

**Zeitschrift:** Revue économique franco-suisse  
**Herausgeber:** Chambre de commerce suisse en France  
**Band:** 50 (1970)  
**Heft:** 1: Le métal

**Artikel:** Supraconducteurs stabilisés au cuivre  
**Autor:** Kluge, M.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-887920>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 11.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# SUPRACONDUCTEURS

## STABILISÉS AU CUIVRE

M. KLUGE

Usines Métallurgiques S.A., Dornach.

### 1. INTRODUCTION ET HISTORIQUE

Le phénomène de la supraconductivité connu depuis à peu près 60 ans, ne trouva une application importante qu'à partir de 1960 lorsque l'on eut trouvé les « supraconducteurs durs », conservant leur qualité supraconductrice dans des champs magnétiques élevés et pouvant être eux-mêmes soumis à des courants de forte intensité.

Sur la base des théories s'appliquant à la supraconductivité on parvint, au cours des années 1950-1959, à se faire une idée plus précise des résultats obtenus par la recherche expérimentale. Bien que tout ne soit pas encore parfaitement expliqué, on possède néanmoins aujourd'hui une bonne connaissance de la nature de la supraconductivité.

Le but de cet article est de faire un tour d'horizon rapide sur le développement, l'état présent des connaissances et l'application des supraconducteurs à la réalisation d'aimants importants ainsi que de passer en revue les applications possibles dans l'avenir.

Lorsque H. Hamerling Onnes parvint en 1908 à liquéfier l'hélium, il donna accès à la recherche scientifique à un nouveau domaine de température, celui voisin du zéro absolu. ( $-273^{\circ}\text{C} = 0^{\circ}\text{K}$ )<sup>1</sup>. Ses pre-

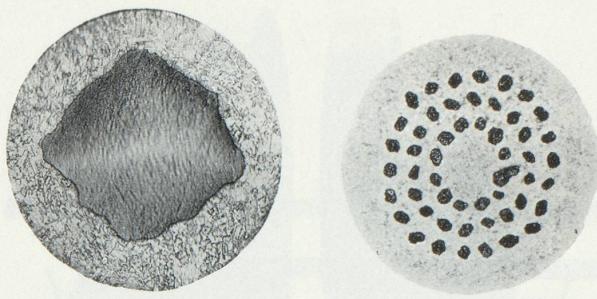
mières études avaient comme objet le comportement de la résistance électrique des métaux aux très basses températures, le mécanisme de la conductibilité des métaux purs faisant à cette époque l'objet de vives discussions. En se rapprochant du zéro absolu il trouva que la diminution de résistance ralentissait d'une manière générale, autrement dit, que la résistance tendait vers une valeur finie presque indépendante de la température, dite résistance résiduelle, causée par les impuretés dans le métal étudié. La valeur de la résistance résiduelle est une indication caractéristique de l'état de pureté du métal examiné.

Les essais entrepris à l'aide du mercure, qui pouvait être facilement purifié à l'aide des moyens de cette époque, conduisent à une surprise : de même qu'on l'avait déjà observé, la résistance électrique de l'échantillon décrut petit à petit en se rapprochant de la température de  $4,2^{\circ}\text{K}$ , mais disparut brusquement et pour ainsi dire complètement au-dessous de cette température, cela dans un intervalle de température très étroit.

Ce phénomène, la supraconductivité, fut découvert

(1) Des appareils de liquéfaction d'hélium puissants se trouvent sur le marché depuis une vingtaine d'années. L'hélium est obtenu soit par distillation fractionnée de l'air soit de sources de gaz naturelles.

Fig. 1. — Exemples de supraconducteurs circulaires.



par Kamerlingh Onnes et Holst en 1911. Il permit de démontrer que, au-dessous d'une température caractéristique, dite critique  $T_c$ , un courant traverse la matière sans résistance, c'est-à-dire sans pertes Joules. Par la suite (1956) on réussit à maintenir un courant stable durant plus de 2 ans 1/2 dans un conducteur maintenu à une température au-dessous de sa température critique, sans qu'il fût possible de mesurer une perte d'intensité de courant. Cela a permis de fixer la limite supérieure de la résistivité d'un supraconducteur à  $10^{-21}$  Ohms. En comparaison, la résistivité du cuivre très pur se situe à  $10^{-9}$  Ohms à cette température.

Un supraconducteur est donc en effet un conducteur parfait à l'intérieur duquel un champ magnétique préexistant est éliminé. Un courant électrique créé dans un anneau supraconducteur persiste indéfiniment, pour autant que sa température soit inférieure à  $T_c$ , que l'intensité de courant soit inférieure à une valeur critique  $I_c$  et que le champ magnétique ne dépasse pas une valeur critique  $H_c$ .

## 2. LES BASES DE LA SUPRACONDUCTIVITÉ

Un supraconducteur est caractérisé par les données suivantes :

- sa température critique  $T_c$ ,
- son champ magnétique critique  $H_c$ ,
- son intensité de courant critique  $I_c$  ou sa densité de courant critique  $j_c$ .

Lorsque la valeur de l'une de ces grandeurs est dépassée, l'état de supraconductivité<sup>2</sup> est détruit et le conducteur en question reprend son état normal (loi d'Ohm).

Au-dessous de  $T_c$  la supraconductivité peut être détruite lorsqu'elle se trouve dans un champ magnétique extérieur dont l'intensité dépasse la valeur critique  $H_c$ . Pour des échantillons d'une certaine épaisseur, l'intensité critique de courant  $I_c$  est atteinte pour un courant produisant à la surface de l'échantillon un champ magnétique  $H_c$ .

Depuis 1933, l'on sait que la diminution de la résistance électrique à l'intérieur du domaine de transition

autour de  $T_c$  correspond à une chute de la perméabilité magnétique à l'intérieur du conducteur jusqu'à la valeur zéro, c'est-à-dire qu'un supraconducteur est un corps parfaitement diamagnétique. Un champ magnétique modéré ne pénètre pas à l'intérieur d'un supraconducteur. Un champ magnétique intérieur préétabli est repoussé totalement à l'extérieur lorsque l'état de supraconductivité est établi (effet Meissner-Ochsenfeld). A l'intérieur d'une couche superficielle d'environ  $10^{-5}$  à  $10^{-6}$  cm le champ magnétique tombe à zéro<sup>3</sup>.

On connaît trois types de supraconducteurs qui se distinguent par leur comportement magnétique : les Types I et II se comportent de façon idéale et réversible, le Type III de façon irréversible. Les supraconducteurs dits « durs » du Type III sont également parfois appelés « supraconducteurs non idéaux du Type II »<sup>4</sup>.

Dans le Type I idéal, l'aimantation augmente jusqu'à ce que le champ atteigne sa valeur critique  $H_{c1}$ , au-delà de laquelle la conductivité normale est établie. Dans le Type II idéal, au contraire, l'effet Meissner pur n'existe que jusqu'à une intensité du champ magnétique  $H_{c1}$  inférieure au champ magnétique  $H_c$ . La valeur  $H_{c1}$  atteinte, le champ magnétique commence à pénétrer à l'intérieur du supraconducteur sous forme de lignes de flux (extrêmement fines), sans détruire l'état de supraconductivité et il se forme un état mixte. L'aimantation disparaît pour une intensité de champ magnétique critique, le champ critique supérieur  $H_{c2}$ . Au-dessous de  $H_{c2}$  on retrouve l'état de conductivité normale.

Le comportement du supraconducteur du Type III est différent de celui des Types I et II, car, en raison

(2) On connaît aujourd'hui une trentaine de métaux plus de 1 000 alliages et composés — dont les composantes ne sont pas obligatoirement des supraconducteurs — qui accusent l'état de supraconductivité dans un intervalle de température allant de près de 0 à 20 °K.

(3) A l'intérieur d'un supraconducteur le champ magnétique est zéro. Le champ magnétique extérieur est compensé par le champ dû au courant superficiel.

(4) La plupart des éléments tels que, par exemple, le plomb, l'étain et le mercure comptent parmi les supraconducteurs du Type I ; le vanadium, le niobium et la plupart des alliages et composés appartiennent au Type II, les alliages niobium-titan et niobium-zirconium au Type III.

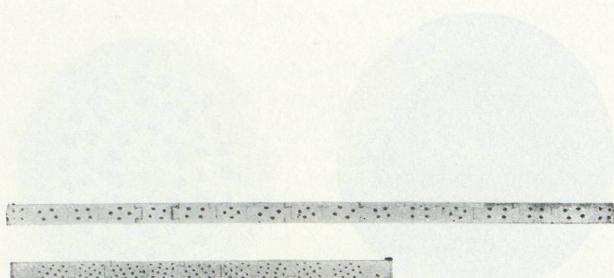


Fig. 2. — Exemples de rubans supraconducteurs stabilisés.

de la structure interne du conducteur, il apparaît un phénomène d'hystérèse<sup>5</sup>.

Dans ce cas la densité de courant critique est importante. Celle-ci dépend principalement des défauts de structure du matériau supraconducteur. La réalisation des valeurs élevées presuppose que les lignes de flux, caractéristiques pour l'état de la structure magnétique de l'état mixte entre  $H_{c1}$  et  $H_{c2}$  sont fixées par les défauts de structure du matériau (effet « pinning »). Les lignes de flux forment un réseau (prédict par la théorie et rendu visible en 1966) qui doit coïncider aussi parfaitement que possible au réseau de défauts, afin que les forces de retenue soient aussi élevées que possible et permettent d'atteindre la plus haute densité de courant critique. Dû aux défauts structuraux, un conducteur du Type idéal, par exemple le niobium, passe au Type III dans le cas des alliages et composés avec le zirconium, le titane ou l'étain. Seul ces trois supraconducteurs ont trouvé une utilisation technique dans la construction de grands aimants, cela grâce à leurs propriétés exceptionnelles.

Afin d'arriver aux densités de courant critique les plus hautes possibles, il est indispensable de connaître tous les paramètres influant les défauts structuraux (alliage, déformation et traitements thermiques).

A la suite nous ne traiterons que les questions se rapportant aux alliages niobium-titanium.

### 3. UTILISATION DES SUPRACONDUCTEURS NIOBIUM TITANE STABILISÉS AU CUIVRE

Peu après la découverte de la supraconductivité, Kamerlingh Onnes tenta de construire un électroaimant à enroulement de fil supraconducteur, mais il constata que tout ces supraconducteurs passaient à l'état de conductivité normale dès qu'on provoquait un faible champ magnétique. Ce comportement fut observé pour tous les supraconducteurs trouvés jusqu'en 1955. A cette date on parvint à réaliser un champ magnétique de 7 000 Oe moyennant un fil de niobium étiré dur. Un progrès important fut réalisé par contre avec certains alliages, le niobium-titanium, le nio-

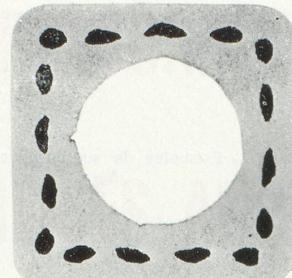


Fig. 3. — Supraconducteur creux réalisé d'une pièce.

bium-zirconium ainsi qu'avec le composé du niobium-étain.

La température critique des alliages niobium-titanium est environ de 9°K (suivant leurs compositions) et le champ critique atteint des valeurs de 110-120 kOe à la température de l'hélium liquide (4,2°K). Les champs critiques ainsi que les intensités des courants critiques dépendent fortement de la température du supraconducteur. On s'efforce donc d'utiliser un supraconducteur à la température la plus basse possible (en pratique à la température de l'hélium liquide sous pression normale) afin de pouvoir utiliser des courants élevés dans des champs magnétiques intenses. On a donc intérêt d'utiliser un supraconducteur à température critique la plus élevée possible. Le composé Nb<sub>3</sub>Sn accuse une température critique la plus élevée d'environ 18°K et un champ critique de plus de 200 kOe à 4,2°K. Son utilisation en grande échelle se heurte par contre à des difficultés technologiques et en conséquence à des prix de revient très élevés.

La dépendance du courant critique du champ magnétique joue un rôle important dans l'application des supraconducteurs durs. Celle-ci peut être influencée dans une large mesure par le procédé de fabrication du supraconducteur. A l'aide des procédés appropriés (mise en forme, traitements thermiques) on obtient aujourd'hui des densités de courant critiques de l'ordre de 2000 A/mm<sup>2</sup> sous des champs magnétiques de l'ordre de 50 kOe, dans des fils fins de niobium-titanium enrobés de cuivre dit supraconducteurs stabilisés au cuivre. Le traitement de ces fils se fait dès le début dans leur enveloppe de cuivre. Ce n'est que la stabilisation du supraconducteur par le cuivre ou l'aluminium qui a permis la mise en service d'aimants de grandes dimensions créant des champs magnétiques intenses.

Ceci est dû au fait que des instabilités de supraconductivité se produisent dans des supraconducteurs à une température au-dessous de la température critique qui conduisent à une transition de l'état supra-

(5) Cette hystérèse est une des causes des difficultés principales rencontrées dans l'application du courant alternatif dans le domaine de la supraconductivité.

Comparaison entre deux aimants, l'un supraconducteur a), l'autre traditionnel b), développant un même champ de 50 kOe. Poids des aimants, 10 kg et 12 000 kg. L'aimant traditionnel mesure 2,5 m de large et 2 m de haut !



conducteur à l'état normal. L'enrobage du supraconducteur dans le Cu ou l'Al évite une propagation de cet effet.

En Suisse un Consortium a été créé réunissant les Ateliers de Construction Oerlikon (BBC), Métaux Précieux S.A. Neuchâtel et les Usines Métallurgiques S.A. Dornach, qui s'occupe du développement et des applications des supraconducteurs. Nous allons décrire ci-après quelques exemples de supraconducteurs déjà fabriqués ou encore en stade de développement (fig. 1-3).

Sommairement on peut classer les supraconducteurs selon leur forme en conducteurs circulaires, en rubans supraconducteurs et en supraconducteurs creux, ces derniers permettent un refroidissement interne par l'hélium liquide. Les conducteurs circulaires sont constitués soit par un seul fil de niobium-titanium enrobé de cuivre, utilisé dans de petits solénoïds, soit de plusieurs fils supraconducteurs enrobés dans la même gaine de cuivre.

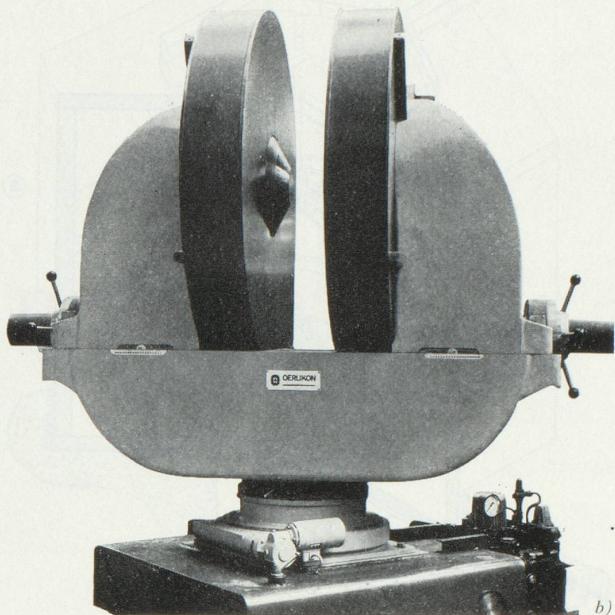
La fig. 1 donne deux exemples, l'un pour un conducteur à un filament de NbTi l'autre pour un conducteur à 52 fils de NbTi. Nombre et diamètre des fils sont déterminés par le constructeur de l'aimant. Dans le cas de grands électro-aimants supraconducteurs il s'agit normalement d'exécutions uniques. Il en est du même en ce qui concerne les rubans supraconducteurs dont nous présentons deux exemples (fig. 2).

Les rubans composés d'éléments à emboîtement en queue d'aronde, mesurant dans un cas  $88 \times 3$  mm, dans l'autre  $56 \times 3$  mm ont été conçus pour des courants de 9000 et 6500 A.

Du fait que les rubans supraconducteurs ne sont, le plus souvent et à cause de la construction des aimants, refroidis à l'hélium liquide que sur leurs bords dans les petites unités et à l'aide de rubans séparateurs entre les diverses bobines plates composant les aimants des grandes dimensions, permettant l'accès de l'hélium liquide à l'intérieur du bobinage, la tendance est de passer pour certains projets aux conducteurs creux refroidis par l'hélium liquide circulant à l'intérieur du conducteur.

Nous présentons deux exemples de tels conducteurs. Le supraconducteur creux selon figure 3 a une section carrée  $7,55 \times 7,55$  mm et un canal de réfrigération de 4,5 mm de diamètre (projet soumis à un institut de physique nucléaire allemand).

Un autre supraconducteur creux a été développé pour le projet OMEGA du CERN. Sa section mesure  $18 \times 18$  mm avec un canal de réfrigération de  $9 \times 9$  mm. Les fils supraconducteurs sont dispo-



sés en formes d'hélices autour d'un tube de cuivre central pour éviter les courants tourbillonnaires à l'intérieur de la matrice. Un tube de cuivre est enveloppé de deux couches de fils de 1,5 mm de diamètre. Une partie des fils est constituée de fils en cuivre contenant chacun 4 fils de NbTi, le reste des fils en cuivre pur. La section du NbTi est déterminée par les exigences de construction (courant utile et champ magnétique demandé).

Le tube central et les deux couches de fils sont liés par l'intermédiaire d'une couche de soudure spéciale afin d'établir un contact efficace électrique et thermique entre tube et fils. Le conducteur se trouve actuellement en production dans nos usines.

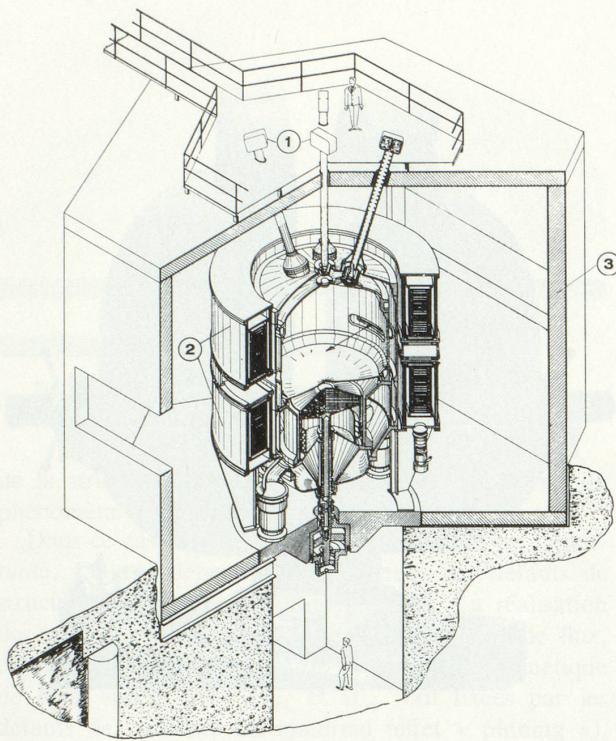
Les avantages d'un conducteur supraconducteur selon cette conception sont :

— possibilité de fabrication de grandes longueurs (OMEGA : 1000 m) sans connexions internes entre les supraconducteurs ;

— disposition des fils supraconducteurs en forme d'hélices afin d'éviter des courants de Foucault à l'intérieur des fils supraconducteurs stabilisés.

Les supraconducteurs du genre décrit sont conçus pour la réalisation des bobinages des grands aimants supraconducteurs ne permettent un fonctionnement de l'aimant que sous un régime stationnaire (pas de variation de champ magnétique). L'excitation de l'aimant doit de ce fait être restreinte à une vitesse réduite afin d'éviter que le supraconducteur passe au régime de conductibilité normale au cours de l'excitation.

Les travaux récents ont démontré qu'un fil supraconducteur est d'autant plus stable que son diamètre est réduit. C'est pour cette raison, que la tendance au développement va vers des filaments supraconducteurs de



Coupe isométrique de la grande chambre à bulles BEBCS<sup>8</sup>) du CERN à Genève. La flèche indique l'entrée du faisceau de particules.  
 (1) disposition de la caméra (2) pôles (3) écran magnétique

La limite économique pour les grands aimants traditionnels se trouve aux alentours de 20 kOe. Le plus grand aimant traditionnel en usage régulier fournit un champ magnétique de 250 kOe pour une consommation de 16 MW, soit la puissance requise par une ville de 15 000 habitants. Cette puissance est entièrement transformée en chaleur dans les enroulements et doit être évacuée par l'eau de refroidissement. De gros aimants de ce genre utilisent donc chacun une usine électrique et hydraulique.

Un budget d'exploitation pour l'aimant de la chambre à bulles du Argonne National Laboratory aux USA prévoit pour les deux exécutions traditionnelle et supraconductrice de l'aimant (champ magnétique 20 kOe, 1900 t de fer), un investissement à peu près égal, mais le coût d'exploitation, de l'entretien et du personnel n'est que d'un dizième pour l'exécution supraconductrice ; cela représente une économie annuelle de 360 000 \$, soit environ 1,5 million de francs).

En outre, on peut tirer les chiffres intéressants suivants de la description de la grande chambre à bulles du CERN (parue dans le Courrier CERN, vol. 9, mars 1969, p. 63-65) : un aimant traditionnel consommerait 56 MW (1 MW = 1 million de watts) pour le champ et 1,2 MW pour le refroidissement, ce qui correspond à deux fois la consommation actuelle du CERN. En revanche, l'aimant supraconducteur consommera moins de 1 MW, ce qui correspond pratiquement à la puissance frigorifique, puisque les pertes dans l'aimant supraconducteur ne dépasseront pas 200 W à 4,2 °K (pour les connexions en entrées de courant).

Pour 5000 heures de service (environ 200 jours, soit 1 an d'exploitation), un aimant classique consommerait pour 17 millions de francs d'électricité qui s'opposent aux 600 000 francs calculés pour l'aimant supraconducteur.

Ces chiffres éclairent la situation quant aux avantages économiques des grands aimants supraconducteur.

Les autres emplois des supraconducteurs qui sont envisagés ou en plein essor seront rapidement énumérés pour terminer : paliers sans frottement, suspensions, moteurs, câbles pour le transport d'énergie, écran magnétique (par exemple dans les satellites), éléments électroniques de commutation, accumulateur d'énergie, grands aimants pour la transformation directe de chaleur en électricité (magnétohydrodynamique) pour laquelle un groupe de 1 000 MW nécessiterait un champ magnétique de 50—60 kOe de 10 mètres de longueur avec un passage libre de 4 × 4 mètres.

*(Les photos illustrant cet article ont été aimablement mises à notre disposition par les Usines Métallurgiques S. A. à Dornach).*

#### 4. EXPLOITATION ET AVENIR

Les progrès réalisés dans la technologie des matériaux supraconducteurs et la connaissance améliorée de leurs propriétés, de même que l'existence de machines frigorifiques à hélium de haute fiabilité, permettent aujourd'hui de projeter et de réaliser des aimants supraconducteurs qui sortaient du domaine possible il y a peu de temps encore. Le champ d'application des aimants supraconducteurs concerne principalement la physique des hautes énergies et du plasma. Mais l'emploi des supraconducteurs bénéficie de l'impulsion vigoureuse fournie par les calculs de rentabilité. Car, dans l'exploitation d'un aimant supraconducteur, la seule énergie dépensée est celle nécessaire à la liquéfaction de l'hélium, ce qui représente une économie considérable par rapport aux aimants usuels à enroulements traditionnels. Il est vrai que les aimants permanents fonctionnent eux aussi sans apport d'énergie, mais le champ maximal possible est d'environ 10 kOe.