

Burillon

2ème Thèse

APPLICATIONS DE LA SUPRACONDUCTIVITE

Bernard AUBERT

Juin 1964

2ème Thèse

APPLICATIONS DE LA SUPRACONDUCTIVITE

=====

Bernard AUBERT

Juin 1964

INTRODUCTION

La supraconductivité a été découverte en 1911 par Kamerlingh Onnes. La connaissance de ce phénomène s'est faite assez lentement et demeure encore très incomplète. Dès le début, l'utilisation des propriétés supraconductrices, notamment pour la production de champs magnétiques, a été envisagée.

En 1913 Onnes a construit une bobine lui donnant quelques centaines de gauss, en 1929 de Haas et Vogd trouvaient que certains supraconducteurs permettaient d'espérer des limites supérieures à 20.000 gauss.

Enfin en 1961, Kunzler mettait en évidence un champ de 88.000 gauss avec une densité de courant de 150.000 A/cm^2 pour un fil de Nb_3Sn .

Du point de vue théorique c'est également ces dernières années que la situation a évolué grâce à la théorie d'une interaction électron-phonon proposée en 1957 par Bardeen, Schrieffer et Cooper.

Nous donnerons un rappel des propriétés des corps supraconducteurs et nous envisagerons les possibilités existant à l'heure actuelle, d'utiliser ce phénomène pour obtenir des champs magnétiques élevés.

I - LA SUPRACONDUCTIVITE

1°) Définitions

a) Résistance nulle

Au-dessous d'une certaine température appelée "température critique" T_c , on observe l'annihilation complète de la résistance.

La limite supérieure de la résistivité est actuellement $10^{-23} \Omega \cdot \text{cm}$ (Quinn et Ittner J. Applied Physics 33, 748, 1962).

La température critique varie avec les éléments, elle est de l'ordre de quelques °K.

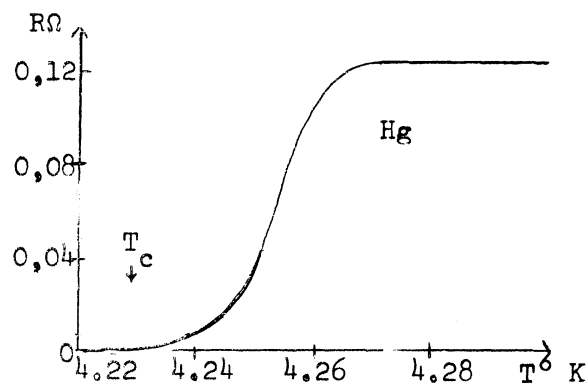


Fig. 1 - Variation de résistance du mercure avec température d'après K. Onnès

b) Champ critique

A une température inférieure à T_c il est possible de rétablir une conductivité normale en appliquant un champ magnétique extérieur. La valeur de ce champ est fonction de la température. Il varie entre H_0 à $T = 0^\circ \text{ K}$ et zéro pour $T = T_c$. On l'appelle "champ critique" H_c et l'on a approximativement :

$$H_c = H_0 \left| 1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right|$$

Les champs critiques des premiers supraconducteurs trouvés sont de quelques centaines de gauss.

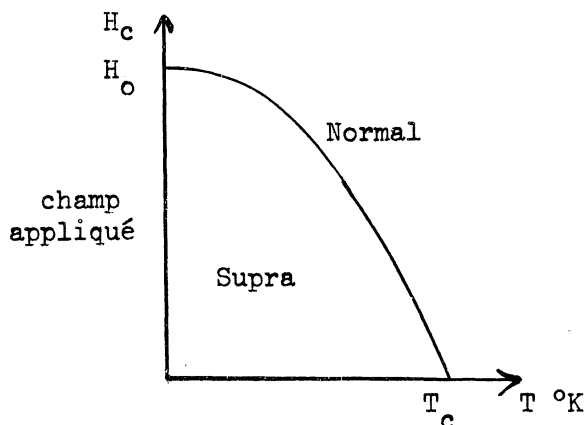


Fig. 2

c) Intensité critique

Un fil supraconducteur transportant un courant induit un champ magnétique, lorsque l'intensité du courant est telle que le champ est égal à H_c , le supraconducteur redevient normal. Cette intensité est l'intensité critique. La densité de courant correspondante est de l'ordre de 10^4 A/cm².

d) Corps supraconducteurs

Il existe un grand nombre de corps supraconducteurs connus actuellement. Des composés ou alliages de corps supraconducteurs ou non peuvent également être supraconducteurs. Il en existe dont la température critique est très voisine de 0° K. La température critique la plus élevée est $18,1^{\circ}$ K pour Nb_3 Sn. Le tableau I donne les valeurs de T_c et H_c pour quelques éléments.

Pour avoir une liste plus générale on consultera B.W. Roberts "Superconducting materials and some of their properties" Général Electric Report N° 61 - RL - 2744 M.

Elément	T_c (° K)	H_0 (gauss)
Indium	3,407	283
Etain	3,722	306
Mercure α	4,153	411
β	3,95	340
Niobium	9,46	1944
Plomb	7,18	803
Tantale	4,482	830
Vanadium	5,30	1310

Tableau I

2°) Interprétation microscopique

La théorie de la supraconductivité est récente. C'est en 1957 que Bardeen Cooper et Schrieffer (P.R. 108, 1175, 1957) ont proposé une interaction entre électrons qui permet de rendre compte des propriétés connues expérimentalement.

Dans un métal ordinaire les électrons de conduction ont des spectres d'énergie pratiquement continus. Ils peuvent changer de niveaux. Normalement en l'absence de champs électrique ou magnétique le déplacement d'un électron de moment $\vec{p}$ est statistiquement accompagné du déplacement d'un électron de moment $-\vec{p}$ et globalement il n'y a pas de courant.

En présence d'un champ les électrons sont accélérés. Ceci détruit la symétrie existante et change la population des niveaux d'énergie. Lorsqu'on enlève le champ, la répulsion entre les électrons et la diffusion rétablissent la distribution normale.

D'après Bardeen, Cooper et Schrieffer, la supraconductivité est due à une attraction entre électrons. Un électron qui se déplace à travers un réseau cristallin est entouré d'un nuage de phonons virtuels (phonon : quantum d'énergie de vibration du réseau). A son passage le réseau se trouve déformé ; cette déformation en se propageant crée une attraction sur un deuxième électron. La supraconductivité apparaît lorsque cette attraction entre deux électrons par échange de phonons l'emporte sur la répulsion habituelle de Coulomb.

Les électrons tels que l'interaction avec les phonons puisse produire cet effet, sont situés dans une mince couche au voisinage de la surface de Fermi. Cooper (Am. Journal of Physics, 28, 91, 1960) a montré que toutes les paires liées doivent avoir la même quantité de mouvement totale K et, que la distribution des K présente un maximum très aigu pour $K = 0$. En conséquence, l'état de base supraconducteur est un état fortement corrélé, dans l'espace des quantités de mouvement les états électroniques normaux situés dans une mince couche près de la surface de Fermi sont occupés au maximum par des paires de spins et de quantités de mouvement opposées.

Ceci se traduit par la présence d'une bande interdite dans le spectre d'énergie d'un électron. Car changer la quantité de mouvement d'un électron implique la destruction de l'équilibre supraconducteur.

La largeur de la bande séparant l'état supraconducteur de l'état normal est fonction de la température, elle varie entre $3 k T_c$ à $T = 0^\circ K$ et zéro à $T = T_c$. A la température critique les deux états se rejoignent ce qui produit "l'évaporation" de la distribution compacte produisant la supraconductivité.

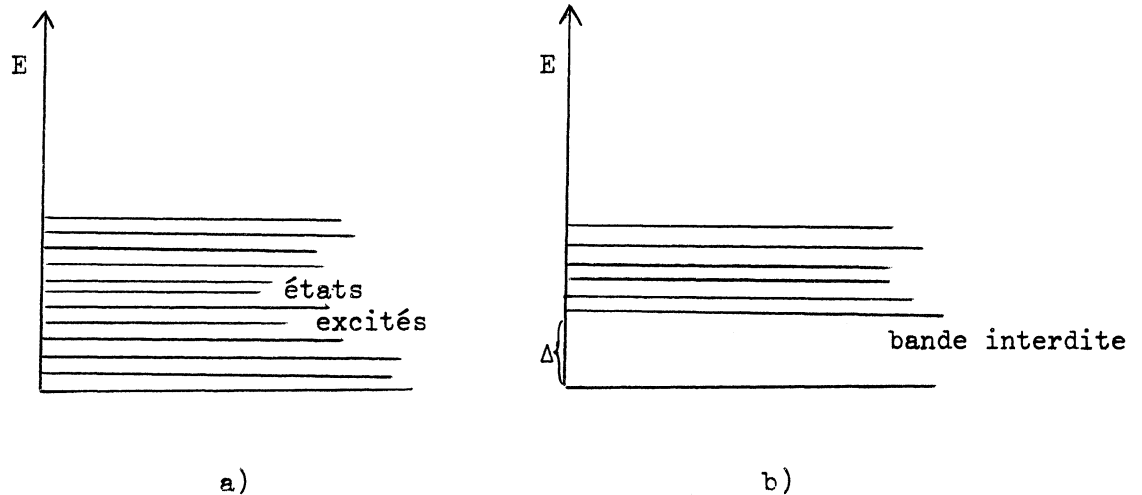
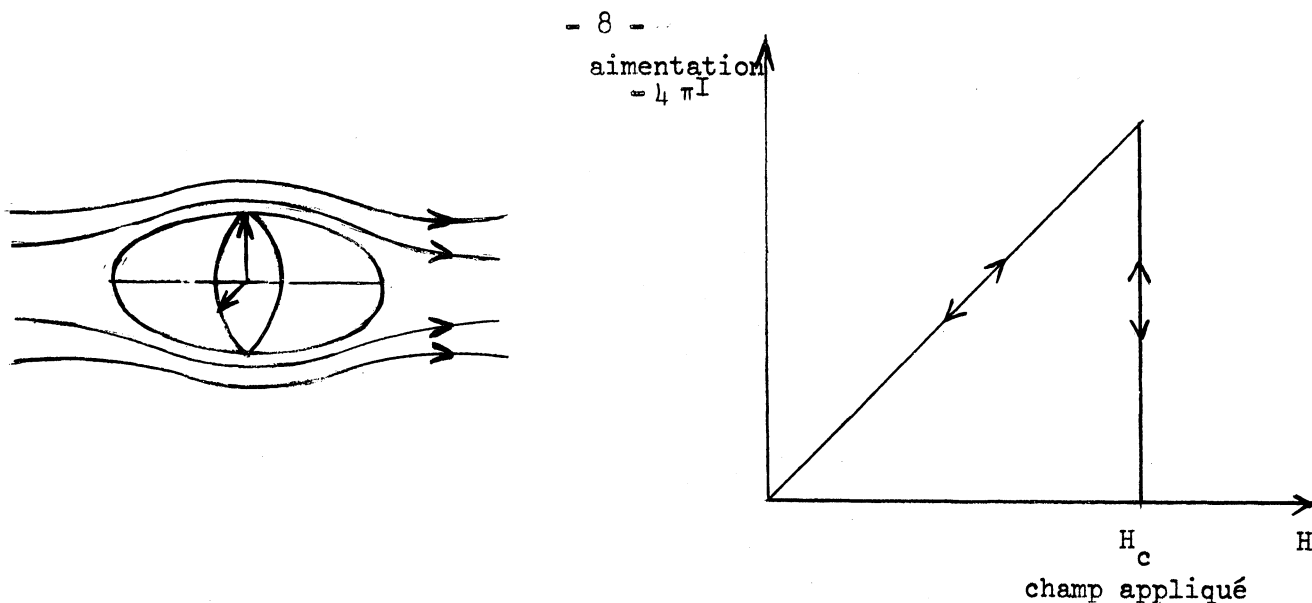


Fig. 3 - Spectre d'énergie d'un électron
a) normal
b) supraconducteur

En présence d'un champ électrique les électrons supraconducteurs sont accélérés et on obtient un moment global K' identique pour toutes les paires. La diffusion d'un électron isolé entraînera des fluctuations autour de la valeur globale. La probabilité qu'une telle diffusion puisse changer la valeur commune K' , c'est-à-dire fasse traverser la bande interdite à l'électron supraconducteur, est très rare, de sorte que le courant représenté par K' continuera indéfiniment.

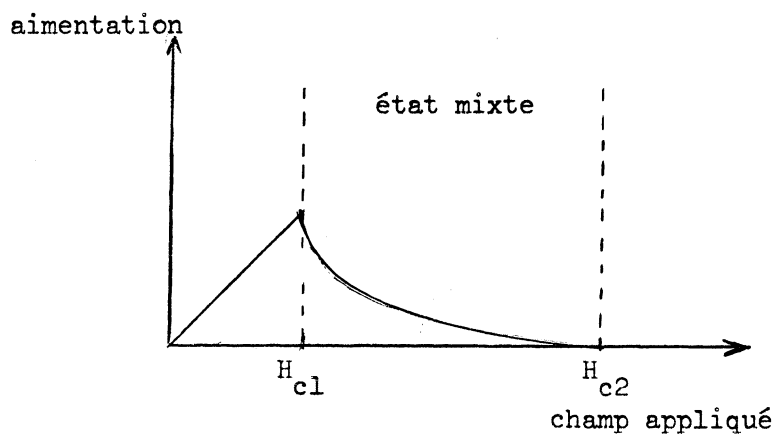
3°) Différents types de supraconducteurs

Meissner et Ochsenfeld (Naturwis 21, 787, 1933) ont montré que lorsque un cylindre supraconducteur est placé dans un champ magnétique, les lignes de forces sont chassées à l'extérieur. A l'intérieur du cylindre $B = 0$ et le supraconducteur est donc un corps parfaitement diamagnétique. Lorsqu'on augmente le champ H , le diamagnétisme disparaît lorsque $H = H_c$



Il existe des courants induits qui tendent à protéger l'intérieur du supraconducteur. La théorie de London conduit à admettre une pénétration exponentielle du champ à l'intérieur du cylindre, pénétration caractérisée par une longueur λ (λ est de l'ordre de quelques centaines d'Angstroms). Les courants induits dans un supraconducteur le sont dans une pellicule d'épaisseur λ .

La théorie quantique de Ginzburg Landau a conduit Abrikosov (1957) à prédire l'existence de supraconducteur d'un deuxième type. Ceux-ci ont été effectivement mis en évidence peu après (Kunzler 1961). Leur principale caractéristique est montrée par la courbe d'aimantation.



Il existe donc un état mixte après le champ critique H_{c1} qui supprime le diamagnétisme, cet état est encore supraconducteur, les lignes d'induction pénètrent à l'intérieur du supraconducteur qui est traversé par des lignes de flux à structure filamentaire.

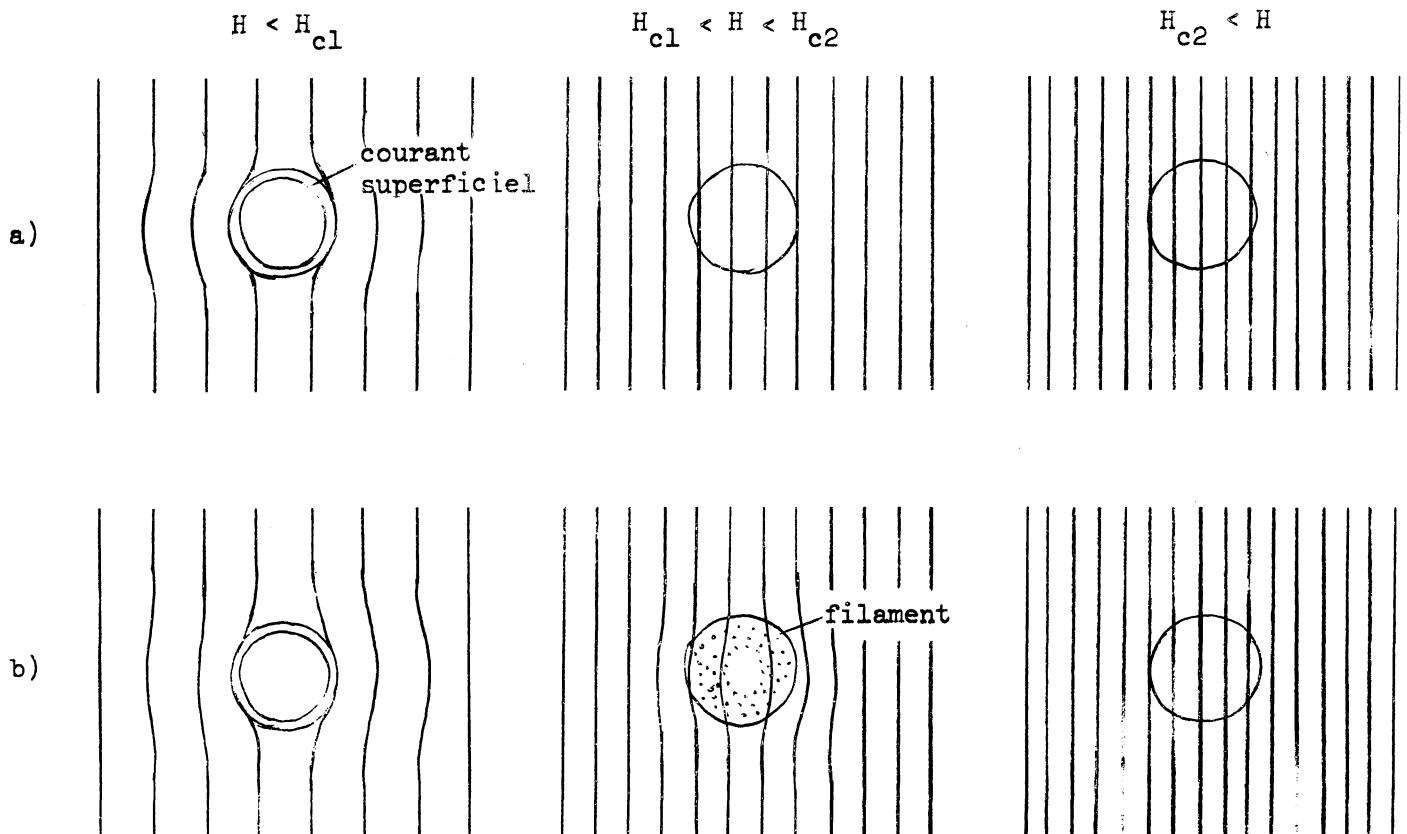


Fig.6 - Effet du champ magnétique

a) supraconducteur type I

b) supraconducteur type II

Alors que le champ critique H_{c1} est de l'ordre de quelques centaines de gauss, le deuxième champ critique H_{c2} peut aller jusqu'à plusieurs centaines de mille gauss.

Les supraconducteurs du type II sont en général des alliages et c'est leur mise en évidence qui a ouvert la possibilité d'utiliser les bobines supraconductrices.

Le tableau II donne les caractéristiques des alliages les plus courants :

Elément	H_c (gauss)	T_c (° K)
Nb ₃ Sn	~ 350.000	18,5
V ₃ Ga	~ 500.000	14,5
Nb Zr	~ 110.000	10,8
Nb Ti	~ 110.000	9,7

Tableau II

Signalons qu'il n'existe pas à l'heure actuelle de théorie complète des supraconducteurs du type II.

II - AIMANTS SUPRACONDUCTEURS

Depuis trois ans de nombreux espoirs sont permis quant à la construction de bobines supraconductrices. Cependant les projets établis en 1961 sont soit abandonnés, soit très en retard. La bobine de 25 cm de diamètre construite à Argonne pour être utilisée avec une chambre à bulles, prévue pour 50 K gauss ne donne à l'heure actuelle que 33 K gauss. Ceci représente cependant une performance car les bobines courantes sont de très petites dimensions. On peut obtenir 100 K gauss pour un diamètre de 0,5 cm. Il existe à Saclay une bobine produisant 36 K gauss pour un diamètre intérieur de 10 cm, construite par Krikorian.

Ces considérations mettent en relief le fait que la technique des bobines supraconductrices de grandes dimensions se heurte à des difficultés que nous allons passer en revue.

1°) Les matériaux supraconducteurs

Les premiers matériaux supraconducteurs permettant d'atteindre des champs élevés et de bonne densité de courant sont les alliages. Parmi ceux-ci le Nb_3Sn est celui qui a été utilisé en premier, mais ces propriétés électriques avantageuses ne compensent pas les difficultés mécaniques que l'on rencontre dans sa préparation. Aussi ce sont les alliages NbZr qui sont le plus couramment utilisés et qui peuvent être trouvés commercialement. Le V_3Ga fait encore partie du domaine de la recherche.

Les propriétés d'un fil supraconducteur sont mises en évidence par une courbe caractéristique I_c fonction de H . Celle-ci est obtenue en plaçant le fil dans un champ magnétique extérieur perpendiculaire au fil et en augmentant l'intensité parcourant ce fil.

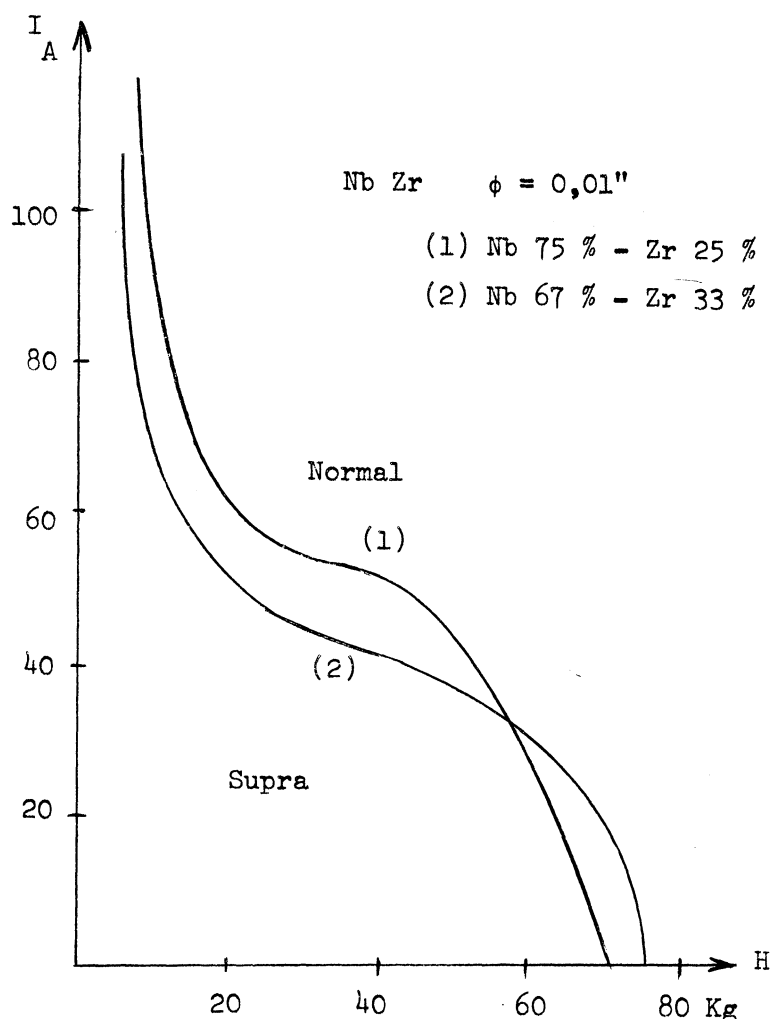


Fig. 7 - Courbes caractéristiques des alliages NbZr proposés commercialement par la firme "Supercon".

Parmi les alliages de NbZr les propriétés varient avec les dosages. Les deux compositions courantes sont Nb 67 % Zr 33 % et Nb 75 % et Zr 25 %. Les caractéristiques électriques varient avec le mode de fabrication ce qui fait que l'on n'obtiendra pas obligatoirement les mêmes performances avec deux fils du même alliage.

Une amélioration importante a été obtenue en recouvrant le fil de NbZr d'une fine couche de cuivre (23 μ). L'intensité critique est passée pour un échantillon déterminé de 23 A à 60 A. Un nouveau fil proposé est constitué de 7 brins torsadés dans une gaine en nylon.

Il semble que l'on puisse obtenir de bonnes propriétés électriques avec des prix avantageux en utilisant des composés supraconducteur-isolant (Mercure dans du verre poreux) et supraconducteur-supraconducteur (Plomb, aluminium par exemple).

En résumé, la recherche de l'élément supraconducteur qui permettra d'obtenir de bonnes caractéristiques à un prix avantageux est en pleine évolution.

2°) Dégradation du courant

Les caractéristiques obtenues avec un fil supraconducteur ne seront pas celles obtenues avec le même fil bobiné. Ce phénomène appelé "dégradation du courant" est très important pour les réalisations de grosses bobines.

La figure illustre ce phénomène pour un fil de NbZr 25 %. Cet effet ne doit pas être interprété brutalement. On pourra se rapprocher de la courbe du fil en utilisant quelques techniques telles que celle de l'habillage du fil par une pellicule de cuivre ou par un isolant.

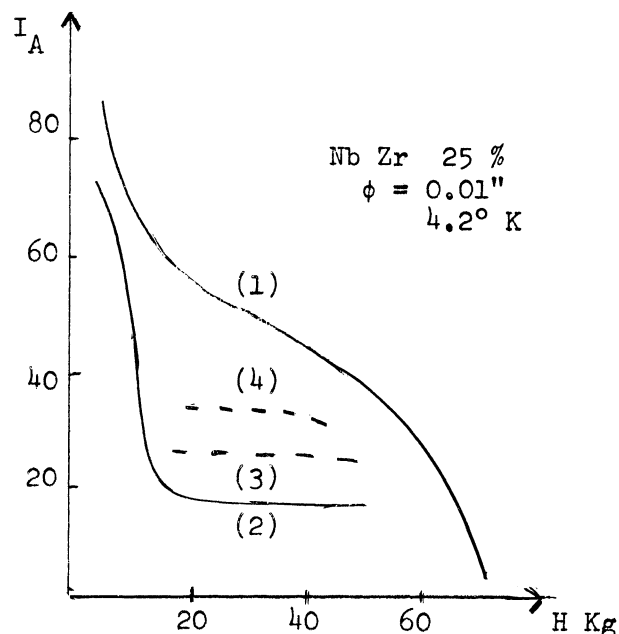


Fig. 8 - Courbes caractéristiques

- (1) échantillon
- (2) bobine
- (3) le même fil recouvert de Cu
- (4) le même fil recouvert d'isolant imprégné d'une résine contenant une poudre de Al_2O_3 .

L'explication de ce phénomène est encore assez diffuse. Toutefois Rosner et Schadler (J. applied Phys. 34, 2107, 1963) ont obtenu pour un fil la même caractéristique que pour une bobine en plaçant ce fil dans un champ magnétique augmentant en même temps que l'intensité que parcourt le fil. Ceci permet de

rechercher dans l'action du champ d'une spire sur les électrons parcourant les spires voisines, l'explication du phénomène de dégradation.

3°) Dissipation de l'énergie

Lorsque la bobine supraconductrice redevient normale, elle doit dissiper en très peu de temps toute l'énergie emmagasinée. Lors de cette dissipation il se produit des échauffements brusques qui vaporisent le bain d'hélium liquide servant au refroidissement de la bobine. Un litre d'hélium vaporisé correspond à une énergie dissipée de 2,6 K joules. Pour une grosse bobine une telle vaporisation pourrait donc devenir explosive. Il faut que la transition "supraconducteur → normal" ait une constante de temps importante. A cet effet on shunt la bobine par une résistance.

La constante de temps est différente pour chaque bobine. Les premières bobines utilisées avait des constantes de temps de l'ordre de la milliseconde (Fields Réf. 5). La bobine de Krikorian (Saclay) a une constante de temps de quelques secondes ce qui fait que la variation de pression due à la vaporisation de quelques litres d'hélium n'est pas dangereuse (de l'ordre de 200 g/cm²).

4°) Prix

Les alliages actuellement disponibles de NbZr vallent approximativement 500 dollars la livre aux Etats-Unis.

Fields(Réf. 5) a comparé le prix des bobines nécessaires pour produire un champ de 40 KG dans une région de 100 cm de long et de 150 cm de diamètre, il donne :

- a) bobine supraconductrice : prix voisin de 1.000.000 dollars
- b) bobine classique (y compris la puissance nécessaire au fonctionnement pour 6.000 heures) : prix voisin de 1.300.000 dollars.

En France le prix du matériau supraconducteur doit être augmenté des frais de douane.

Si on augmente le champ demandé, la balance doit aller en faveur du supraconducteur.

La Compagnie Générale d'Electricité a fait une étude permettant d'envisager la variation du poids de supraconducteur avec le champ magnétique.

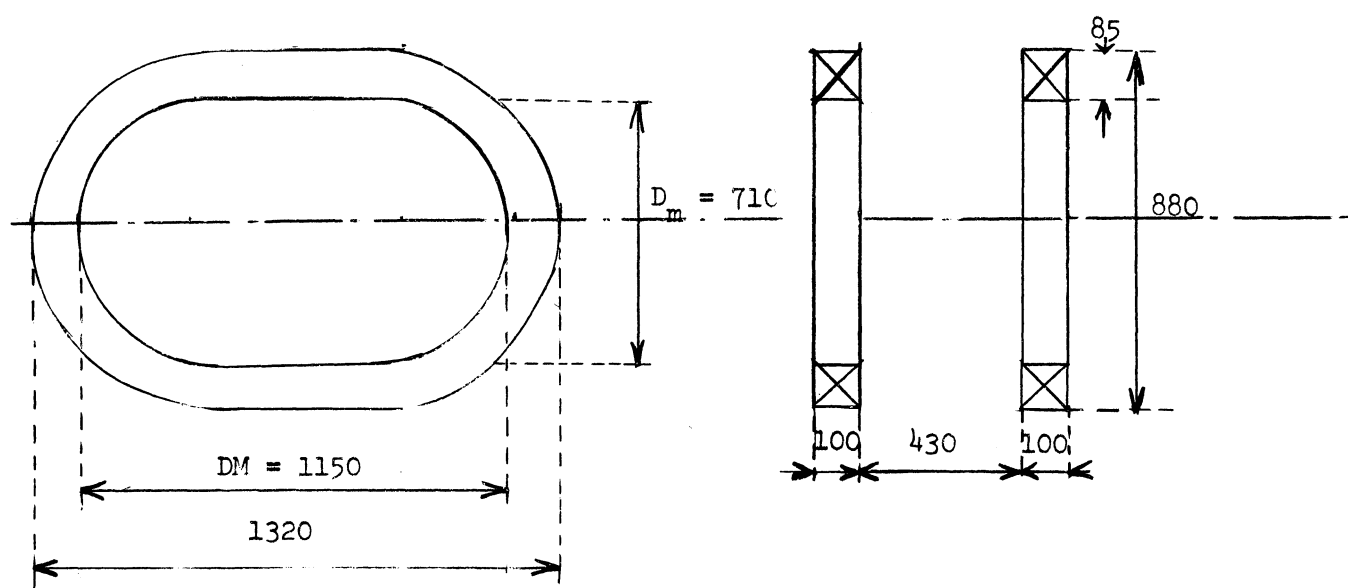


Fig. 9 - Dimension de la bobine étudiée par la C.G.E.

Champ	16 K gauss	21 Kg	40 Kg
Longueur de la bobine	10 cm	10 cm	14 cm
Poids du fil	130 Kg	175 Kg	375 Kg

Pour les champs ordinaires le prix du composé supraconducteur est trop élevé par rapport au prix du cuivre.

Il est évident que la situation peut changer avec la mise en évidence de composés plus avantageux.

Il ne semble pas y avoir des difficultés spéciales dans les techniques de cryostat. Le calcul de celui-ci doit être fait en vue de réduire la consommation d'hélium liquide et d'azote durant le fonctionnement de la bobine, et de pouvoir résister aux surpressions lors de la transition "supraconducteur — normal".

En conclusion si à l'heure actuelle les bobines supraconductrices donnent la possibilité d'obtenir un champ magnétique élevé sur un faible volume et avec un encombrement réduit il faut attendre que la technologie des supraconducteurs est fait des progrès importants pour permettre des champs forts dans de grands volumes ou des champs conventionnels à un prix avantageux.

III - AUTRES APPLICATIONS

La principale de celles-ci est la "mémoire supraconductrice" basée sur le principe simple suivant : un fil supraconducteur à l'intérieur d'une bobine sera rendu résistant lorsque cette bobine est parcourue par un courant engendrant un champ supérieur à H_c .

i_1	fil (2) :	Logique
0	supraconducteur	1
1	normal	0

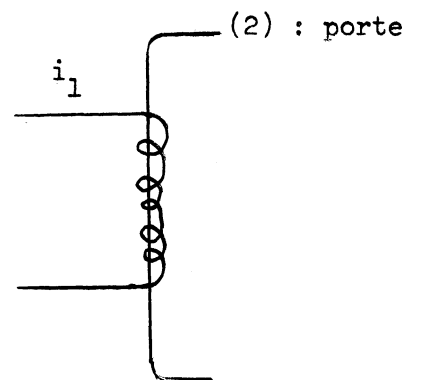


Fig. 10 - Le cryotron

Un tel système appelé "Cryotron" permet de construire des circuits logiques. Ces circuits doivent faire appel aux supraconducteurs du type I à champ critique peu élevé. Il existe de tels circuits mais ils n'ont pas encore été montés sur les calculatrices industrielles.

L'utilisation des supraconducteurs avec des courants alternatifs se heurte à des difficultés que nous n'étudierons pas et qui pour le moment interdit les applications que l'on avait pu espérer.

IV - CONCLUSION

La supraconductivité tant au point de vue théorique qu'au point de vue pratique est encore en pleine évolution. Il n'existe pas encore de lois strictes qui régissent les phénomènes ce qui conduit à la considérer encore comme un "art". Ceci suffit à expliquer la réserve que l'on peut avoir dans la réalisation immédiate des grandes bobines supraconductrices et à justifier les espoirs que l'on peut avoir pour un avenir plus lointain.

Je tiens à exprimer mes remerciements à Messieurs BLONDET, FLORENT et KRIKORIAN de Saclay, ainsi qu'à Monsieur BONIN de Grenoble des informations qu'ils ont eu l'amabilité de me communiquer.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - La supraconductivité E.A.Lynton - Monographies Dunod - n° 52
 - 2 - Super-Conductivity and the quantization of magnetic flux
V.F. Weisskopf - CERN 62-30
 - 3 - Type II or London Superconductors
B.B. Goodman - Review of Modern Physics V.36 n° 1 January 64
 - 4 - High Magnetic Fields - Proceedings of the International Conference
on High Magnetic Fields, 1961
J. Wiley editors.
 - 5 - High Magnetic fields
T.M. Fields - Nuclear Instrumentation and Methods 20 p.465 1963
 - 6 - High Magnetic field by means of superconductors.
T.G. Berlincourt - British Journal of Applied Physics
vol. 14 n° 11 p.749
-