HAL
open science

Environnement cryogénique des systèmes supraconducteurs en génie électrique

Bruno Douine, Kévin Berger, Jean Lévêque, Guanbin Huang, El Hadj Ailam, Mohamed Elbaa

▶ **To cite this version:**

Bruno Douine, Kévin Berger, Jean Lévêque, Guanbin Huang, El Hadj Ailam, et al.. Environnement cryogénique des systèmes supraconducteurs en génie électrique. CISTEM 2016 - Conférence Internationale en Sciences et Technologies Electriques au Maghreb, Oct 2016, Marrakech, Maroc. pp.1-5/ID 198. hal-01501799

HAL Id: hal-01501799

https://hal.science/hal-01501799v1

Submitted on 4 Apr 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Evolution de l'Environnement Cryogénique des Systèmes Supraconducteurs

Bruno Douine, Kevin Berger, Jean Leveque, Guangbin Huang,
GREEN, Université de Lorraine,
Vandoeuvre-les-Nancy, France
bruno.douine@univ-lorraine.fr

El Hadj Ailam, Mohamed Elbaa
Université de Khemis Miliana
Algérie

***Résumé*— L'utilisation des supraconducteurs en génie électrique permet d'obtenir des performances améliorées en termes de puissance massique par exemple. Cependant leur fonctionnement nécessite de les refroidir à des températures très basses. Il y a donc nécessité d'un environnement cryogénique. Les principaux cryogènes utilisés sont l'hélium liquide et l'azote liquide. De plus en plus les cryocoolers sont utilisés dans les applications des supraconducteurs, Dans cet article deux applications en génie électrique de ces crycoolers sont présentés, un moteur synchrone à inducteur supraconducteur et un banc de caractérisation électrique de fil supraconducteur.**

***Abstract*— The use of superconductor in electrical engineering allows to improve performance in terms of power density for example. However, their operation requires cooling them at very low temperatures. Therefore it needs a cryogenic environment. The main cryogenic used are liquid helium and liquid nitrogen. Increasingly the cryocoolers are used in applications of superconductors. In this article two applications of crycooler used in electrical engineering are presented, a synchronous motor superconducting inductor and the electrical superconducting wire characterization bench.**

Mots-clés—matériau supraconducteur, cryocooler

Keywords—superconductor, cryocooler

I. INTRODUCTION

Les matériaux supraconducteurs ont la propriété de transporter du courant avec des densités de courant beaucoup plus fortes que les conducteurs classiques. De plus, leurs pertes en courant continu sont très faibles et en courant alternatif plus faibles que les conducteurs classiques. Ces matériaux sont caractérisés par trois paramètres qui sont la température critique T_C, le champ magnétique critique H_C et la densité de courant critique J_C [1; 2]. Ce qui est important de savoir c'est que les valeurs critiques H_C et J_C augmentent de façon importante quand la température diminue ce qui pousse tous les concepteurs de dispositifs supraconducteurs a diminué la température de fonctionnement au plus bas mais à un coup qui doit rester raisonnable. Les applications utilisant ces matériaux supraconducteurs sont par exemple, la création de fort champ magnétique, la lévitation magnétique, le transport de courant, les moteurs et transformateurs. Les supraconducteurs se trouvent soit sous la forme de pièces massives, soit sous la forme de conducteurs mono ou multifilamentaires, soit sous la forme de films. En pratique on doit refroidir un système à une température inférieur à T_C avec des pertes que l'on doit prédéterminer. Ceci détermine le dimensionnement du système cryogénique permettant le refroidissement des éléments supraconducteurs. Les matériaux supraconducteurs utilisés dans las applications en génie électrique sont de trois types, liés à leur température critique. Les supraconducteurs à basse température critique (BTC) pour lesquels l'hélium liquide est utilisé traditionnellement pour leur refroidissement ont des températures critiques autour de 10° K à 20°K. Les supraconducteurs BTC les plus utilisés en électrotechnique sont les alliages Nb_3Sn et NbTi. Dans le tableau I sont indiquées les températures critiques de ces deux alliages. Les supraconducteurs à haute température critique (HTC) ont des températures critiques sont autour de 100° K. Les matériaux HTC les plus courants en génie électrique sont les céramiques $YBa_2Cu_2O_7$ et $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$. Le refroidissement le plus utilisé pour ces matériaux est l'azote liquide car sa température est de 77° K et donc inférieur à leurs températures critiques. Le troisième type de matériau supraconducteur est le MgB2 est un matériau de température critique intermédiaire. Ce matériau a, dés le début, été associé à un refroidissement par cryocooler, ou « réfrigérateur cryogénique », du fait de sa température critique trop basse pour l'utilisation de l'azote liquide et assez haute pour pouvoir utiliser des cryocoolers à un coup non prohibitif. Le sujet de cet article est de présenter les environnements cryogéniques des dispositifs développés au GREEN ces dernières années et leur prolongation future. Le premier dispositif présenté est un moteur synchrone supraconducteur. Le deuxième est un banc de caractérisation électrique d'échantillons supraconducteurs. Dans les deux cas l'utilisation des cryocoolers est effective ou envisagée.

TABLEAU 1 : Températures critiques des matériaux supraconducteurs utilisés en génie électrique

Matériau	T_C (K)
Nb_3Sn	18
NbTi	9
$YBa_2Cu_2O_7$	92
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	110

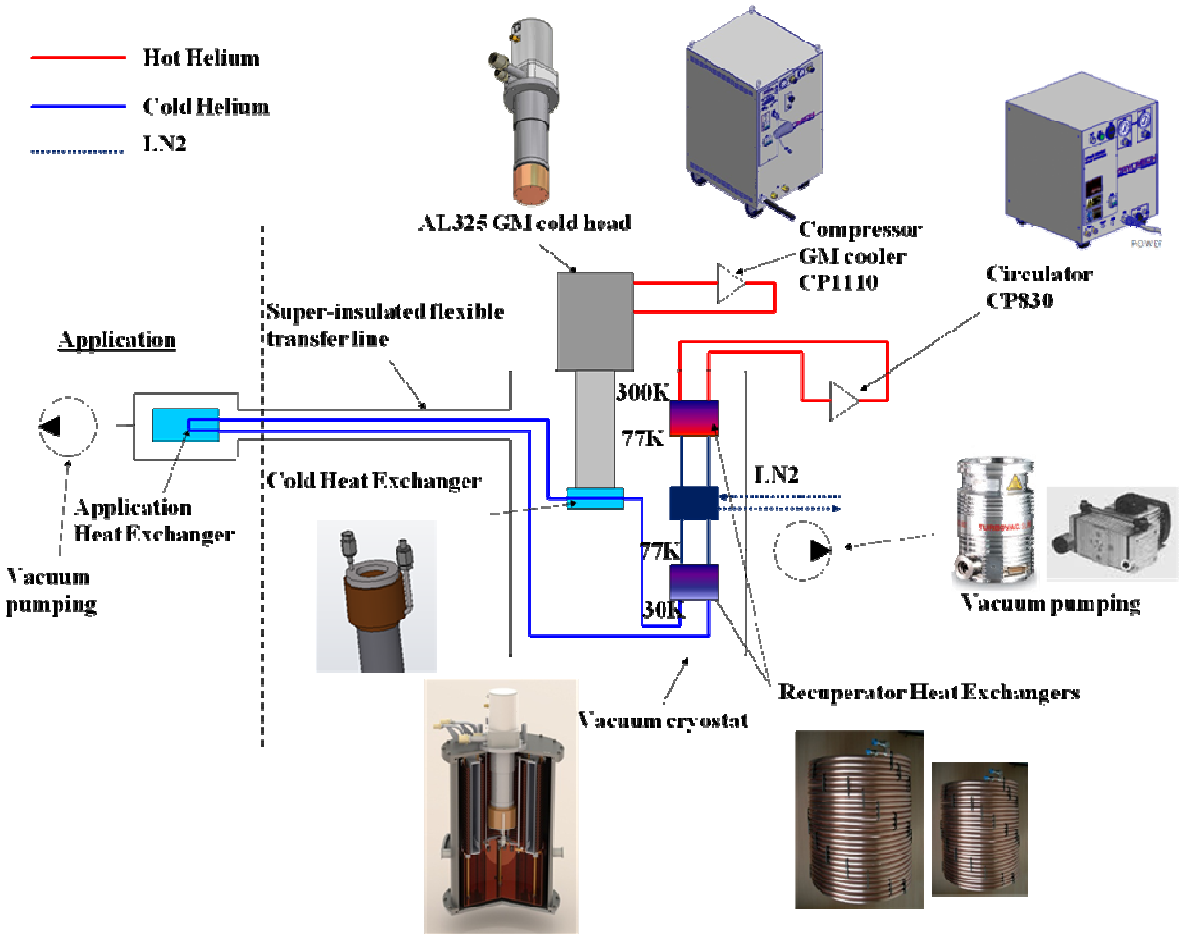
MgB_2	40

Fig. 1. Différentes formes de supraconducteurs

Fig. 2. Crycooler Absolut System 20 W à 20 K, 80 W à 30 K, 200 W à 60 K

II. Environnement Cryogenique

L'optimisation technique et économique du système cryogénique de refroidissement des éléments supraconducteurs présentent de nombreuses difficultés.



Tout d'abord il faut tenir compte des pertes dans les matériaux supraconducteurs [3] ou non supraconducteurs. La deuxième difficulté vient du fort gradient de température. En effet les différences de températures peuvent atteindre plusieurs centaines de degrés, par exemple une différence de 4°K dans la partie froide et 300°K dans la partie chaude.

Pour des raisons de performances de refroidissement, les liquides sont principalement utilisés dans les systèmes supraconducteurs. Dans le tableau 2 sont représentées les caractéristiques des liquides cryogéniques utilisés dans le domaine de la supraconductivité appliquée. Les plus utilisés sont l'hélium et l'azote liquide. Cependant l'hélium gazeux est aussi utilisé à des températures entre 20°K et 63°K température de la fusion de l'azote (freezing point).

TABLEAU 2 : Propriétés des principaux cryogènes

		^4He	H_2	Ne	N_2	O_2
Boiling point	(K)	4.2	20.4	27.1	77.3	90.2
Freezing point	(K)		14	24.15	63.15	54
Triple point	(K)		13.95	22.7	64.5	54.40
Critical point	(K)	5.2	33.2	44.4	126.1	154
Volume of gas per liter of liquid	(Liter)	700	790	1,355	646	798
Density of liquid	(kg/m³)	125	71	1,210	810	1,140
Latent heat	(kJ/kg)	21	452	88.7	199	213

Depuis plusieurs années avec l'apparition des supraconducteurs HTC et du MgB_2 on a cherché à avoir des températures de fonctionnement situé entre 4,2°K température de l'hélium liquide et 77°K température de l'azote liquide pour les applications des supraconducteurs. Pour cela l'utilisation des cryocoolers s'est généralisée. Leur fonctionnement est basé sur la circulation le long d'un cycle thermodynamique avec une compression et la détente d'un gaz [5-6]. Sur la figure 2 est représenté un exemple de crycooler fabriqué par Absolut System permettant de refroidir des systèmes ayant des pertes de 20 W à 20 K, de 80 W à 30 K et de 200 W à 60 K.

Pour maintenir les systèmes supraconducteurs à basse température il faut les mettre dans des cryostats de type vase Dewar. Ces cryostats sont fabriqués à l'aide de doubles parois en métal inoxydable, en verre ou en fibre de verre. Entre les parois le vide est maintenu et souvent des matériaux réflecteurs sont insérés pour éviter le rayonnement entre la partie froide et la partie chaude.

III. EXEMPLES D'APPLICATIONS

A. *Moteur synchone a inducteur supraconducteur*

Les moteurs synchrones à inducteur supraconducteur sont les machines supraconductrices les plus étudiées [4-7] car le courant de l'inducteur est continu ce qui veut dire que l'utilisation de supraconducteur n'engendre quasiment aucune perte avec un champ magnétique qui peut être très important. Ceci permet d'augmenter le rendement de la machine et d'augmenter sa puissance volumique. Sur la figure 4 est représentée de façon schématique la section d'une machine de ce type. L'inducteur peut-être fixe pour faciliter la fabrication de la machine [] ou tournant qui impose à la fabrication d'un cryostat tournant [6].

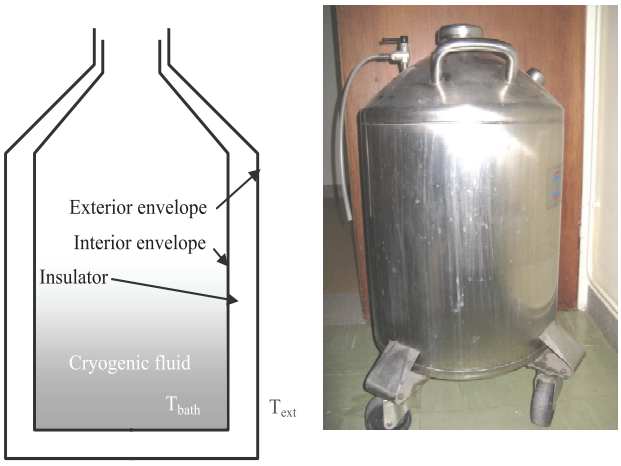


Fig. 3. Cryostat simple

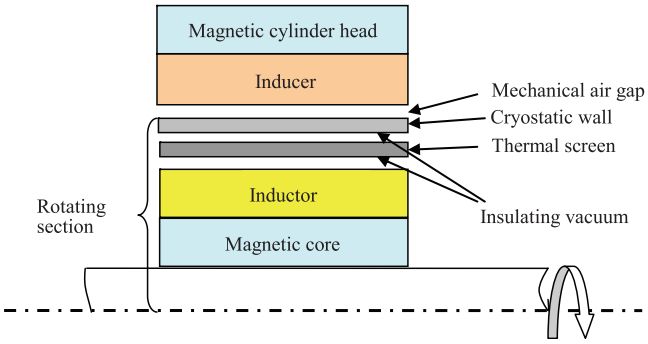


Fig. 4. Section d'une machine synchrone à inducteur supracondcuteur.

Sur la figure 5 est représenté le moteur construit par CONVERTEAL en collaboration avec le GREEN dans le cadre d'un projet européen ULCOMAP. L'enroulement de l'inducteur est composé de ruban BiSCCO (fig. 6) et refroidi par un cryocooler à une température de 30°K[6].

B. *Banc de caractérisation electrique*

La caractérisation des supraconducteurs est une partie importante des travaux du GREEN en supraconductivité appliquée. Le but est d'obtenir les paramètres de la loi de comportement E(J) les plus précis possibles. Ceux-ci sont ensuite utilisés pour prévoir le comportement des matériaux supraconducteurs lors de leur utilisation dans des systèmes

électriques et électrotechniques (moteurs, câbles, limiteurs de courant etc). La caractérisation concerne les rubans supraconducteurs et les supraconducteurs massifs. Dans cet article est présenté le banc expérimental de caractérisation de fil MgB_2. La température de fonctionnement est entre 20°K et 30°K. Le but de l'expérience est de mesurer la tension aux bornes de l'échantillon lorsqu'il est parcouru par un courant continu et soumis à un champ magnétique continu aux alentours de 1T. On en déduit la caractéristique E(J) en fonction du champ magnétique appliqué. Le refroidissement est assuré par deux cryocoolers dont un des deux est uniquement dédié au refroidissement du fil supraconducteur. Sur la figure 7 est représenté le cryostat du banc ainsi que l'un des deux cryocooler. La conception du porte échantillon est une partie complexe car elle doit permettre la bonne alimentation de l'échantillon en courant (jusqu'à 1000A !) et en même temps le refroidissement correct de l'échantillon. La simulation numérique (fig. 8) permet de vérifier si la température de l'échantillon est correcte et homogène le long du fil supraconducteur

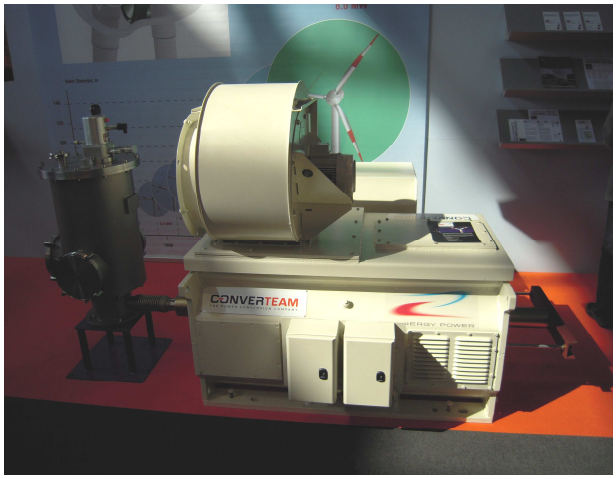


Fig. 5. Moteur construit lors du projet européen ULCOMAP

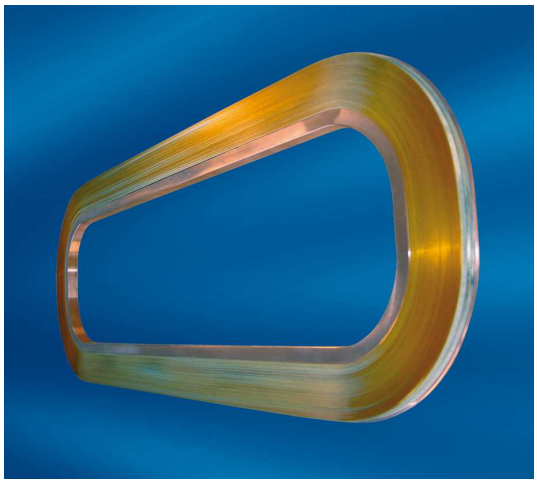


Fig. 6. Bobine supraconductrice BiSCCO de l'inducteur du moteur ULCOMAP

.

Fig. 7. Crycooler et cryostat du système de caractérisation d'échatillon MgB_2

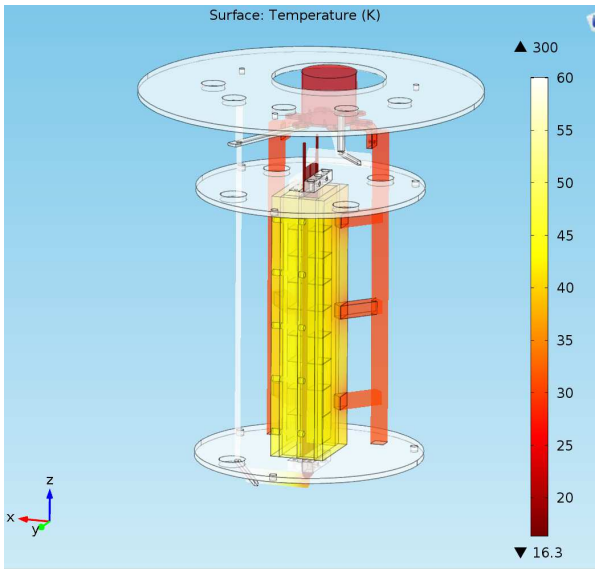


Fig. 8. Carte de température, obtenu pas simulation numérique, du porte échatillon du système de caractérisation d'échatillon MgB_2

IV. CONCLUSION

Le système cryogénique de refroidissement des systèmes supraconducteurs est un élément important du dimensionnement d'un système utilisant des supraconducteurs. L'utilisation de cryocooler tend à se généraliser dans les nouvelles applications du fait de la possibilité de choisir la température la plus adaptée au fonctionnement des matériaux supraconducteurs. Cependant cette utilisation va de paire avec un accroissement de la complexité du système.

REFERENCES

[1] M. N. Wilson, Superconducting Magnets, Oxford science publications, 1983.

[2] P. Tixador, Les supraconducteurs, Hermés, 1995.

[3] B. Douine, K. Berger, J. Pienkos, J. Leveque, D. Netter, " Analytical calculation of the instantaneous power in a current carrying superconducting tube with Jc(B)", **IEEE Trans. on Appl. Supercond**., vol. 18, n°3, septembre 2008, pp.1717-1723

[4] A. Rezzoug, J. Leveque, B. Douine, S. Mezani, Machines à supraconducteurs, **Machines électriques non conventionnelles**, **Traité EGEM, Hermés, Lavoisier**, pp. 196-258, 2011.

[5] A. Rezzoug, J. Leveque, B. Douine, S. Mezani, Superconducting machines, **Non-conventional machines**, **Wiley,** pp.191-255, 2012.

[6] E. Ailam, D. Netter, J. Leveque, B. Douine, P. Masson, A. Rezzoug, Design and Testing of a Superconducting Rotating Machine, **I.E.E.E. transactions on applied superconductivity**, vol.17(1), march 2007, pp.27-33.

[7] R. Moulin, J. Leveque, L. Durantay, B. Douine, D. Netter, A. Rezzoug, Superconducting Multi-Stacks Inductor for Synchronous Motors Using the Diamagnetism Property of Bulk Material," **IEEE Trans. on Industrial Electronics**, vol. 57, no. 1, pp. 146-153, january 2010