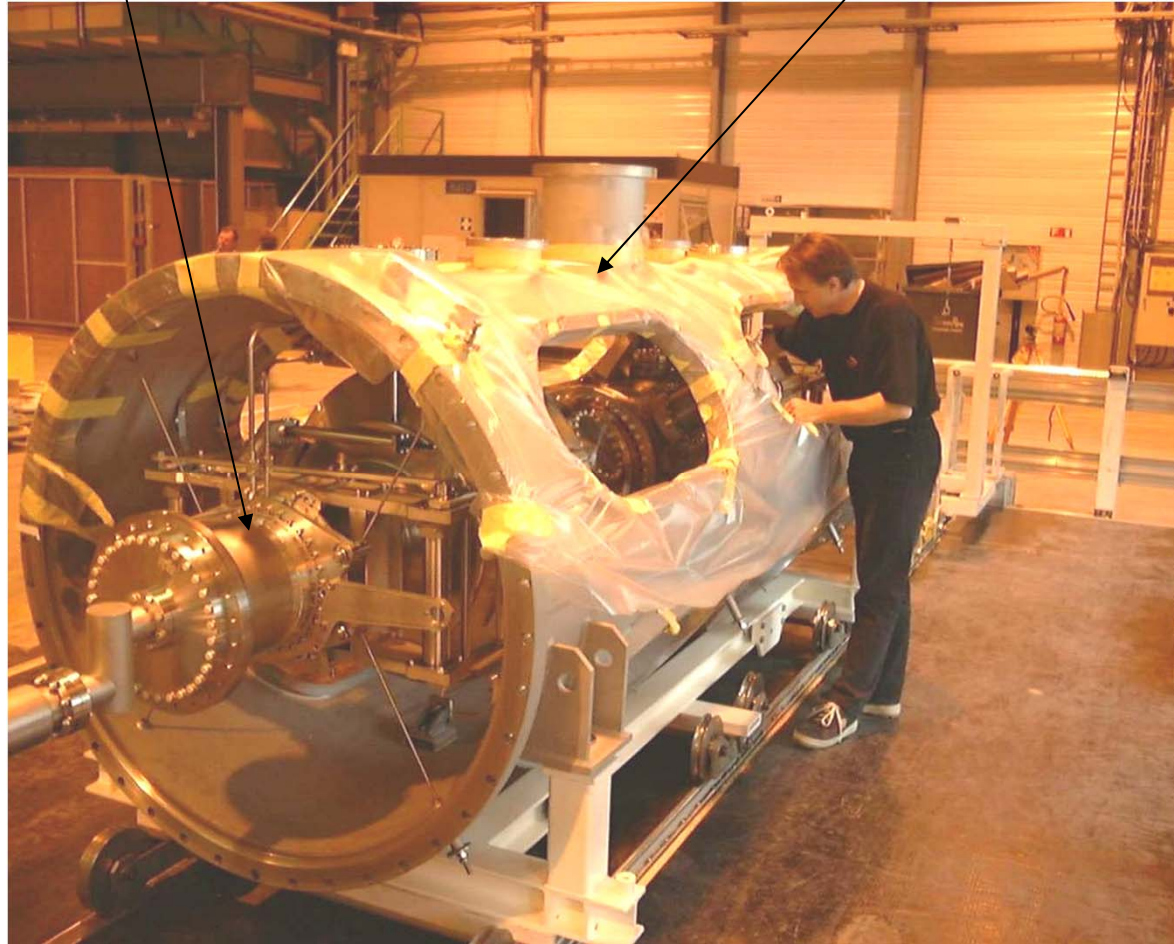
Exemples de cavités supraconductrices « habillées » :

Masse froide (4,5 K) cavité deux cellules SOLEIL (352 MHz) équipées de leurs tank LHe

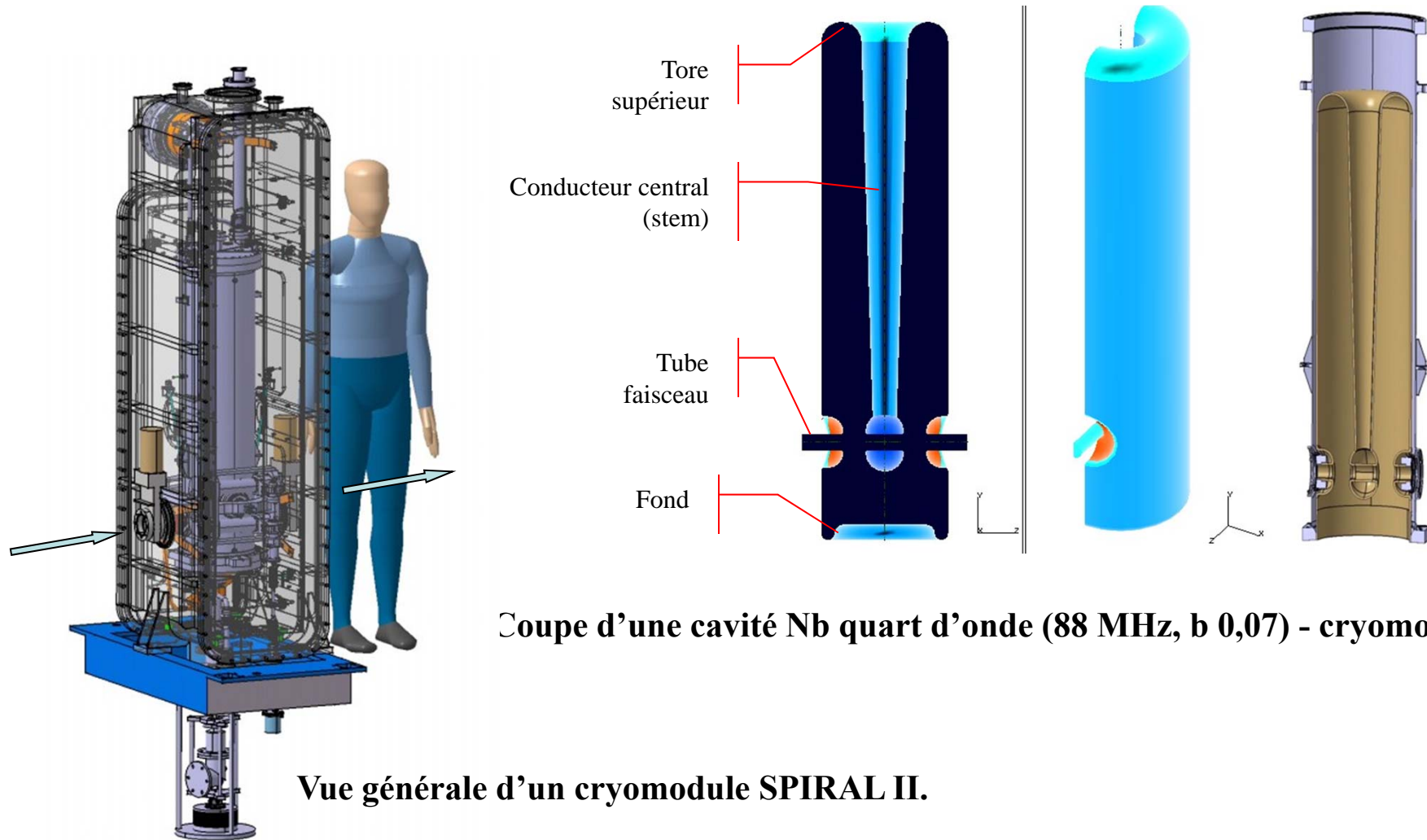


Exemples de cavités supraconductrices :

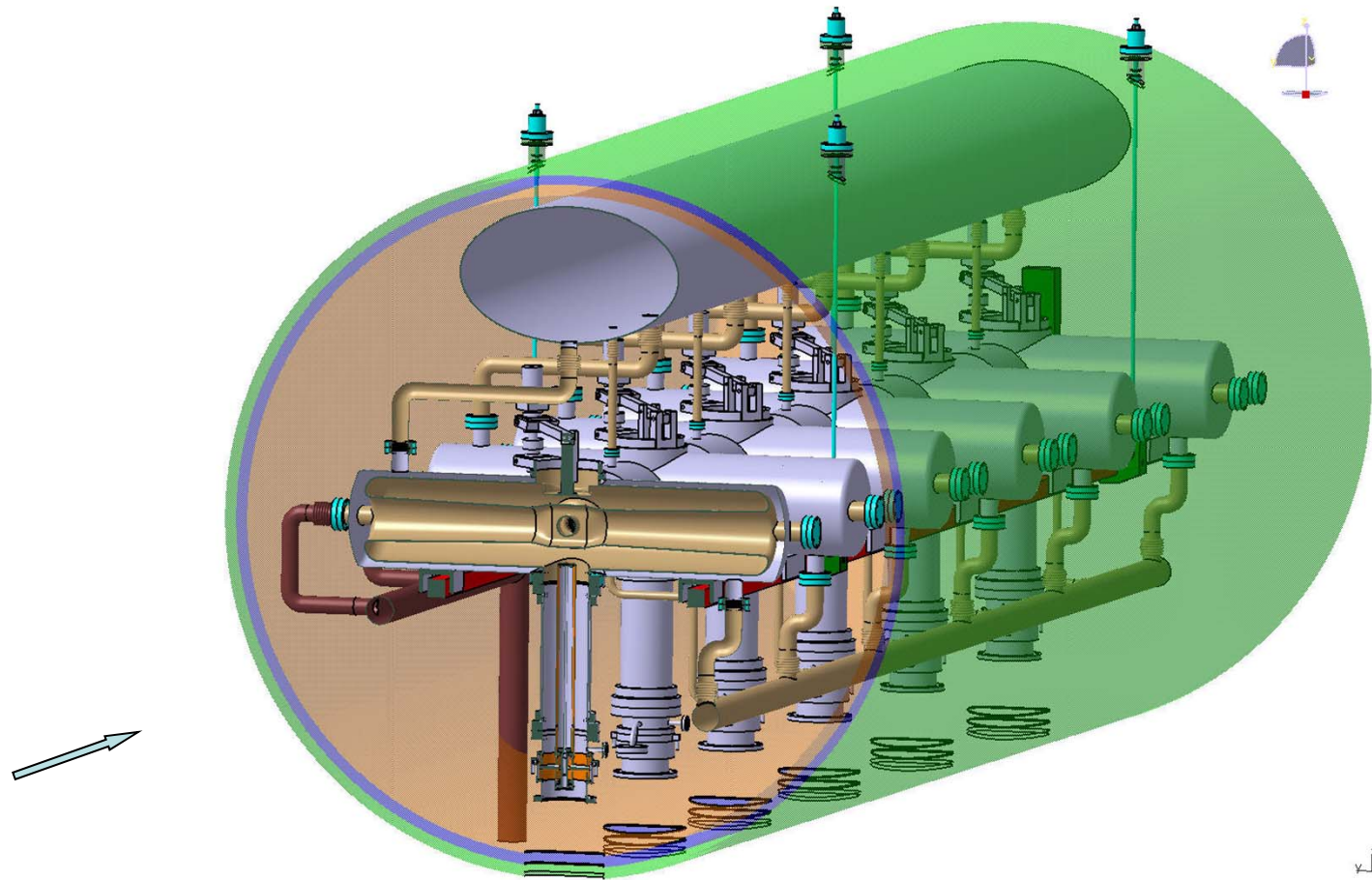
Masse froide SOLEIL (4,5 K) suspendue dans l'enceinte à vide du cryostat



Exemples de cavités supraconductrices :



Exemples de cavités supraconductrices :



Vue générale du cryomodule IFMIF EVEDA (1^{er} design)

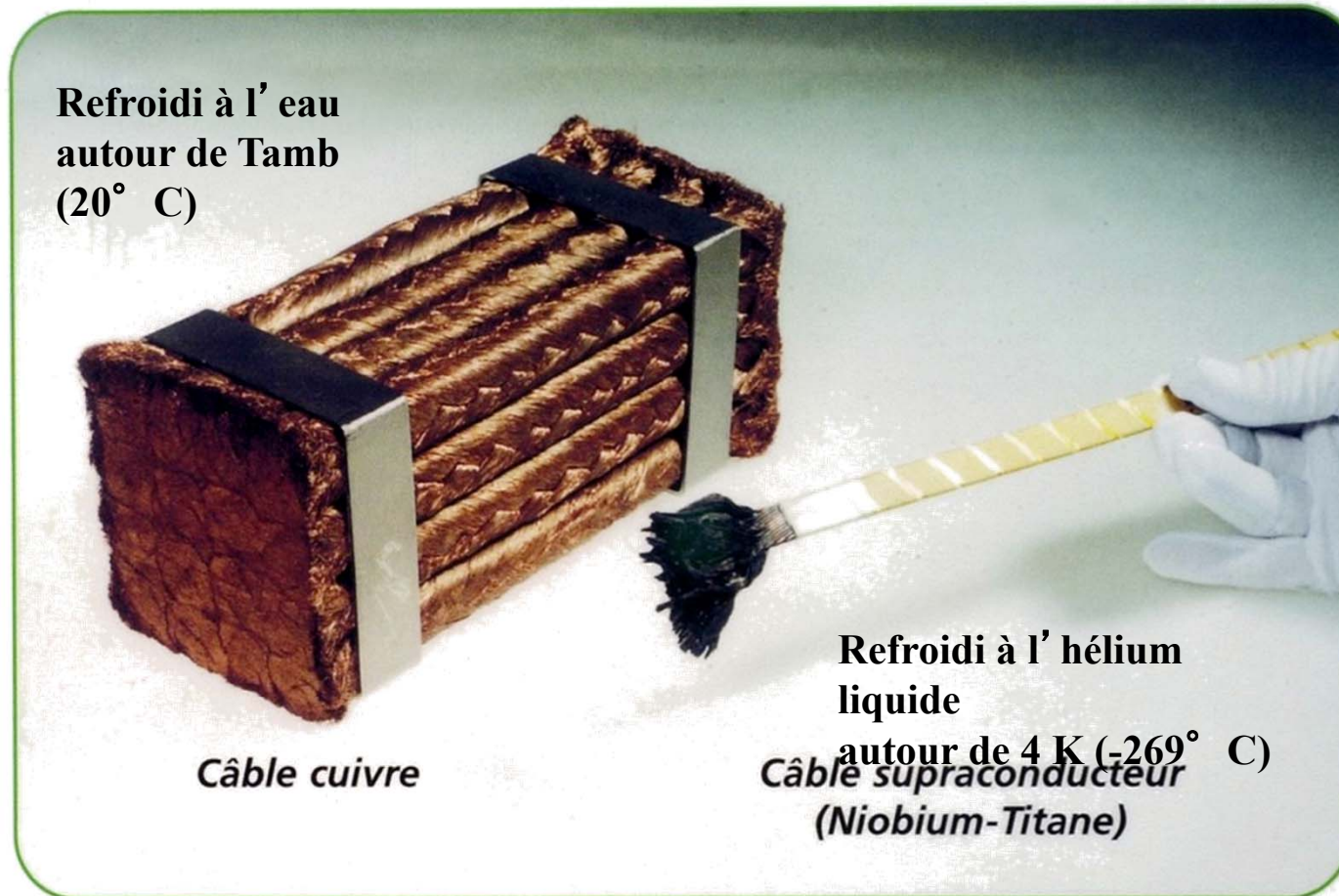
Cavités RF supraconductrices

- Niobium pur
- Cu avec couche mince de Nb

Haut niveau de pureté du matériau dans la fabrication et de propreté dans le montage (salle blanche)

La supraconductivité pour les aimants à haut champ magnétique

La supraconductivité = réduction de taille



Ces deux câbles peuvent transporter 15 000 ampères

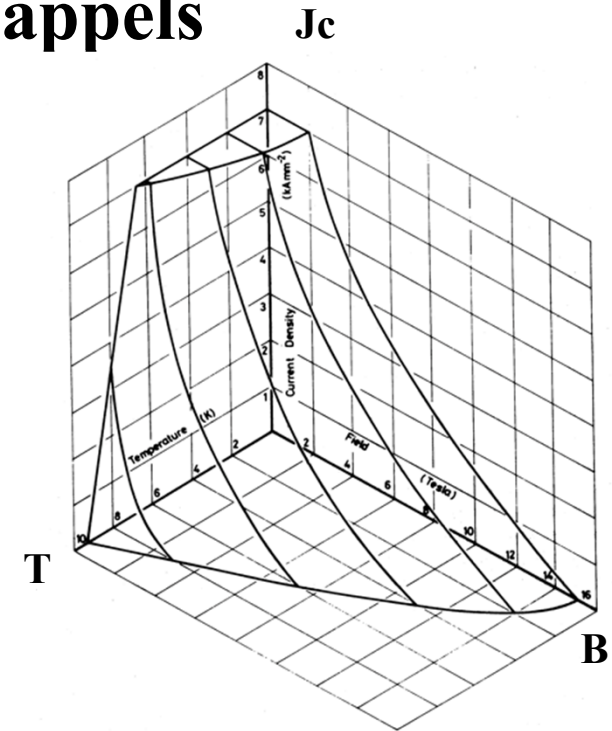
La supraconductivité : rappels

Domaine supraconducteur

[$T_c(K)$, $B_c(T)$, $J_c(A/mm^2)$]

R = 0

Pas de perte calorifiques par effet Joule

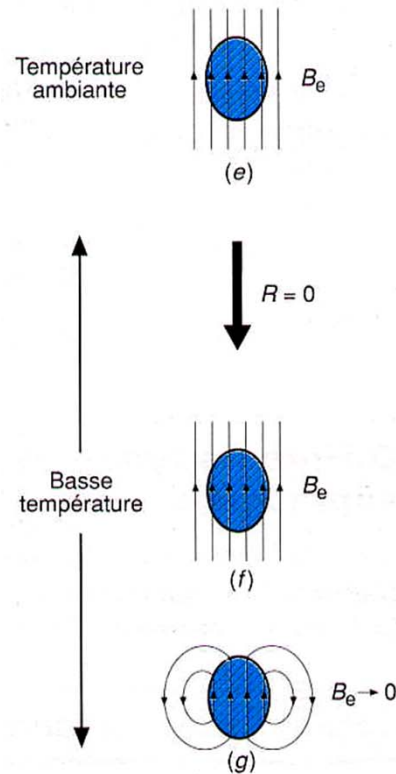


- Fort champ magnétique sur faible encombrement
- Cavité résonante RF en mode continu

Cryogénie nécessaire

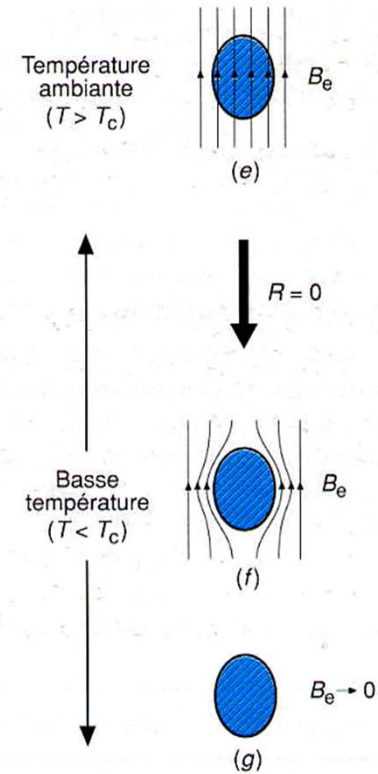
La supraconductivité : effet Meissner

Conducteur parfait



Techniques de l'Ingénieur B 2 382

Supraconducteur

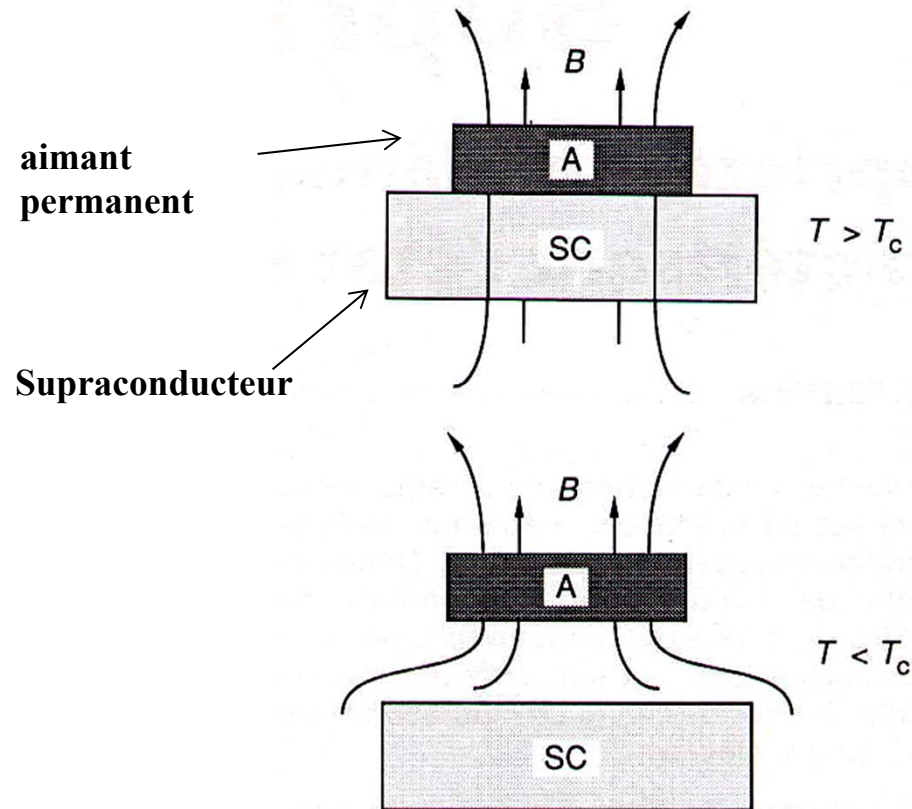


Techniques de l'Ingénieur B 2 382

Comparaison entre un conducteur idéal parfait et un matériau supraconducteur soumis à un champ magnétique externe B_e

- Expulsion du champ magnétique dans le supraconducteur
- Apparition d'une aimantation négative dans le supra qui s'oppose au champ externe
- Diamagnétique parfait + variation brutale de R quand $T < T_c \Rightarrow$ supraconducteur

La supraconductivité et l'expulsion du champ



Techniques de l'Ingénieur B 2 382

Effet Meissner :
expulsion du champ magnétique
dans le supraconducteur

La supraconductivité : type I et II

Type I :

Un seul état :

- parfaitement diamagnétique

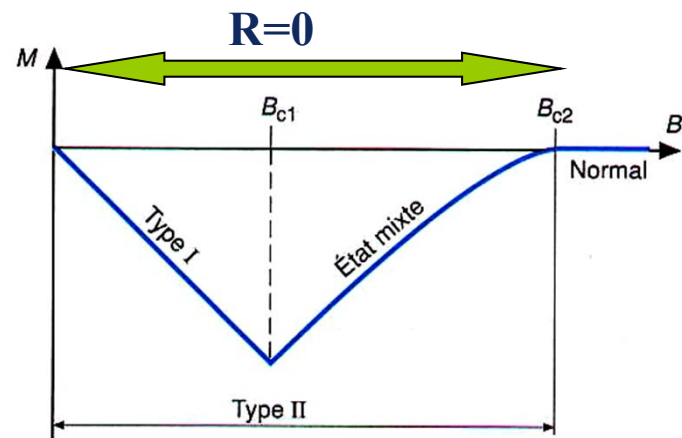
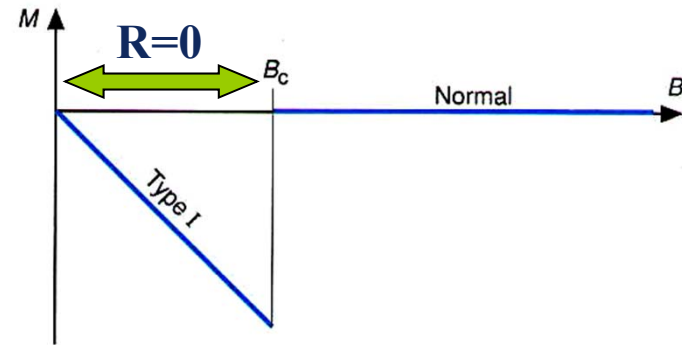
Les supras de type I (métaux purs comme le Pb ou le Nb) ont des très faibles champs critiques qui limitent leur emploi

Type II

Deux états possibles :

- état parfaitement diamagnétique
- état mixte où le flux magnétique pénètre progressivement dans le matériau.

Les supras de type II (alliages métalliques comme le NbTi) ont un champ critique B_{c2} plus élevé qui les rend utilisables.



Techniques de l'Ingénieur B 2 382

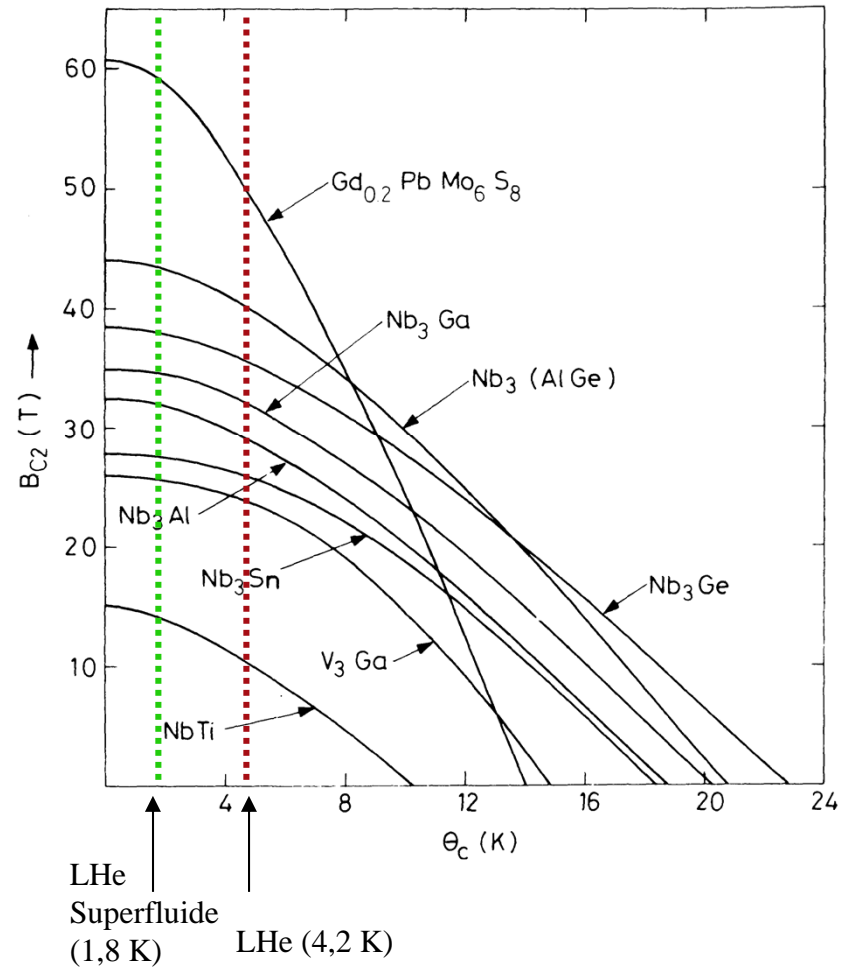
Types I et II :

I = Supra pur et dur
mais limité par B_c

II = Supra conservée
à plus fort champ ($B_{c2} \gg B_{c1}$)

La supraconductivité : type II

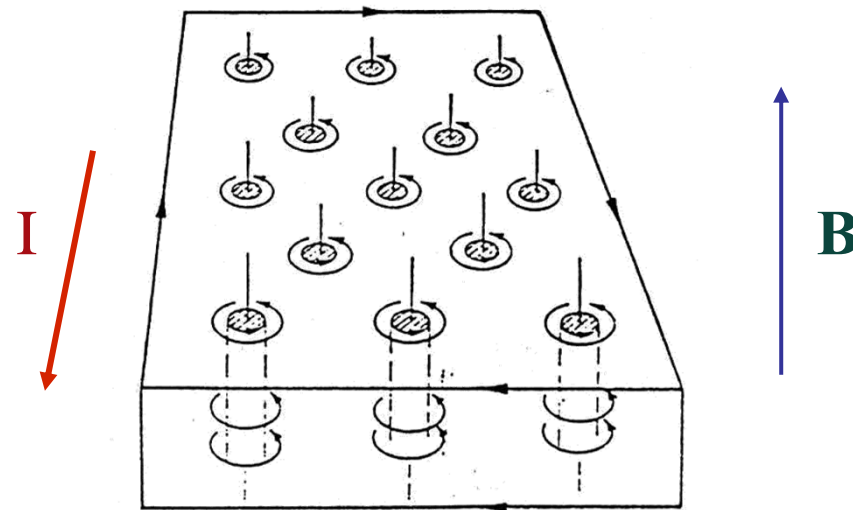
Evolution du champ critique en fonction de la température



La supraconductivité : détails sur le type II

Les "vortex" (tourbillons au cœur normal) dans l'état mixte

La pénétration du flux se fait par des zones "normales" cylindriques, parallèles au champ magnétique appliqué; ces zones ont un axe ou "cœur" à l'état normal. Ces coeurs sont arrangés régulièrement dans une configuration triangulaire.



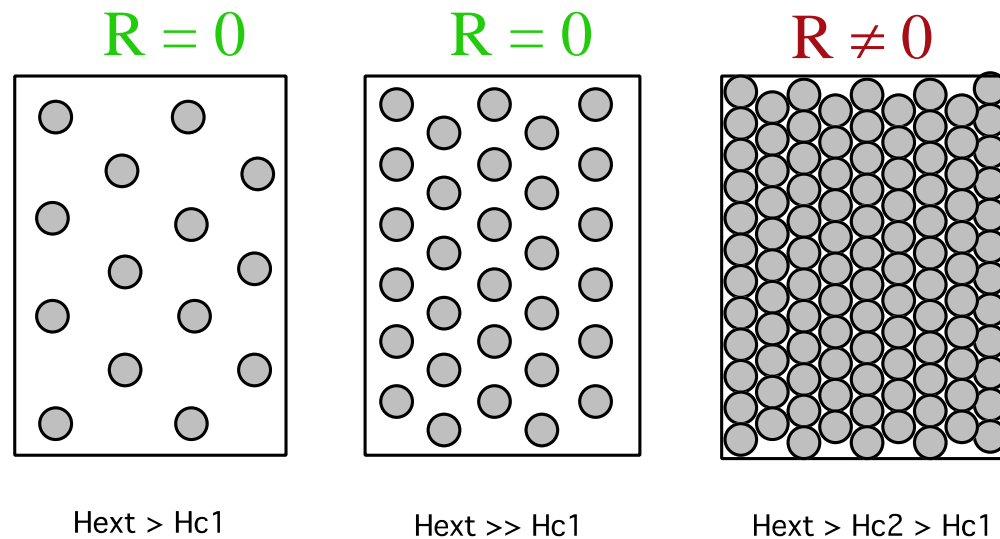
Disposition de coeurs "normaux" dans le supraconducteur

La supraconductivité : détails sur le type II

Les coeurs sont encerclés par des courants supraconducteurs qui écrantent le champ dans la partie qui reste du supraconducteur. Ces courants forment ainsi des "tourbillons" ou "vortex".

La taille des coeurs normaux dans ces vortex est propre à chaque matériau (NbTi : qq nm) .

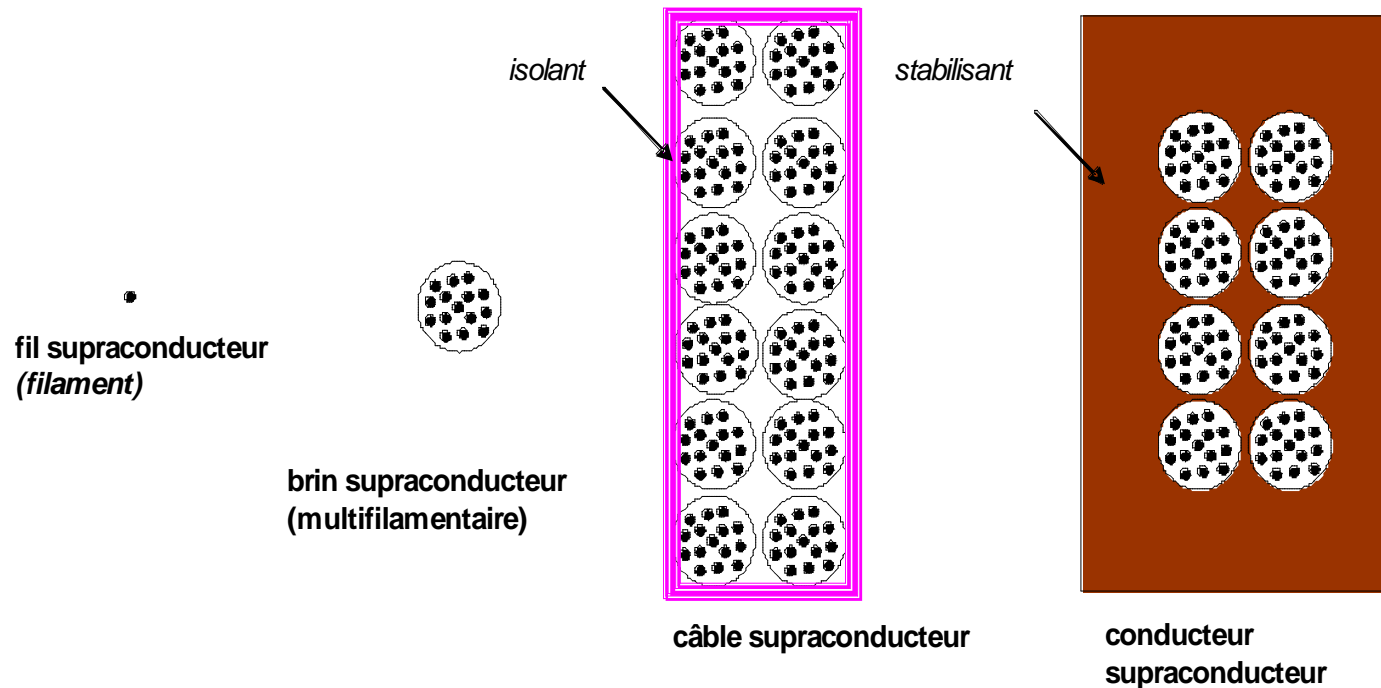
Au fur et à mesure que l'on élève le champ extérieur, les vortex se rapprochent (NbTi : 23 nm à 5T). Il existe une valeur de champ pour lequel les zones normales se touchent. A ce moment, le flux magnétique pénètre complètement le matériau => fin de l'état supraconducteur !



Applications aux câbles supraconducteurs

Stabilité du supraconducteur dans un câble.

Un câble supraconducteur transportant un courant électrique peut, sous l'effet de perturbations mécaniques, thermiques ou électromagnétiques, transiter localement ou sur toute sa longueur (même si les conditions macro $< (T_c, B_c, J_c)$). Le risque alors est que la dissipation de chaleur, qui s'y développe par effet Joule, se propage et endommage irréversiblement le câble (fusion d'une partie du câble ou destruction de l'isolation électrique). Pour remédier à ces instabilités, on dimensionne le câble selon plusieurs critères => du simple supraconducteur jusqu'à une structure d'un brin "composite" puis à la structure du câble ou du conducteur complet.

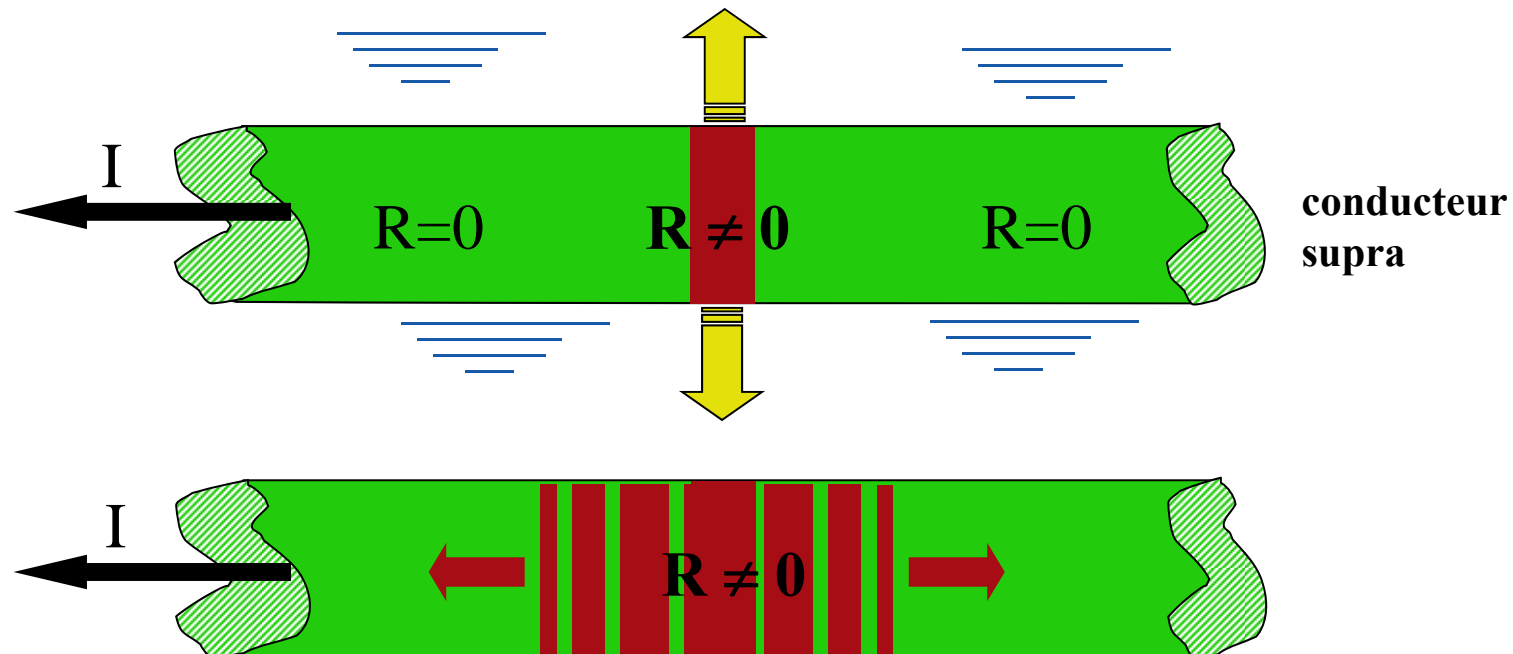


Stabilité

Problème : si le bobinage redevient localement normal (perturbations mécaniques [choc, frottement], magnétique ou thermique...)

⇒ il y a de la chaleur dissipée (effet Joule) à évacuer par le réfrigérant ou les matériaux environnant ($T_{\text{supra}} < T_c$) => **choix de géométrie de brin et câble à faire pour chaque application**

- Energie dissipée dans le supraconducteur ($R \cdot I^2$) énorme
- ($\rho_{\text{supra}} = 5000 \cdot 10^{-10} \Omega \cdot \text{m}$ à l'état normal)
- le coefficient de transfert thermique et la surface d'échange sont physiquement limités
- risque de ne plus assurer un refroidissement suffisant du matériau
- propagation de la transition => « quench »



Critères de stabilité

Sauts de flux et dissipation d'énergie

La circulation de courant dans un supraconducteur déjà soumis à un champ magnétique externe va dissiper de l'énergie si les vortex déjà installés peuvent se déplacer. Même si ces vortex sont "ancrés" (**pinning**) par des défauts dans le matériau, des mouvements peuvent se produire sous l'effet d'une **perturbation thermique** (dûe à variation du courant ou du champ, choc mécanique, apport de chaleur). L'élévation de T° réduit les forces d'ancrage et il y a **déplacement collectif de vortex** dans le matériau. On parle alors de **sauts de flux**. D'une manière générale, limiter ces mouvements et l'énergie dissipée associée va consister à minimiser l'épaisseur (diamètre) du matériau supraconducteur.

Diamètre critique de brin

Limiter les sauts de flux => réaliser des câbles supraconducteurs avec des fils supraconducteurs de **très petits diamètres (filaments)**. Par ex, pour le NbTi sous 6 T, il n'y a plus de sauts de flux risquant de faire monter la température au-delà de T_c quand le diamètre des filaments est inférieur à **100 μm** .

Si $d_{\text{fil}} < d_{\text{crit}}$ [$d_{\text{crit}} = f(\text{matériau, conditions de fonctionnement})$], le conducteur est dit intrinsèquement stable.

Critère adiabatique de stabilité

Ce critère s'applique sur un filament supraconducteur seul (sans échange thermique avec extérieur). Il n'y a que la capacité calorifique C_{sc} du supra qui intervient pour absorber l'énergie engendrée par des sauts de flux.

$$d_{adiab} \propto (C_s)^{0,5} \cdot (J_c \cdot \partial J_c / \partial T)^{-0,5}$$

J_c densité de courant critique

Ex : NbTi $d_{adiab} < 35 \mu\text{m}$ à 2 T et 4,2 K

Critère dynamique de stabilité

La présence de cuivre ou d'aluminium autour des filaments procure un moyen différent de stabilité. En effet, lorsqu'il y a "saut de flux", c'est à dire redistribution du champ à l'intérieur du supraconducteur, le cuivre ou l'aluminium voient aussi cette variation de champ local et tendent à s'y opposer. Ce critère dynamique justifie encore plus la présence d'une matrice (de résistivité ρ_{mat}) en cuivre ou aluminium autour des filaments supra (de conductibilité thermique k_{sc}) dans un rapport S_{Cu}/S_{Sc} .

$$d_{dyna} \propto (S_{Cu}/S_{Sc} \cdot k_{sc}/\rho_{mat})^{0,5} \cdot (J_c \cdot \partial J_c / \partial T)^{-0,5}$$

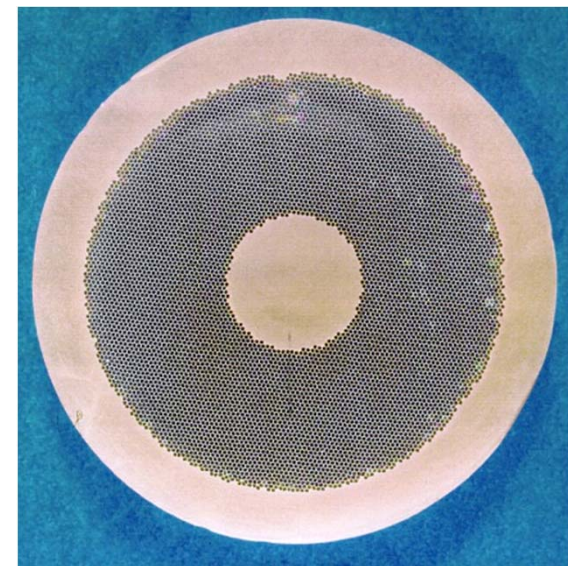
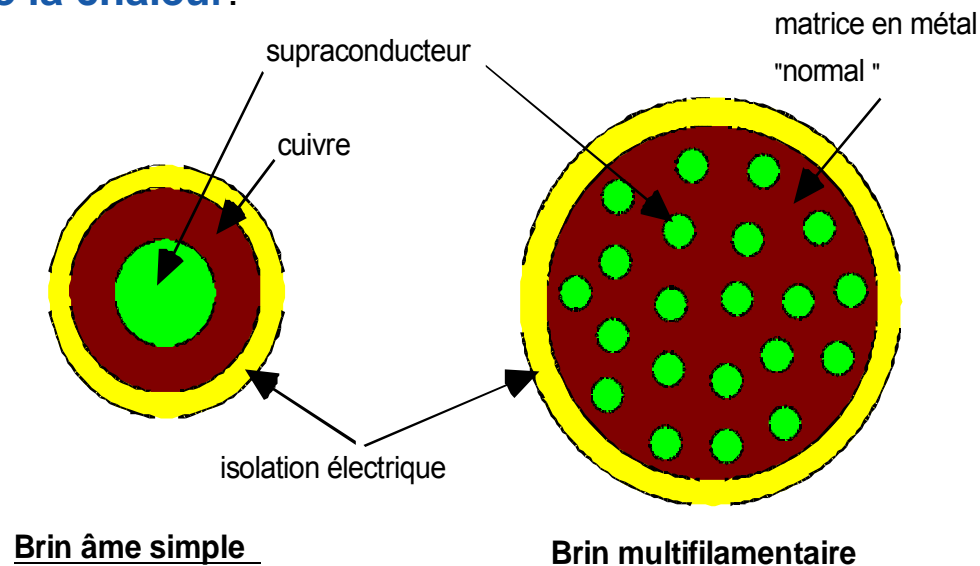
Ex : NbTi $d_{dyna} < 40 \mu\text{m}$ à 2 T et 4,2 K

Cryostabilité

Faire collapser ou contenir la zone résistive grâce à un échange thermique suffisant
 Ajout d'une matrice "stabilisante" (matériau de très faible résistivité comme Cu ou Al)
 ⇒ courant passe dans la matrice en cas de transition du supra ($\rho_{\text{mat}} < \rho_{\text{sup}}$)

ρ ($10^{-10} \Omega.m$)	273 K	4 K
Al (RRR=500)	234	0.5
Cu (RRR=500)	154	0.3
NbTi	6000	6000 (à 10 K c'est à dire à l'état normal)

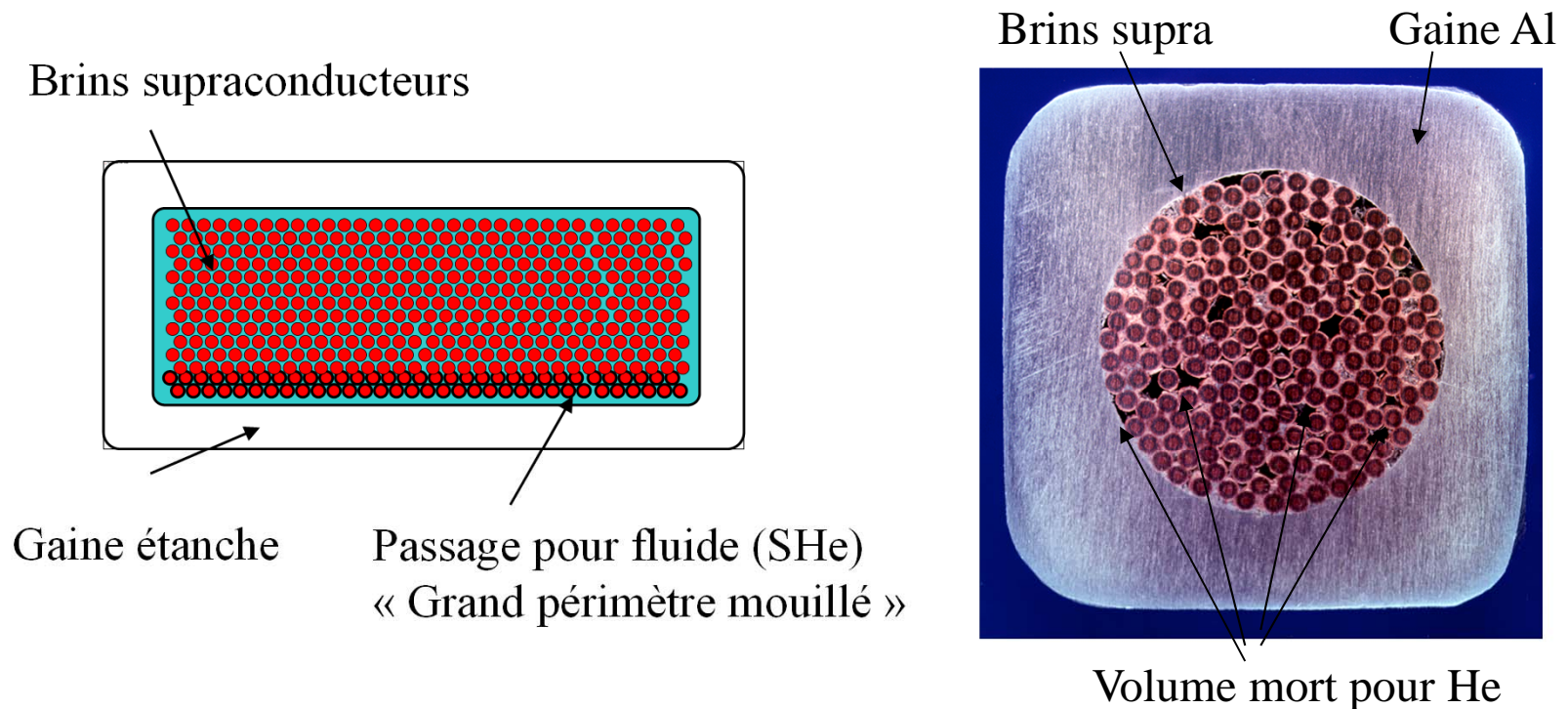
⇒ densité de courant réduite et dissipation de chaleur par effet Joule aussi réduite
 ⇒ **augmentation de la surface d'échange avec le cryofluide et évacuation correcte de la chaleur.**



Cryostabilité

Ce critère demande en général des rapports (en surface) entre supraconducteur et matrice de l'ordre de 20 (Cu/Sc ou $\text{Al/Sc} > 20$). Pour les très gros bobinages, ce rapport peut aller jusqu'à 200 pour des courants de 5000 à 20000 A.

Une autre solution pour une bonne cryostabilité est de faire circuler le cryofluide à l'intérieur du câble (**CIC = Cable In Conduct**). Très utilisé dans les aimants de fusion où il y a de fort courant avec de fortes perturbations possibles (pertes plasma).



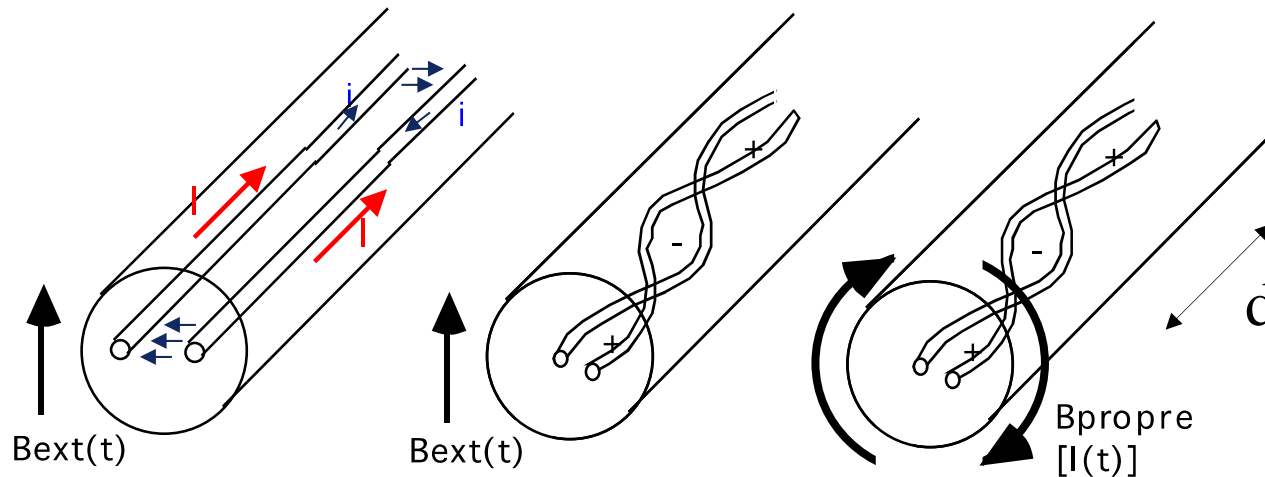
Pertes en champ magnétique variable

Pertes par couplage entre filaments.

Ces pertes sont dues aux courants induits dans la matrice par les boucles formées par les filaments du supraconducteur dans un champ variable (extérieur ou lors de la montée en courant du bobinage). Minimiser ces pertes c'est réduire l'aire des boucles en torsadant (twisting) les filaments entre eux.

$$Q_{\text{diff}} \propto B_{\text{max}}^2 \cdot d^2 / (\rho \cdot T_m) \quad \text{en J.m}^{-3}.\text{cycle}^{-1}$$

où T_m le temps pour atteindre le champ max B_{max}
 d longueur du pas de twistage,
et ρ la résistivité transverse de la matrice (Cu ou Al)



Pertes en champ magnétique variable

Pertes par courant de couplage entre brins

Ces pertes sont dues aux courants induits par les boucles formées par les brins du câble dans un champ variable (extérieur ou lors de la montée en courant du bobinage). Minimiser ces pertes c'est réduire l'aire des boucles en torsadant (twisting) les brins entre eux.

$$Q_{\text{diff}} \propto B_{\text{max}}^2 \cdot d^2 / (\rho \cdot T_m) \quad \text{en J.m}^{-3}.\text{cycle}^{-1}$$

où T_m le temps pour atteindre le champ max B_{max}
 d longueur du pas de twistage ,
et ρ la résistivité transverse équivalente entre brins

Pertes par hystérésis

La pénétration du flux (état mixte) dans un champ oscillant est un phénomène irréversible. Les pertes engendrées sont fonction du champ maximum B_{max} , de la densité critique J_c et de la taille \varnothing des filaments (intérêt d'un filament de petit diamètre)

$$Q_{\text{hyst}} \propto B_{\text{max}} \cdot J_c \cdot \varnothing \quad \text{en J.m}^{-3}.\text{cycle}^{-1}$$

Fabrication de brin multifilamentaire



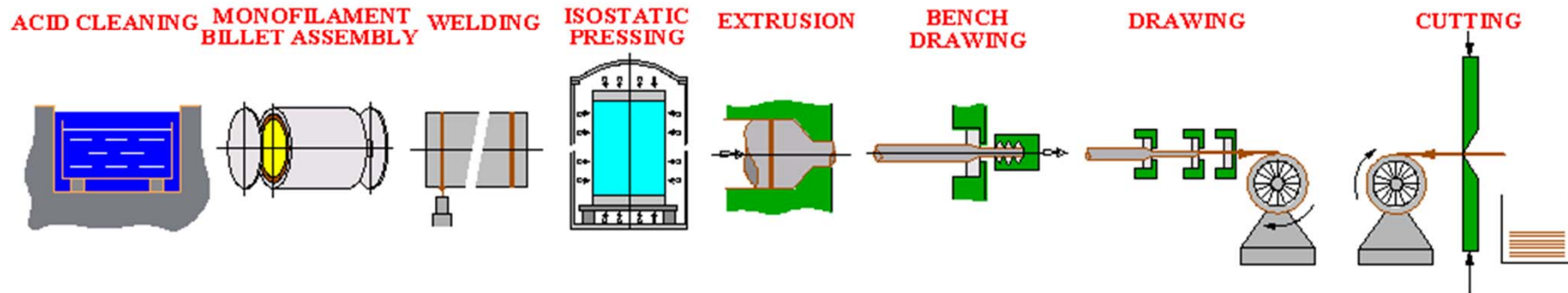
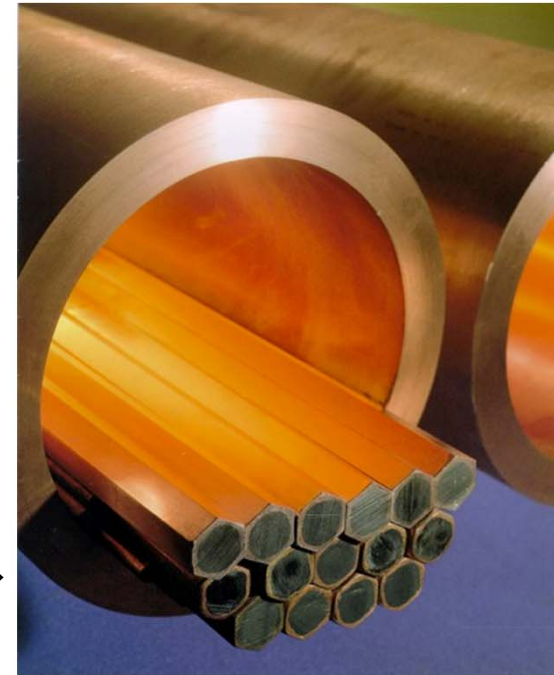
Lingots de NbTi



Enveloppe en Cu



Billettes de «monofilament»
Cu/NbTi

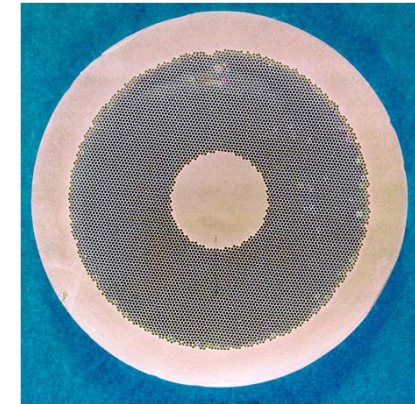
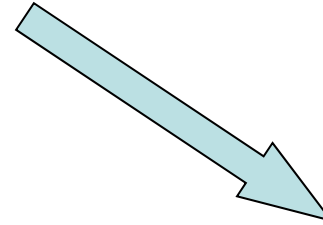


Remerciements ALSTOM BELFORT

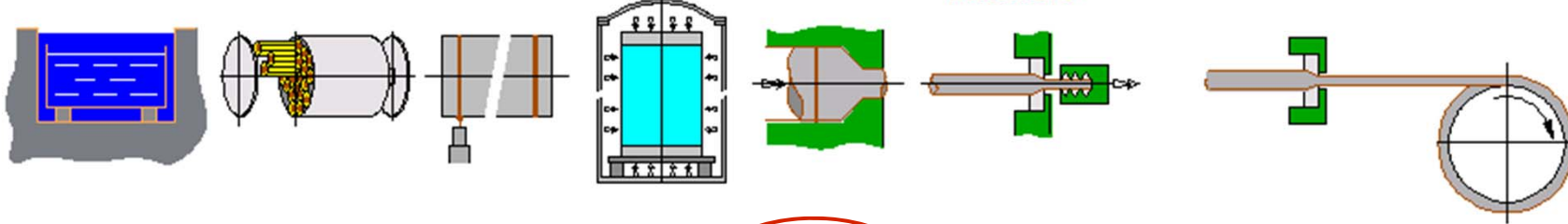
Fabrication de brin multifilamentaire



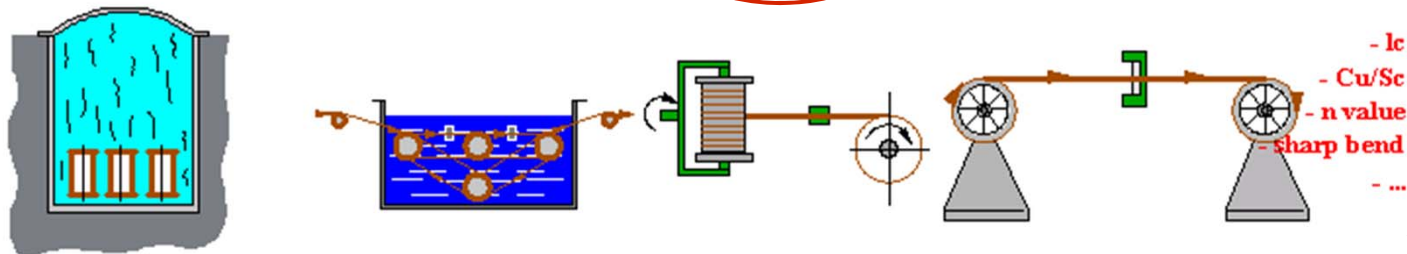
Billettes de monofilament
Cu/NbTi



ACID CLEANING MULTIFILAMENT BILLET ASSEMBLY WELDING ISOSTATIC PRESSING EXTRUSION BENCH DRAWING BULL BLOCK DRAWING



HEAT TREATMENT DRAWING **TWISTING** FINAL DRAWING TESTING



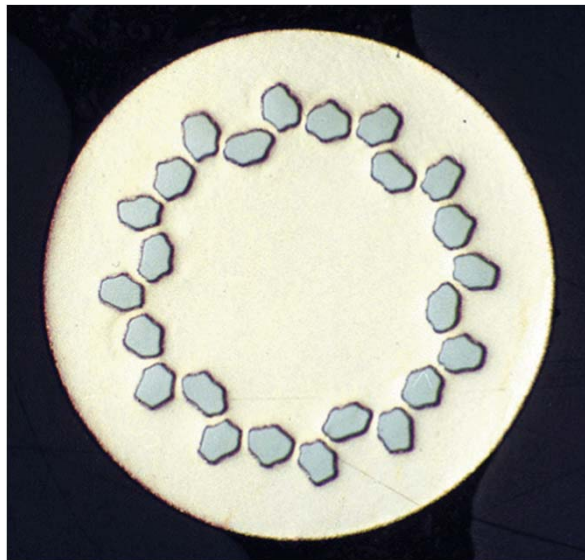
- I_c
- Cu/Sc
- n value
- sharp bend
- ...

Remerciements ALSTOM BELFORT

Fabrication de brin multi-filamentaire

Choix du brin final en fonction de :

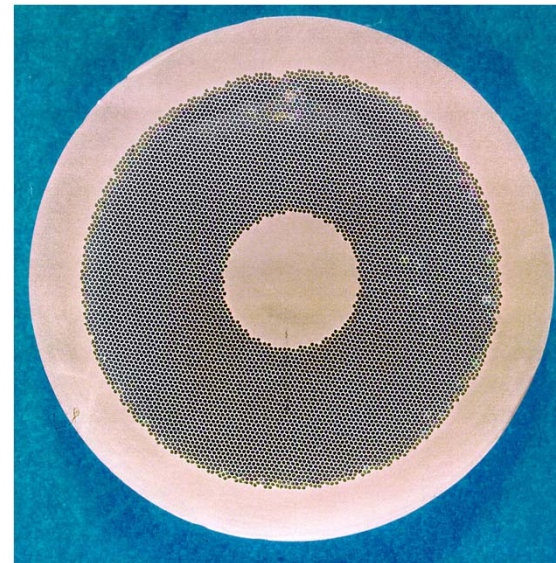
- conditions d'utilisation
 - température
 - champ magnétique et variation de $I(t)$
 - perturbations extérieures
 - encombrement
- du coût recherché (NbTi 2000 t/an - 150 \$/kg fil ; Nb₃Sn 15 t/an-<2000 \$/kg)



Brin IRM NbTi

(beaucoup de Cu, peu de brins, gros diamètre de filament 100 μm)

70000 km/an production mondiale \Leftrightarrow 50 M\$



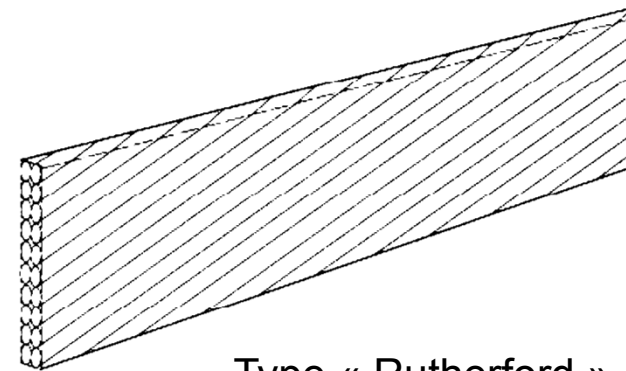
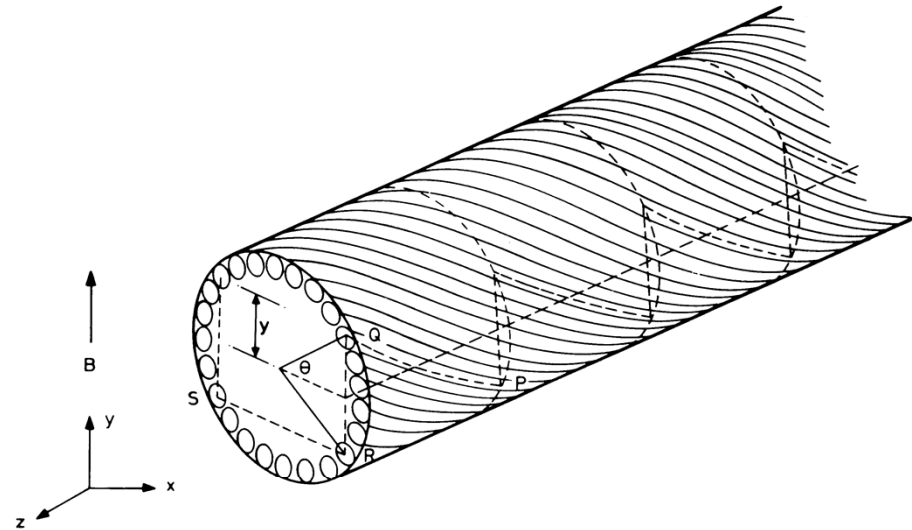
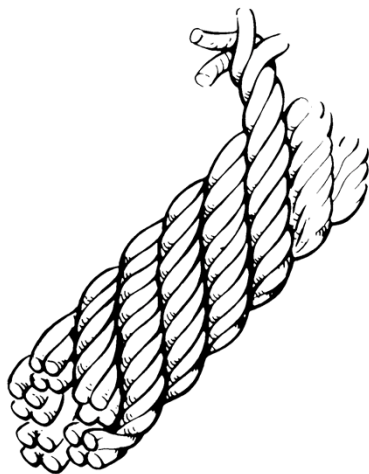
Brin SSC NbTi

(matrice Cu, nombreux brins, fin diamètre de filament 30 μm)

Réalisation de câbles supraconducteur

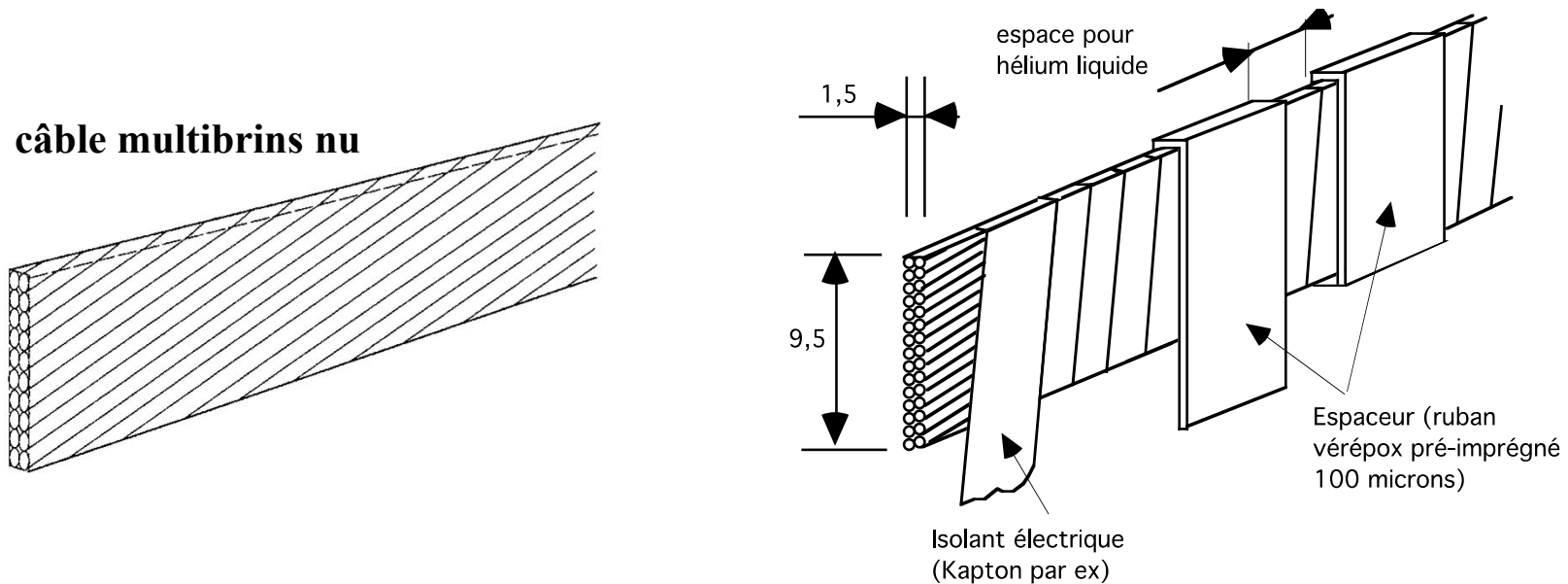
A partir d'un brin multifilamentaire adapté (\varnothing brin ,
quantité, matrice , rapport matrice/supra, J_c , B, T...) :

- assemblage des brins
- torsadage
- mise en forme



Type « Rutherford »

Isolation électrique du câble



Exemple du câble type « Rutherford » pour aimant quadrupolaire LHC

Enrubannage du conducteur= **l'isolant électrique** est constitué d'un ruban (**Kapton** par exemple) enroulé autour du câble éviter des courts-circuits entre deux tours consécutifs de câble dans le bobinage. Le **ruban de fibre de verre** bobiné de façon espacé est là pour générer des **espaces entre chaque couche** de câble et donc assurer un bon refroidissement du câble par l'hélium liquide. D'autre part, cette fibre pré-imprégnée du câble va être polymérisée après bobinage dans la forme désirée pour donner au bobinage une bonne tenue mécanique.

Utilisation de câble multibrins

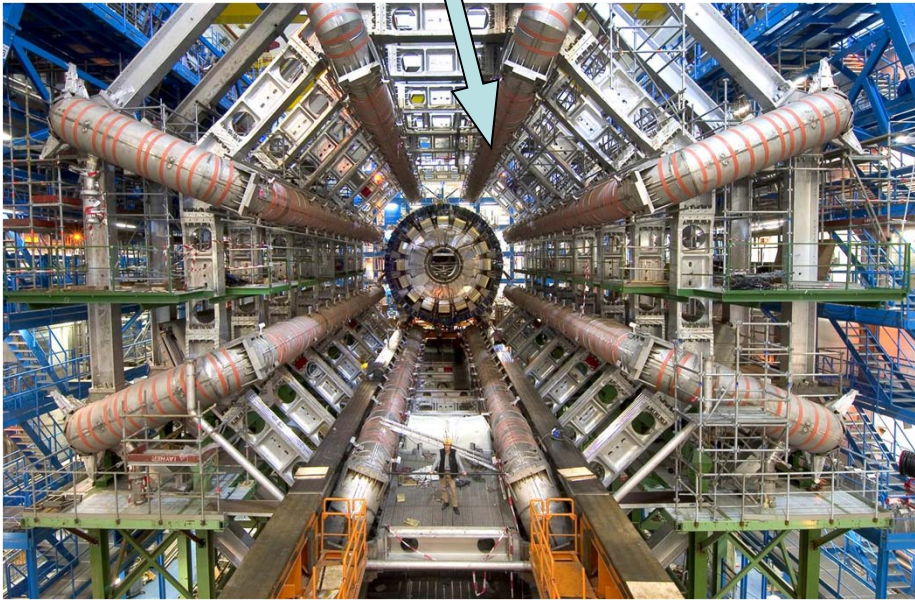
Aimants quadrupôlares
LHC, en bain hélium
superfluide à 1,8 K



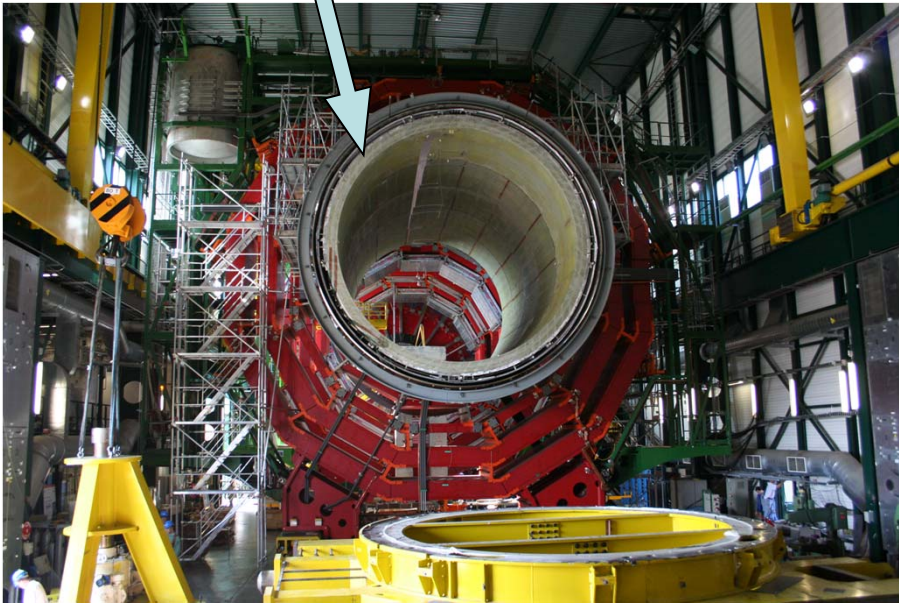
Type de brin	01	02
Nombre de brins	28	36
Largeur	15.10 mm	15.10 mm
Demi-épaisseur	1.900 ± 0.006 mm	1.480 ± 0.006 mm
Angle Keystone	1.25 ± 0.05°	0.90 ± 0.05°
Pas de transposition	115 ± 5 mm	100 ± 5 mm
I_c Minimum	13750 A	12960 A
	@1.9 K and 10 T	@1.9 K and 9 T
Longueur unitaire minimum	460 m	750 m
Quantité	~2370 km (dip)	~4600 km (quad + dip(couches ext))

Grands Aimants

Toroïde -LHC CERN 2003
1,5 Teslas



Solénoïde CMS -LHC CERN 2003
4 Teslas



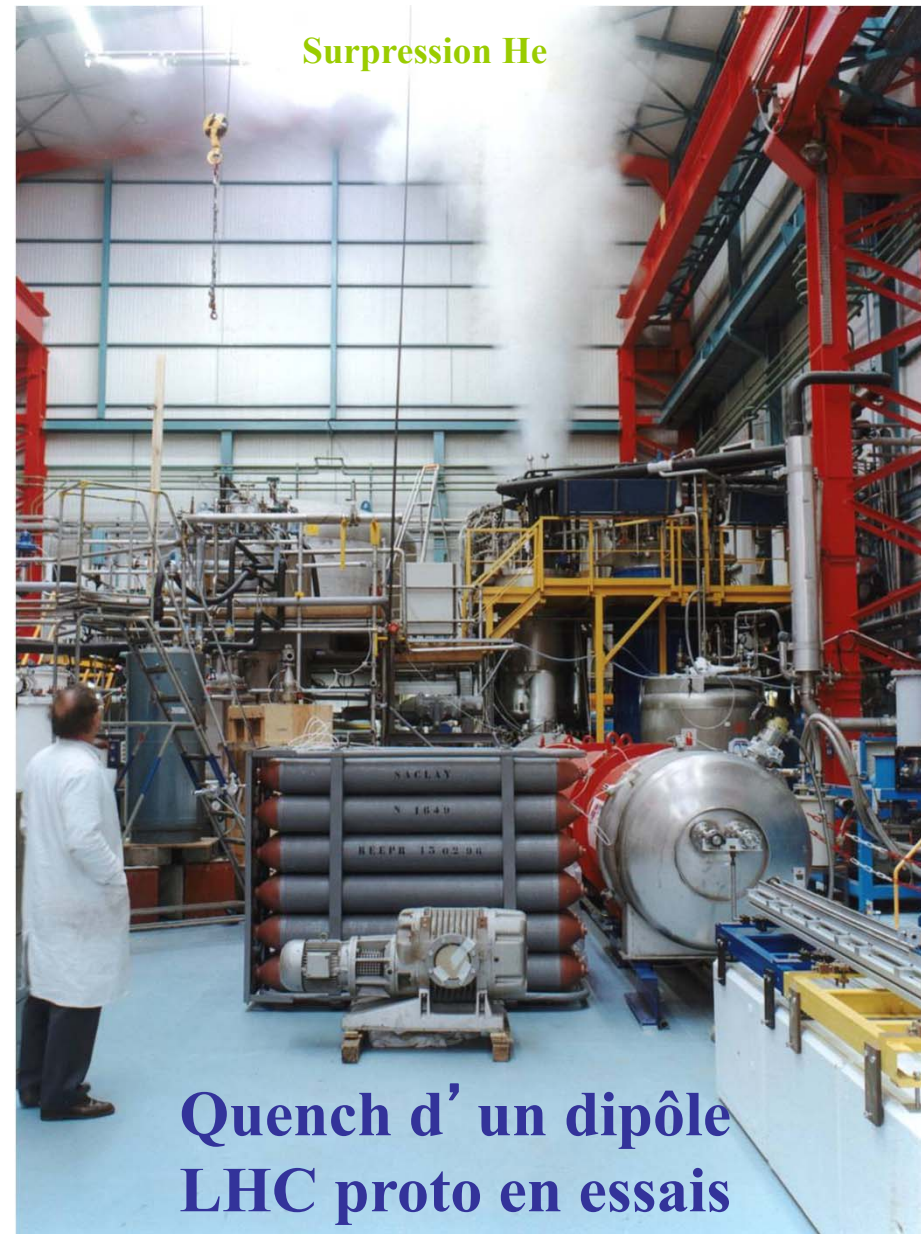
Aimants supra : énergie stockée et protection

Bobine supra = fort champ magnétique
= très fort courant + grande énergie stockée.

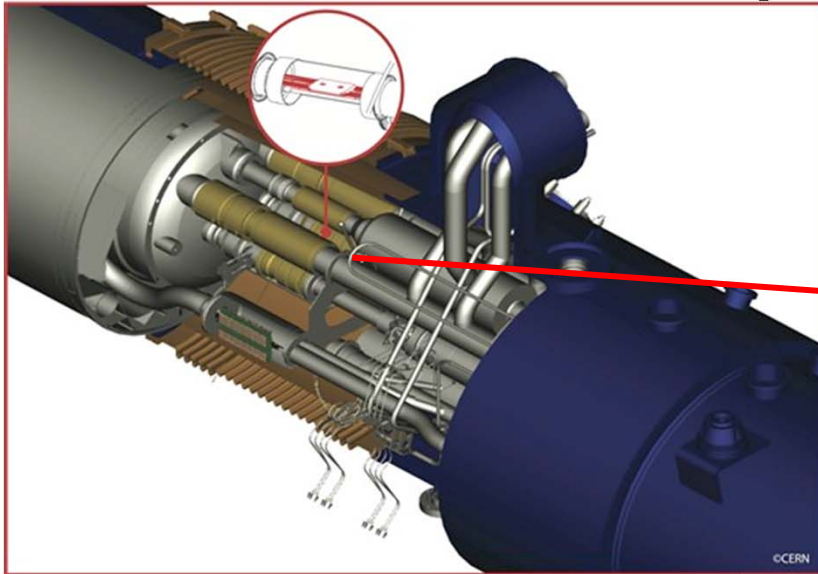
Risque de forte dissipation thermique en cas de transition supra -> résistif.

A éviter...

Car les conséquences sont surpression, perte He, givre et condensation, endommagements mécaniques des bobinages, des cryostats ou des appareils de proximité.



En cas de protection mal assurée...



**Incident LHC :
dysfonctionnement
d'une jonction entre
aimants**



Décharge rapide sur CMS (essais à 4 Teslas en surface – 2,7 GJ) avec transition (« maîtrisée ») de l'aimant

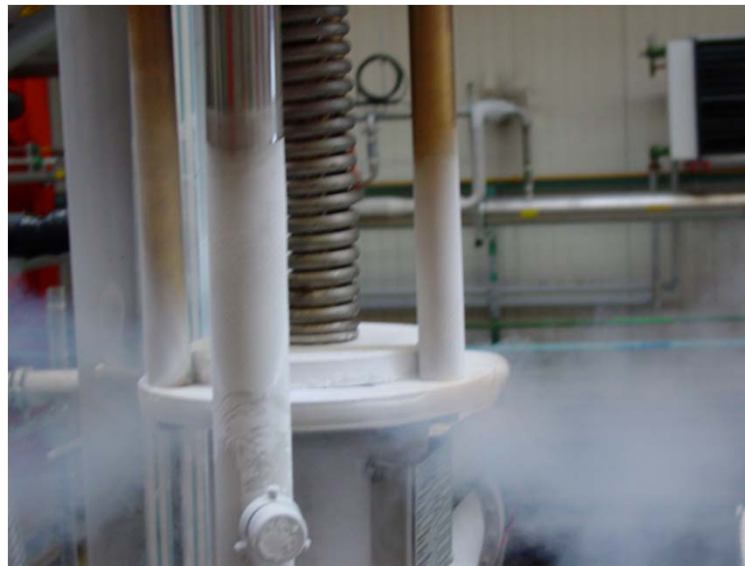


Quench « provoqué » sur aimant 8 Teslas (300 MJ)





500 litres de
LHe expulsés
en quelques
secondes, via la
soupape de
sécurité



Quench provoqué sur aimant supra pour le projet KATRIN (neutrino à KIT)
600 litres d'LHe vaporisé sous une pression relative de 0,5 bars (314 A- 35 H)



Aimants : énergie stockée et protection

Energie stockée dans un bobinage supra

Exemple des grands aimants des détecteurs du futur LHC au CERN:

$$E = L.I^2/2$$

où L est l' inductance du bobinage.

ATLAS bobine toroïdale L = **5 henry !!!** et I = 20000 A => **E = 1 GJ**

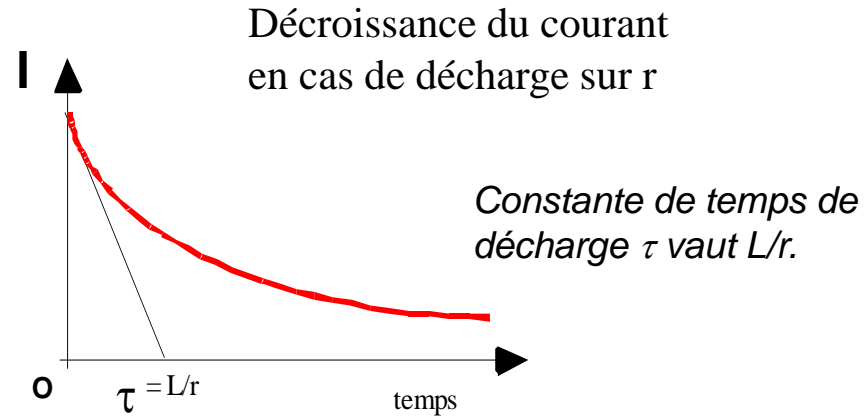
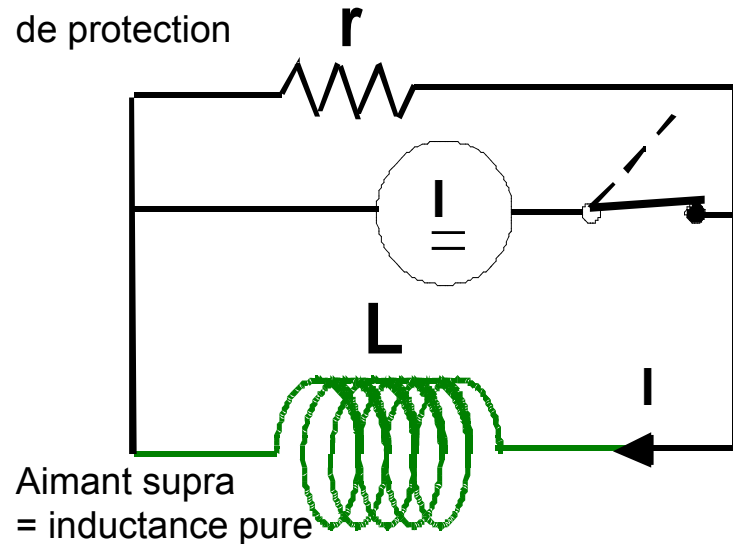
CMS solénoïde L = **6,55 henry !!!** et I = 20000 A => **E = 2,67 GJ**

Protéger un aimant c'est éviter que cette énergie électrique stockée ne puisse totalement, en cas de transition brutale (retour accidentel à l'état résistif = « **quench** »), se déposer sous forme de chaleur dans l'aimant et détruire par échauffement le bobinage ou son isolation.

En cas de transition du bobinage vers l'état résistif (Quench), le courant important qui circulait dans le supraconducteur doit être déchargé dans une résistance externe ou interne r de masse importante pour absorber toute l'énergie. (Toroïde supra ATLAS, r pèsera environ 8 tonnes !)

Aimants : énergie stockée et protection

résistance
de protection



La constante de temps de décharge τ vaut L/r .

Après quench, si la décharge est trop rapide (r grand), il y a risque de générer des tensions élevées aux bornes du bobinage ($R \neq 0$ et fort I et $L \cdot dI/dt$). Il y a risque de claquage avec la masse entourant la bobine et donc de destruction de l'isolation.

r est généralement choisie pour ne pas dépasser 1000 V en début de décharge. (ex de critère = isolation dimensionnée pour $2 \cdot U + 1000$)

Grands aimants : conducteur sur-stabilisé

Grands aimants = forte inductance (qq H) et fort courant (qq dizaines de kA)

La décharge n'est pas immédiate (à cause limite de la tension dans l'état résistif)

⇒ protéger le **bobinage résistif** d'un échauffement par **effet Joule** ($R \cdot I^2$)

⇒ **forcer la transition de tout le bobine** le plus vite possible (quench back ou chaufferettes) pour forcer le courant à aller vers la résistance de protection

⇒ ajout encore de la **matière autour des brins** supraconducteurs pour répartir le **courant dans une section plus importante**. En effet, en cas de transition, la résistance du cuivre ou de l'aluminium que l'on place autour du brin composite supraconducteur est nettement plus faible que celle du supraconducteur redevenu résistif ($\rho_{sc} \approx 10000 \cdot \rho_{mat.}$)

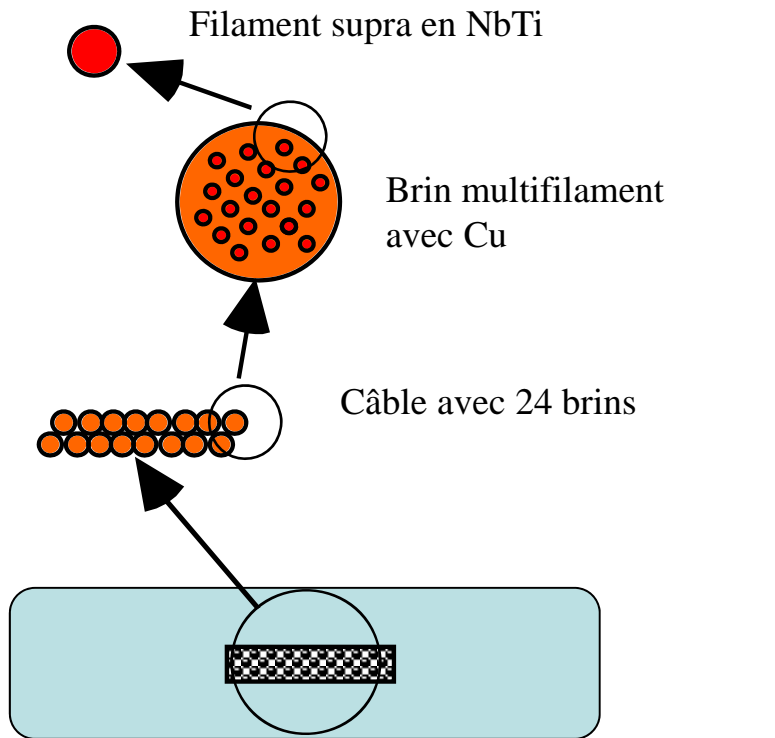
⇒ le **courant** passera donc préférentiellement **dans le stabilisant supplémentaire**.

⇒ le supplément de matière = **inertie thermique supplémentaire**

⇒ cela évite de dépasser 100 K lors du dépôt de chaleur par effet Joule (**en dessous de 100 K**, faibles variations dimensionnelles => **pas de dommages** sur la structure).

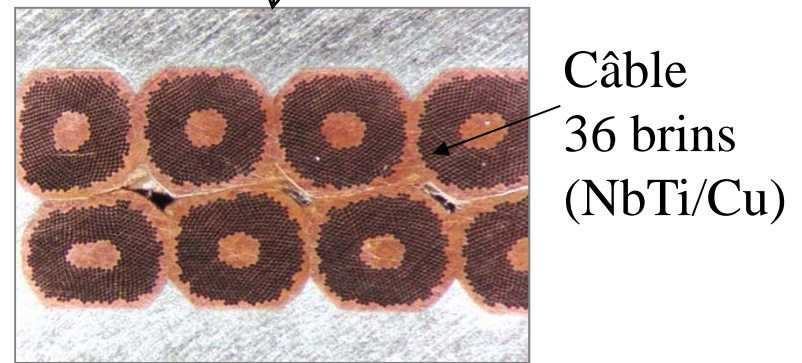
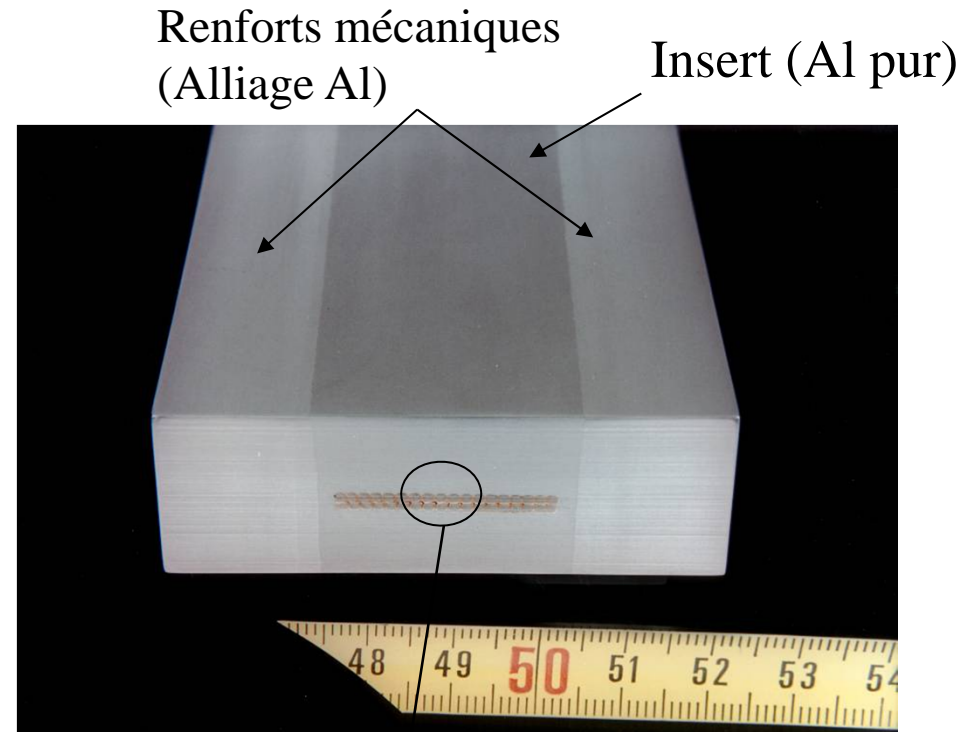
Grands aimants : conducteur sur-stabilisé.

Exemples :



Conducteur co-extrudé avec matrice Al de 57x12mm

Conducteur ATLAS toroïde (T=4.2 ,K)



Conducteur CMS Solénoïde (T=4.2 K)

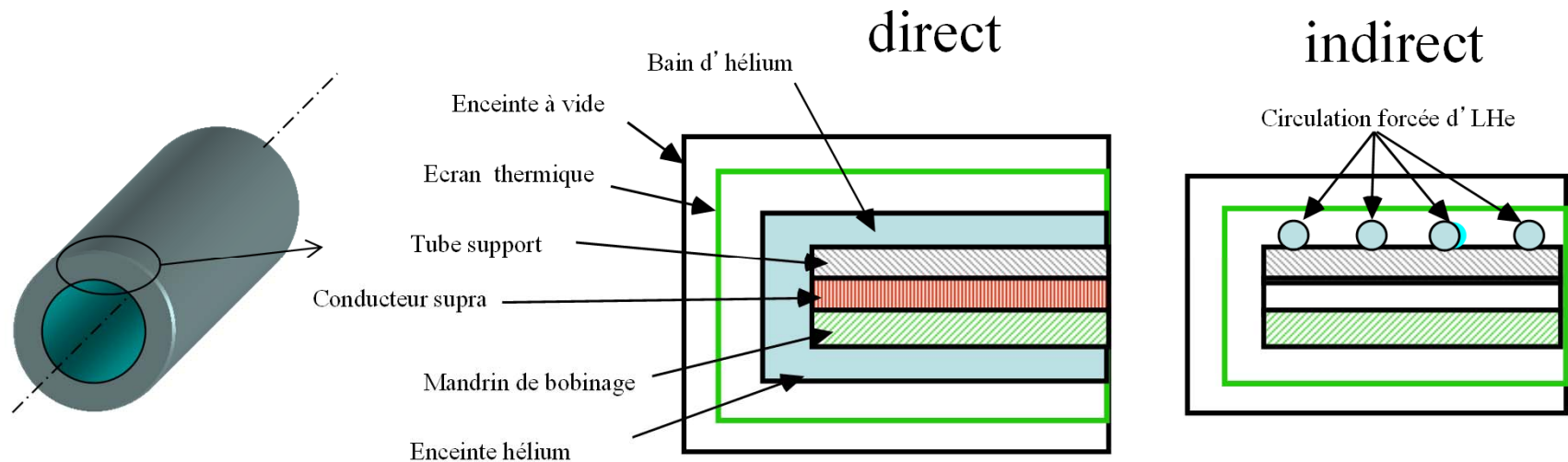
Refroidissement du câble ou du bobinage

Câble en bain d'hélium (refroidissement direct) :

Le câble (ou chaque brin composite) est en contact direct avec le fluide. L'utilisation d'hélium superfluide (1.8 K) par exemple permet la présence de liquide même dans des interstices de très petites tailles (entre câble). La bonne conductivité de ce fluide assure une excellente évacuation de la chaleur vers l'extérieur du bobinage. Cette technique est quelquefois complexe dans la réalisation du montage .

Refroidissement indirect par conduction :

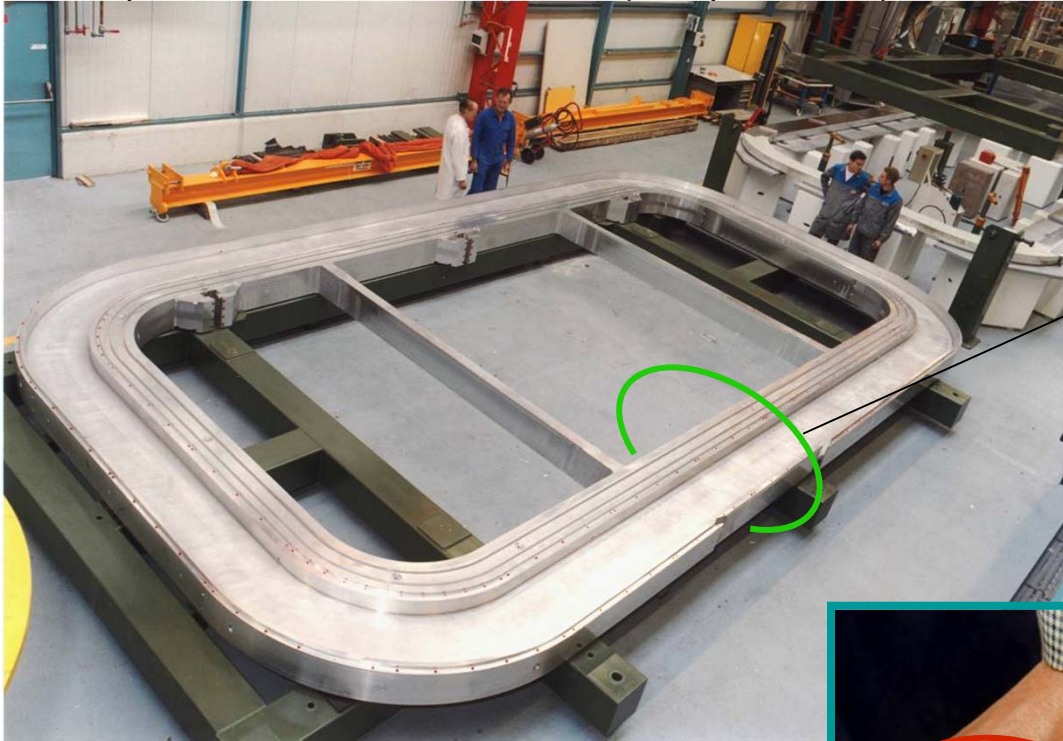
Le câble n'est pas en contact direct avec le fluide (*refroidissement indirect*). La chaleur à évacuer doit transiter par des éléments intermédiaires qui doivent parfaitement conduire la chaleur.



Exemple sur la coupe d' un aimant solénoïde

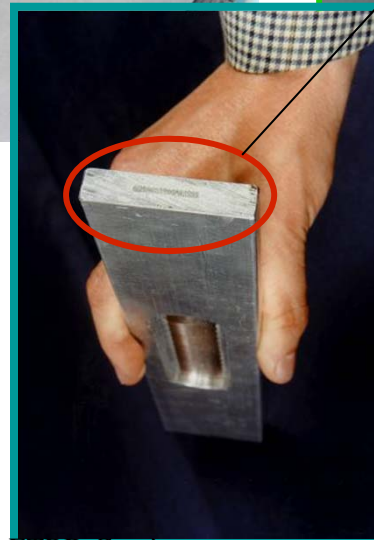
Refroidissement des bobines ATLAS

Refroidissement indirect par conduction solide:
exemple bobine toroïde ATLAS (maquette B0)

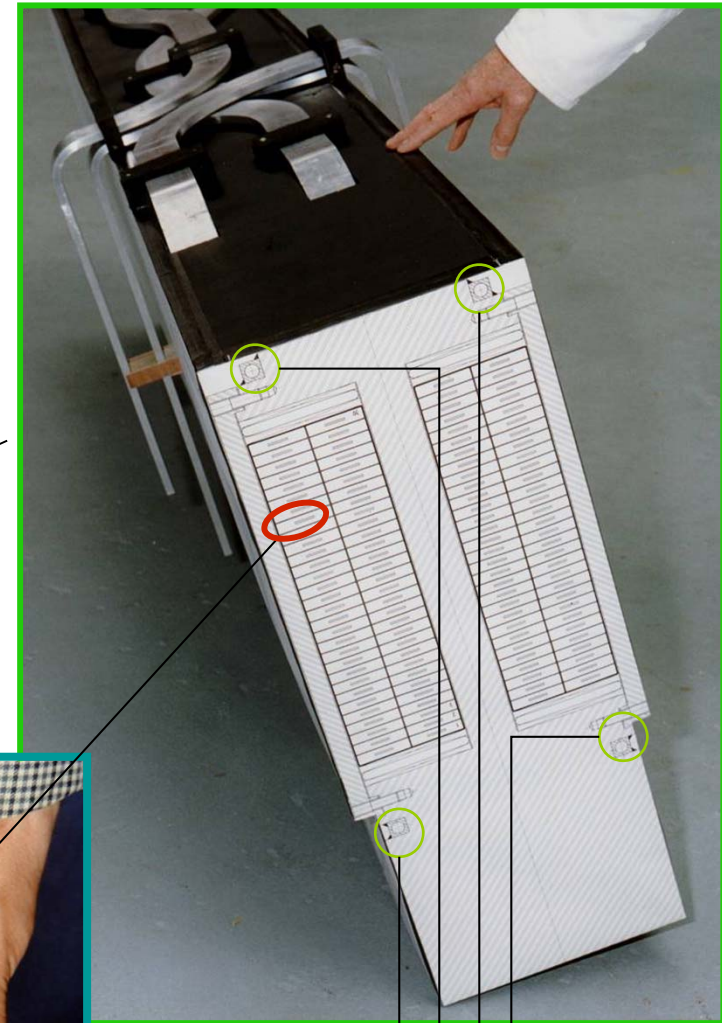


Support bobine en Al ATLAS (B0)

**Câble ATLAS
(≈ 20000 A)**

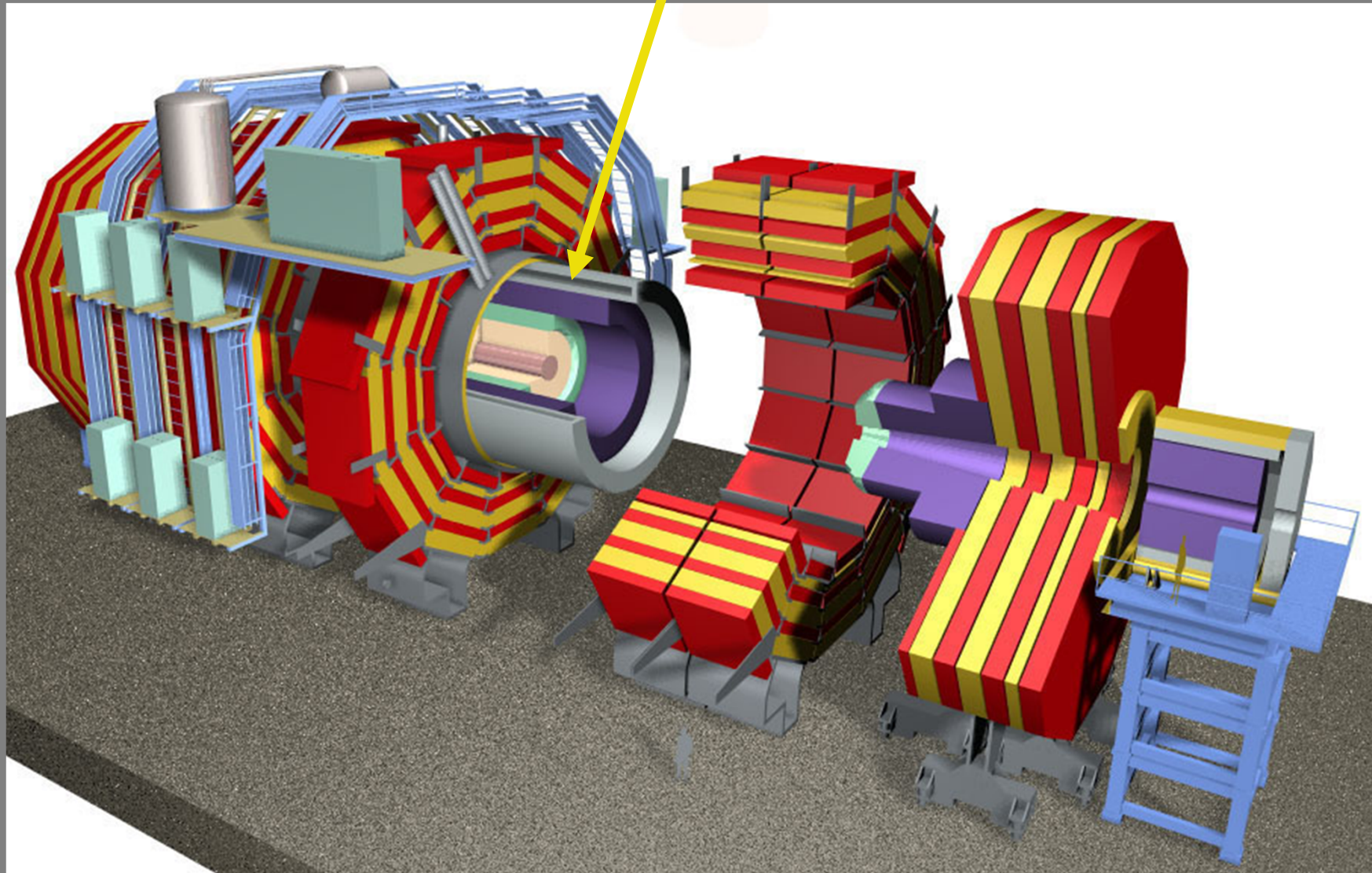


Coupe transverse de la masse froide



**Circuits de refroidissement
à 4,5 K (LHe)**

Solénoïde supraconducteur de l'expérience CMS



Réalisation des modules CMS



Réalisation des modules CMS



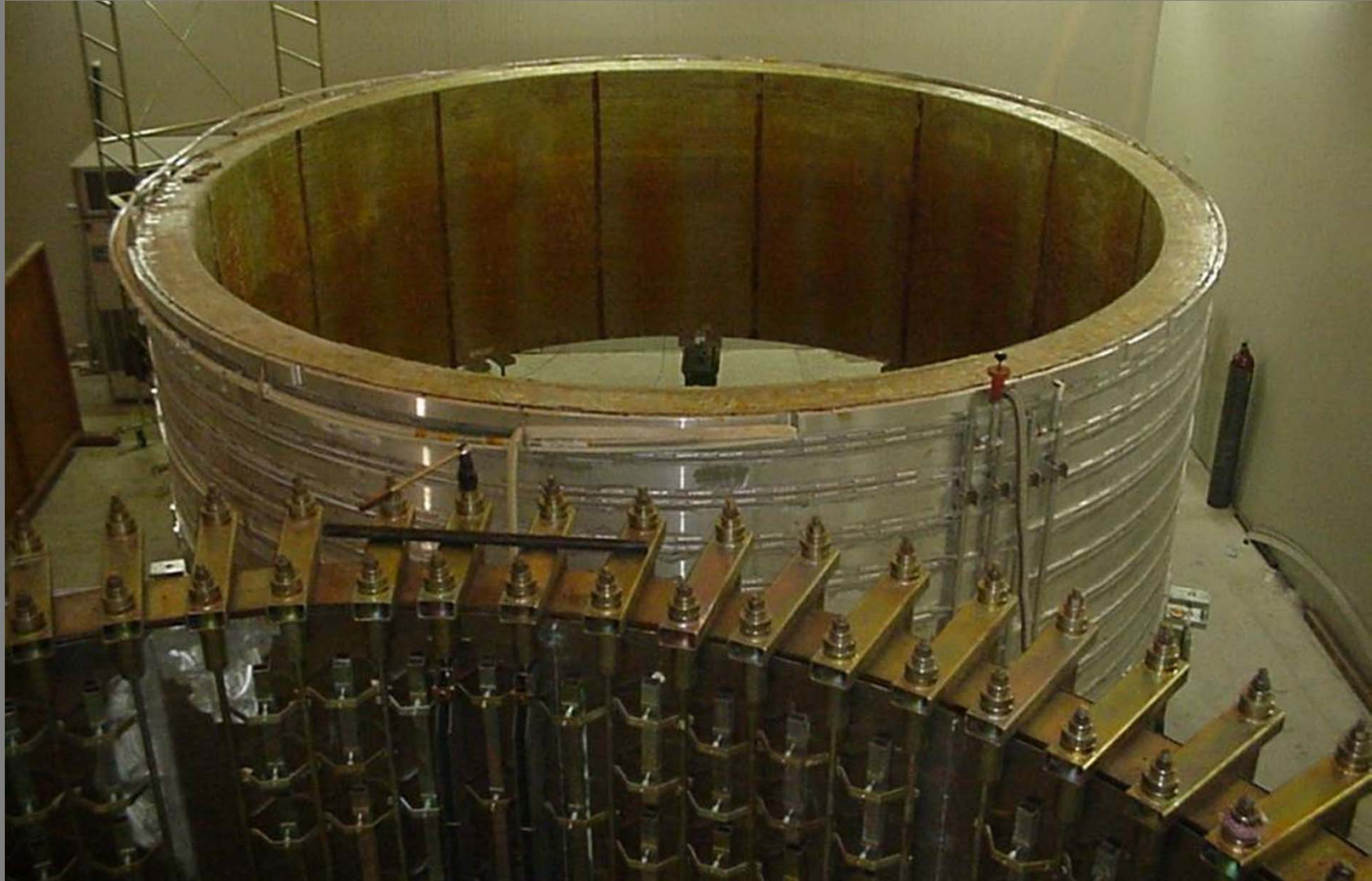
Bobinage d'un module CMS (4 couches)



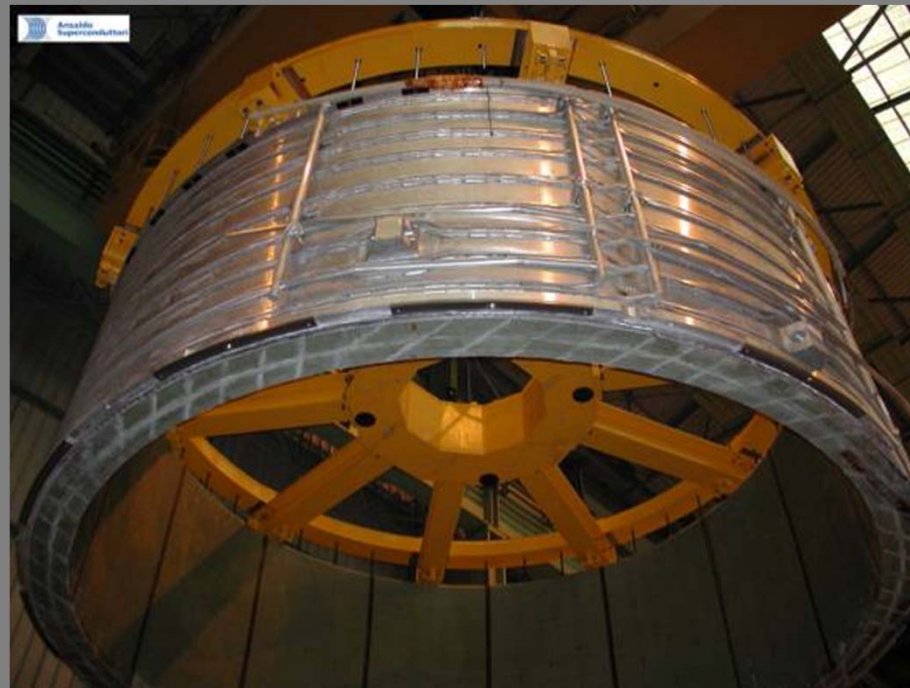
CMS : Bobinage imprégné avec résine



CMS : Bobinage imprégné avec résine



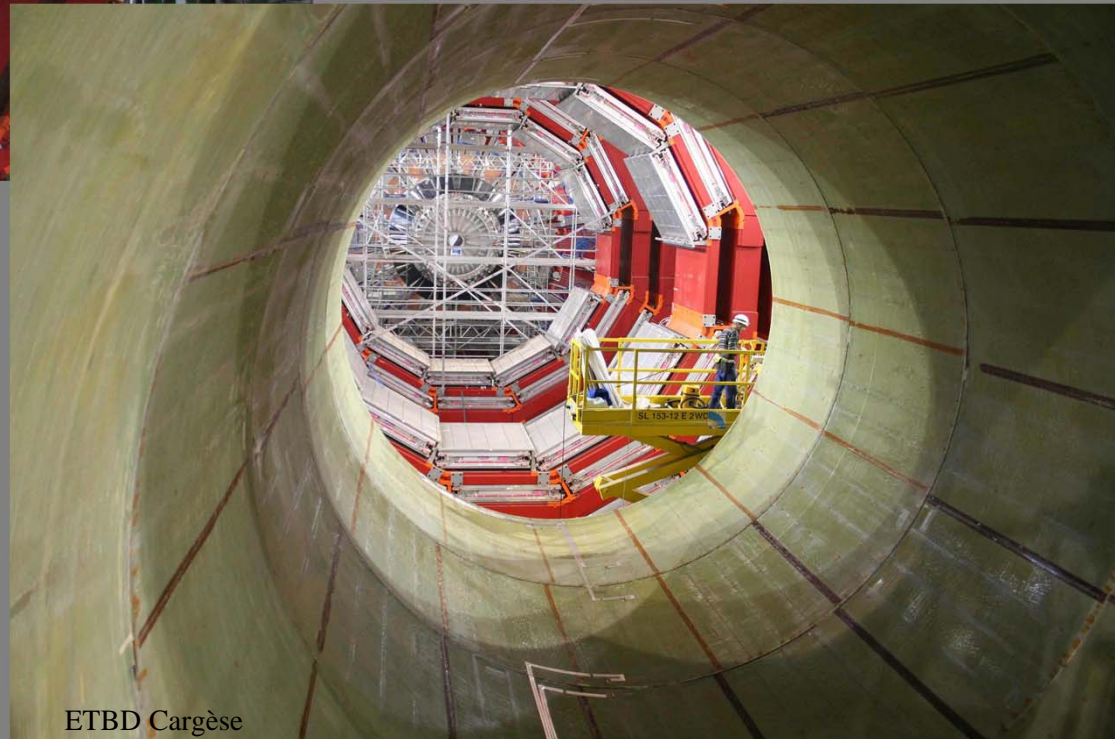
CMS : Manipulation de module réalisé



CMS : Empilement de modules et raccordement circuits LHe



CMS : 5 modules assemblés en une seule grande bobine



Avril 2013

ETBD Cargèse

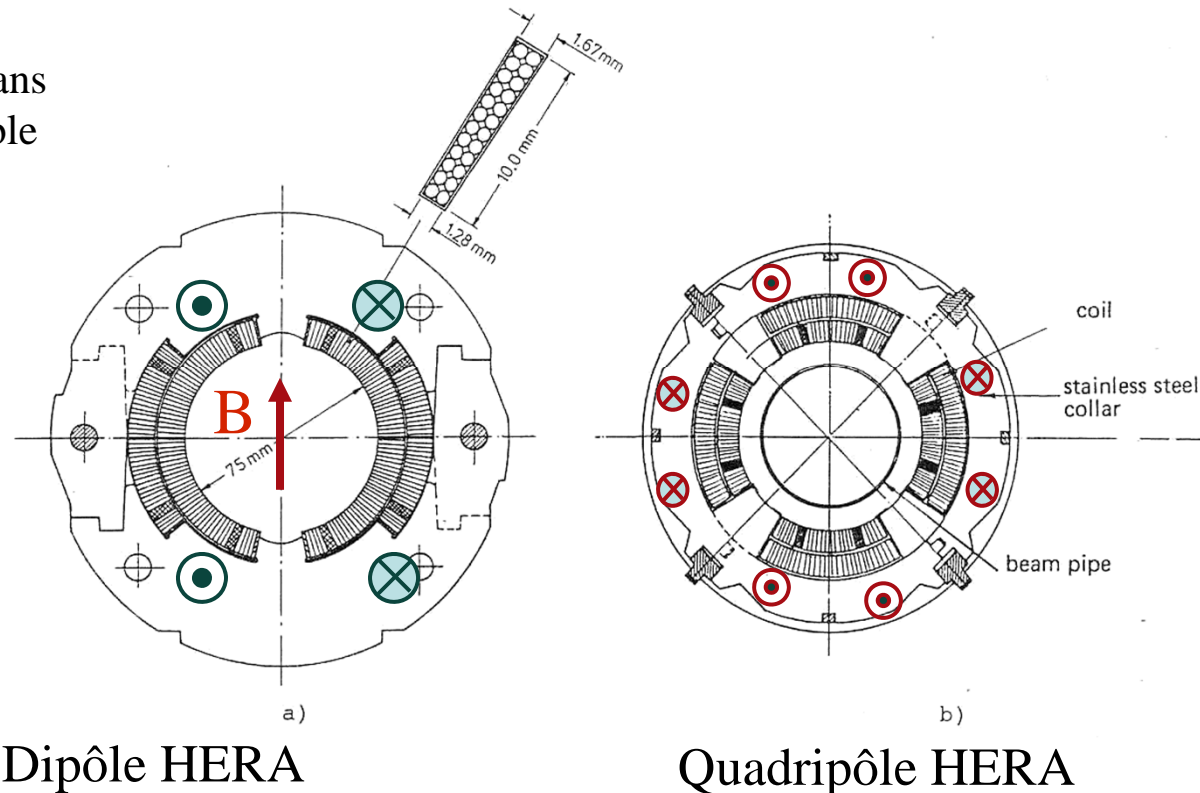
::::: Autres points de conception :::::

Tenue mécanique :

Les forts courants dans les aimants supraconducteurs engendrent des efforts énormes entre les câbles et sur les divers supports .

La reprise des énormes efforts magnétiques est réalisée mécaniquement soit par des systèmes de frette de proximité (aimant de focalisation ou de déviation) soit par la structure entourant le bobinage (cas des grands aimants ALEPH, CMS, BT ATLAS...).

Sens du courant dans le bobinage du câble



Autres points de conception :

Concentration , profil et homogénéité du champ magnétique :

La présence d'une « masse magnétique » froide (dans le cryostat) ou chaude (autour du cryostat) permet d'augmenter le flux magnétique dans l'aimant.

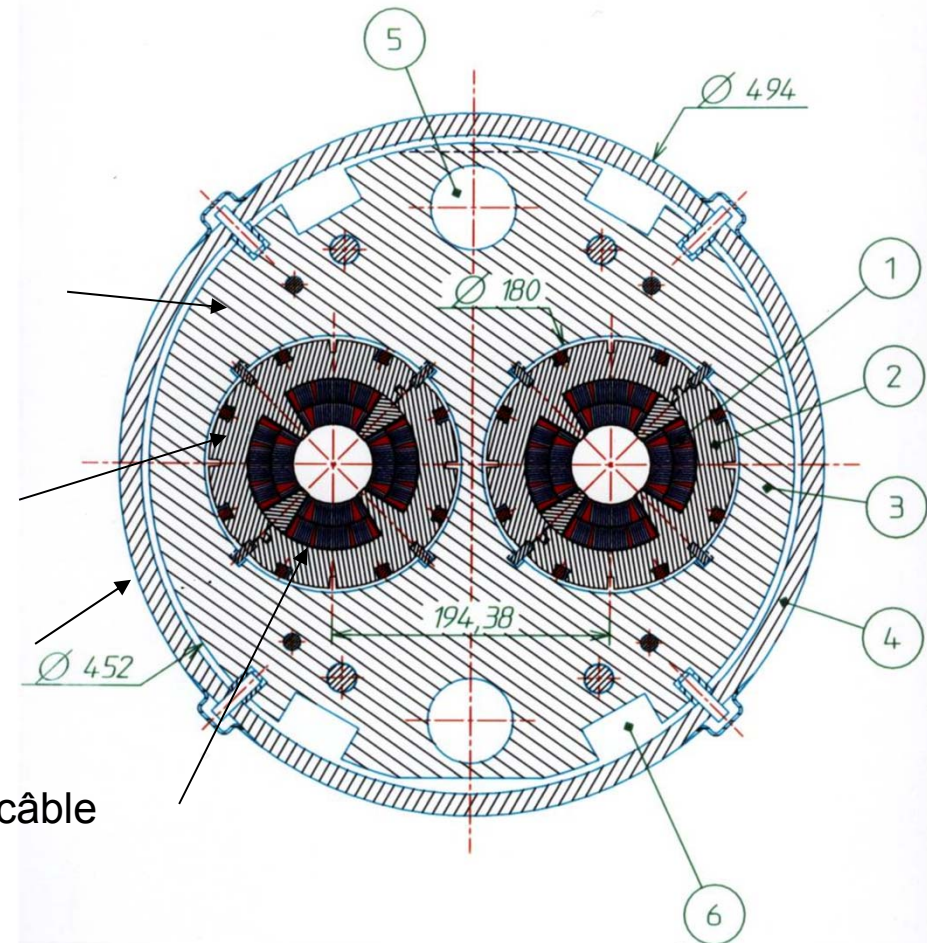
Exemple d'un double quadrupôle LHC

Masse magnétique en fer

Frette en inox amagnétique

Enceinte Hélium

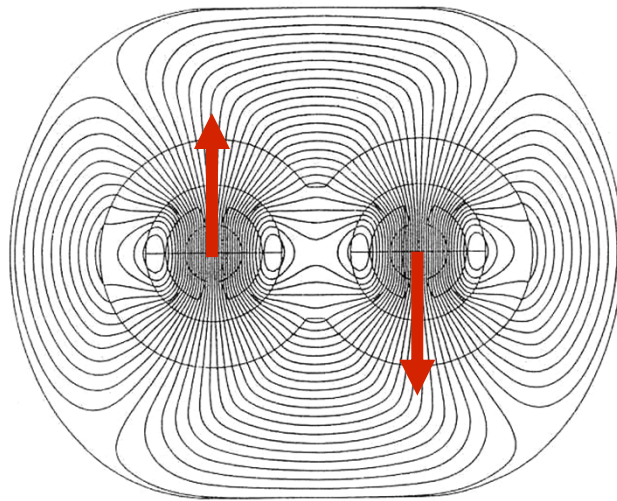
Bobinages câble



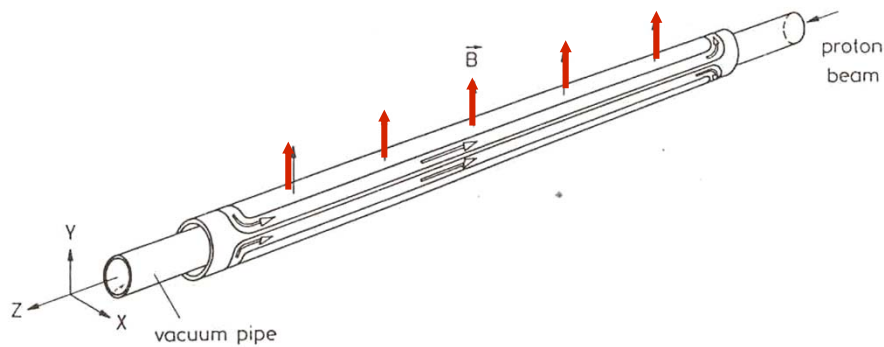
Autres points de conception :

Carte de champ magnétique

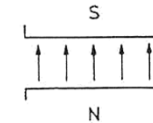
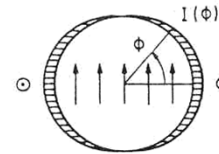
La forme et le nombre des bobinages intervient sur le profil de champ recherché. L'homogénéité est réglée par la qualité du bobinage et d'éventuelles bobines supplémentaires de correction.



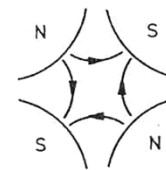
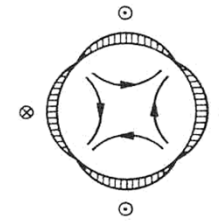
Dipôle 2 en 1 LHC



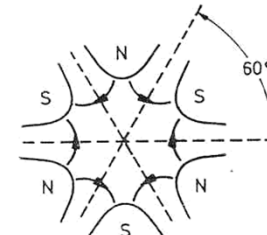
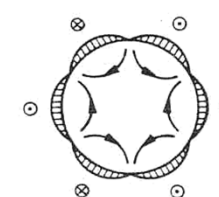
Dipole $I(\phi) = I_0 \cos \phi$



Quadrupole $I(\phi) = I_0 \cos 2\phi$



Sextupole $I(\phi) = I_0 \cos 3\phi$



Exemple de fabrication :

Les quadrupôles supraconducteurs

pour l' accélérateur HERA à DESY - HAMBOURG (D).
1989

Prototypes réalisés par CEA
Séries faites par NOELL (D) et GEC-ALSTHOM (F)

