

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61788-9

Première édition
First edition
2005-04

Supraconductivité –

Partie 9:

**Mesures pour supraconducteurs
haute température massifs –
Densité de flux résiduel des oxydes
supraconducteurs à gros grains**

Superconductivity –

Part 9:

**Measurements for bulk high temperature
superconductors –
Trapped flux density of large grain
oxide superconductors**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61788-9:2005

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique. Des renseignements relatifs à cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- **Site web de la CEI** (www.iec.ch)
- **Catalogue des publications de la CEI**

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (www.iec.ch/searchpub) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- **IEC Just Published**

Ce résumé des dernières publications parues (www.iec.ch/online_news/justpub) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- **Service clients**

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

Email: custserv@iec.ch
Tél: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Further information on IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology. Information relating to this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is also available from the following:

- **IEC Web Site** (www.iec.ch)
- **Catalogue of IEC publications**

The on-line catalogue on the IEC web site (www.iec.ch/searchpub) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- **IEC Just Published**

This summary of recently issued publications (www.iec.ch/online_news/justpub) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- **Customer Service Centre**

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

Email: custserv@iec.ch
Tel: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61788-9

Première édition
First edition
2005-04

Supraconductivité –

Partie 9:

**Mesures pour supraconducteurs
haute température massifs –
Densité de flux résiduel des oxydes
supraconducteurs à gros grains**

Superconductivity –

Part 9:

**Measurements for bulk high temperature
superconductors –
Trapped flux density of large grain
oxide superconductors**

© IEC 2005 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembé, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

R

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	8
1 Domaine d'application	10
2 Références normatives	10
3 Termes et définitions	10
4 Principe	10
5 Exigences	14
6 Appareillage	16
7 Procédure de mesure	18
8 Précision et justesse de la méthode d'essai	18
9 Rapport d'essai	20
Annexe A (informative) Informations complémentaires relatives aux Articles 3 à 6	22
Annexe B (informative) Mesures de la force de lévitation des supraconducteurs haute température massifs	28
Annexe C (informative) Rapport d'essai (exemple)	34
Bibliographie	38
Figure 1 – Principe de la densité de flux résiduel dans un supraconducteur massif	12
Figure 2 – Vue schématique de l'installation expérimentale	14
Figure A.1 – Dépendance de l'épaisseur de la densité de flux résiduel (B_z)	22
Figure A.2 – Dépendance de l'entrefer du champ magnétique	26
Figure C.1 – Carte de distribution de densité de flux résiduel	36

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	9
1 Scope.....	11
2 Normative references	11
3 Terms and definitions	11
4 Principle	11
5 Requirements	15
6 Apparatus.....	17
7 Measurement procedure	19
8 Precision and accuracy of the test method.....	19
9 Test report.....	21
Annex A (informative) Additional information related to Clauses 3 to 6.....	23
Annex B (informative) Measurements for levitation force of bulk high temperature superconductors	29
Annex C (informative) Test report (example).....	35
Bibliography.....	39
Figure 1 – Principle of trapped flux density in bulk superconductor	13
Figure 2 – Schematic view of the experimental set-up.....	15
Figure A.1 – Thickness dependence of the trapped flux density (B_z).....	23
Figure A.2 – Gap dependence of the field strength	27
Figure C.1 – Distribution map of trapped flux density	37

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SUPRACONDUCTIVITÉ –

**Partie 9: Mesures pour supraconducteurs haute température massifs –
Densité de flux résiduel des oxydes supraconducteurs à gros grains**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61788-9 a été établie par le Comité d'Etudes 90 de la CEI: Supraconductivité.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
90/167/FDIS	90/175/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SUPERCONDUCTIVITY –

**Part 9: Measurements for bulk high temperature superconductors –
Trapped flux density of large grain oxide superconductors**

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61788-9 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity.

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
90/167/FDIS	90/175/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

La CEI 61788 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général *Supra-conductivité*:

- Partie 1: Mesure du courant critique – Courant critique continu de supraconducteurs en composite Cu/Nb-Ti
- Partie 2: Mesure du courant critique – Courant critique continu des supraconducteurs composites Nb₃Sn
- Partie 3: Mesure du courant critique – Courant critique continu des oxydes supraconducteurs Bi-2212 et Bi-2223 avec gaine en argent
- Partie 4: Mesure de la résistivité résiduelle – Taux de résistivité résiduelle des supraconducteurs composites au Nb-Ti
- Partie 5: Mesure du rapport volumique matrice/supraconducteurs – Rapport volumique cuivre/supraconducteur des composites supraconducteurs de Cu/Nb-Ti
- Partie 6: Mesure des propriétés mécaniques – Test de tension à température ambiante des composites supraconducteurs de Cu/Nb-Ti
- Partie 7: Mesures des caractéristiques électroniques – Résistance de surface des supraconducteurs aux hyperfréquences
- Partie 8: Mesure des pertes en courant alternatif – Méthode de mesure par bobines de détection des pertes totales en courant alternatif des fils composites supraconducteurs de Cu/Nb-Ti exposés à un champ magnétique alternatif transverse
- Partie 9: Mesures pour supraconducteurs haute température massifs – Densité de flux résiduel des oxydes supraconducteurs à gros grains
- Partie 10: Mesure de la température critique – Température critique des composites supraconducteurs Nb-Ti, Nb₃Sn ainsi que des oxydes supraconducteurs à base Bi par une méthode par résistance
- Partie 11: Mesure du rapport de résistance résiduelle – Rapport de résistance résiduelle des supraconducteurs composites de Nb₃Sn
- Partie 12: Mesure du rapport volumique matrice/supraconducteur – Rapport volumique cuivre/non-cuivre des fils en composite supraconducteur Nb₃Sn
- Partie 13: Mesure des pertes en courant alternatif – Méthodes de mesure par magnétomètre des pertes par hystérésis dans les composites multifilamentaires de Cu/Nb-T

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de maintenance indiquée sur le site web de la CEI sous «<http://webstore.iec.ch>» dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite;
- supprimée;
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IEC 61788 consists of the following parts, under the general title *Superconductivity*:

- Part 1: Critical current measurement – DC critical current of Cu/Nb-Ti composite superconductors
- Part 2: Critical current measurement – DC critical current of Nb₃Sn composite superconductors
- Part 3: Critical current measurement – DC critical current of Ag-sheathed Bi-2212 and Bi-2223 oxide superconductors
- Part 4: Residual resistance ratio measurement – Residual resistance ratio of Nb-Ti composite superconductors
- Part 5: Matrix to superconductor volume ratio measurement – Copper to superconductor volume ratio of Cu/Nb-Ti composite superconductors
- Part 6: Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test of Cu/Nb-Ti composite superconductors
- Part 7: Electronic characteristic measurements – Surface resistance of superconductors at microwave frequencies
- Part 8: AC loss measurements – Total AC loss measurement of Cu/Nb-Ti composite superconducting wires exposed to a transverse alternating magnetic field by a pickup coil method
- Part 9: Measurements for bulk high temperature superconductors – Trapped flux density of large grain oxide superconductors
- Part 10: Critical temperature measurement – Critical temperature of Nb-Ti, Nb₃Sn, and Bi-system oxide composite superconductors by a resistance method
- Part 11: Residual resistance ratio measurement – Residual resistance ratio of Nb₃Sn composite superconductors
- Part 12: Matrix to superconductor volume ratio measurement – Copper to non-copper volume ratio of Nb₃Sn composite superconducting wires
- Part 13: AC loss measurements – Magnetometer methods for hysteresis loss in Cu/Nb-Ti multifilamentary composites

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the maintenance result date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed;
- withdrawn;
- replaced by a revised edition, or
- amended.

INTRODUCTION

Les supraconducteurs haute température massifs (BHTSC: Bulk High Temperature Superconductors) à gros grains offrent bien des possibilités pour différentes applications techniques, comme les paliers magnétiques, les systèmes de stockage d'énergie à volant, les transports de charge, la lévitation, et les aimants à densité de flux résiduel. Les supraconducteurs à gros grains sont déjà mis sur le marché dans le monde entier.

Pour les applications industrielles des supraconducteurs massifs, il y a deux propriétés de matériaux importantes. L'une est la force de lévitation, qui détermine le poids que peut supporter un supraconducteur massif. L'autre est la densité de flux résiduel, qui détermine le champ maximal que peut générer un supraconducteur massif. Il faut que les utilisateurs de supraconducteurs massifs connaissent ces valeurs pour concevoir leurs dispositifs. Cependant, ces valeurs sont fortement dépendantes de la méthode d'essai utilisée, et, par conséquent, il est vraiment très important de mettre en place une norme internationale pour déterminer ces valeurs à la fois pour les fabricants et les utilisateurs industriels de supraconducteurs massifs.

La méthode d'essai traitée dans cette norme est basée sur le travail préparatoire à la normalisation du VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards) sur les propriétés des supraconducteurs haute température massifs.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-9:2005

INTRODUCTION

Large grain bulk high temperature superconductors (BHTSC) have significant potential for a variety of engineering applications, such as magnetic bearings, flywheel energy storage systems, load transports, levitation, and trapped flux density magnets. Large grain superconductors have already been brought to market worldwide.

For industrial applications of bulk superconductors, there are two important material properties. One is the magnetic levitation force, which determines the tolerable weight supported by a bulk superconductor. The other is the trapped flux density, which determines the maximum field that a bulk superconductor can generate. The users of bulk superconductors must know these values for the design of their devices. However, these values are strongly dependent on the testing method, and therefore it is critically important to set up an international standard for the determination of these values both for manufacturers and industrial users.

The test method covered in this standard is based on the VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards) pre-standardization work on the properties of bulk high temperature superconductors.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-9:2005

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 9: Mesures pour supraconducteurs haute température massifs – Densité de flux résiduel des oxydes supraconducteurs à gros grains

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61788 spécifie une méthode d'essai pour la détermination du champ résiduel (densité de flux résiduel) des supraconducteurs haute température massifs.

La présente Norme internationale s'applique aux oxydes supraconducteurs à gros grains ayant des formes bien définies telles que les disques et les pastilles rectangulaires et hexagonales. La densité de flux résiduel peut être déterminée pour des températures comprises entre 4,2 K et 90 K. Pour les besoins de la normalisation, la densité de flux résiduel sera consignée pour la température de l'azote liquide.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60050(815):2000, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 815: Supraconductivité*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans la CEI 60050(815) ainsi que les suivants s'appliquent.

3.1

densité de flux résiduel

densité du flux magnétique (T) présent dans un supraconducteur haute température massif (BHTSC) pour un échantillon donné et à une température donnée

3.2

valeur maximale de densité de flux résiduel

valeur crête de la densité de flux résiduel

NOTE Pour la plupart des mesures, seule la composante z de la densité de flux est mesurée, qui est fortement altérée par la géométrie de l'échantillon ou l'effet démagnétisant (voir Article A.2). C'est pourquoi la densité de flux totale, qui intègre toutes les composantes du champ, peut également être considérée comme la propriété des matériaux pour établir leur densité de flux résiduel (voir Article A.1).

4 Principe

Les supraconducteurs qui présentent l'ancrage de flux sont capables de piéger les champs magnétiques, comme indiqué à la Figure 1. Dans ce cas, le rotationnel du champ magnétique interne ($\nabla \times \mathbf{B}$) dans le BHTSC est proportionnel à la densité de courant critique (J_c), selon l'équation suivante:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}_c$$

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 9: Measurements for bulk high temperature superconductors – Trapped flux density of large grain oxide superconductors

1 Scope

This part of IEC 61788 specifies a test method for the determination of the trapped field (trapped flux density) of bulk high temperature superconductors.

This International Standard is applicable to large grain bulk oxide superconductors that have well defined shapes such as round discs, rectangular, and hexagonal pellets. The trapped flux density can be assessed at temperatures from 4,2 K to 90 K. For the purpose of standardization, the trapped flux density will be reported for liquid nitrogen temperature.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050(815):2000, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 815: Superconductivity*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60050(815) and the following apply.

3.1

trapped flux density

strength of the magnetic flux density (T) trapped by a bulk high temperature superconductor (BHTSC) at a defined gap and at a defined temperature

3.2

maximum trapped flux density

peak value of the trapped flux density

NOTE For most measurements, only the z component of the flux density is measured, which is strongly affected by the sample geometry or the demagnetizing effect (see Clause A.2). Thus the total flux density, which is the integration of all the field components, may also be regarded as the materials property to stand for the trapped flux density (see Clause A.1).

4 Principle

Superconductors that exhibit flux pinning are capable of trapping magnetic fields, as shown in Figure 1. Here the internal magnetic flux density rotation ($\nabla \times \mathbf{B}$) in the BHTSC is proportional to the critical current density (J_c), as expressed by the following equation:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}_c$$

En unidimensionnel, l'équation se résume à

$$dB_z/dx = \mu_0 J_c^y$$

en coordonnées orthonormées ou à

$$dB_z/dr = \mu_0 J_c^\theta$$

en coordonnées cylindriques.

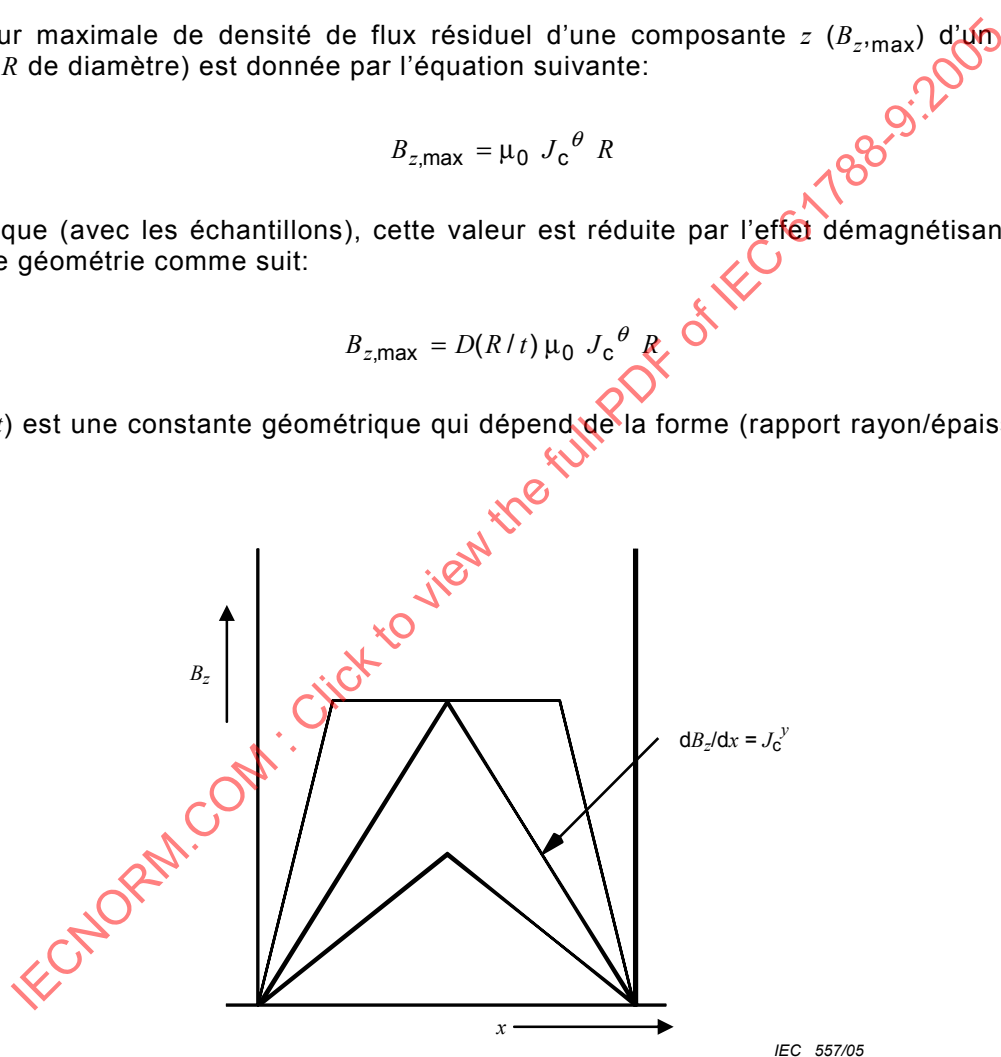
La valeur maximale de densité de flux résiduel d'une composante z ($B_{z,\max}$) d'un cylindre infini ($2R$ de diamètre) est donnée par l'équation suivante:

$$B_{z,\max} = \mu_0 J_c^\theta R$$

En pratique (avec les échantillons), cette valeur est réduite par l'effet démagnétisant ou par l'effet de géométrie comme suit:

$$B_{z,\max} = D(R/t) \mu_0 J_c^\theta R$$

où $D(R/t)$ est une constante géométrique qui dépend de la forme (rapport rayon/épaisseur) du BHTSC.



IEC 557/05

Figure 1 – Principe de la densité de flux résiduel dans un supraconducteur massif

In one dimension, the equation is reduced to

$$dB_z/dx = \mu_0 J_c^y$$

in rectangular coordinates or to

$$dB_z/dr = \mu_0 J_c^\theta$$

in cylindrical coordinates.

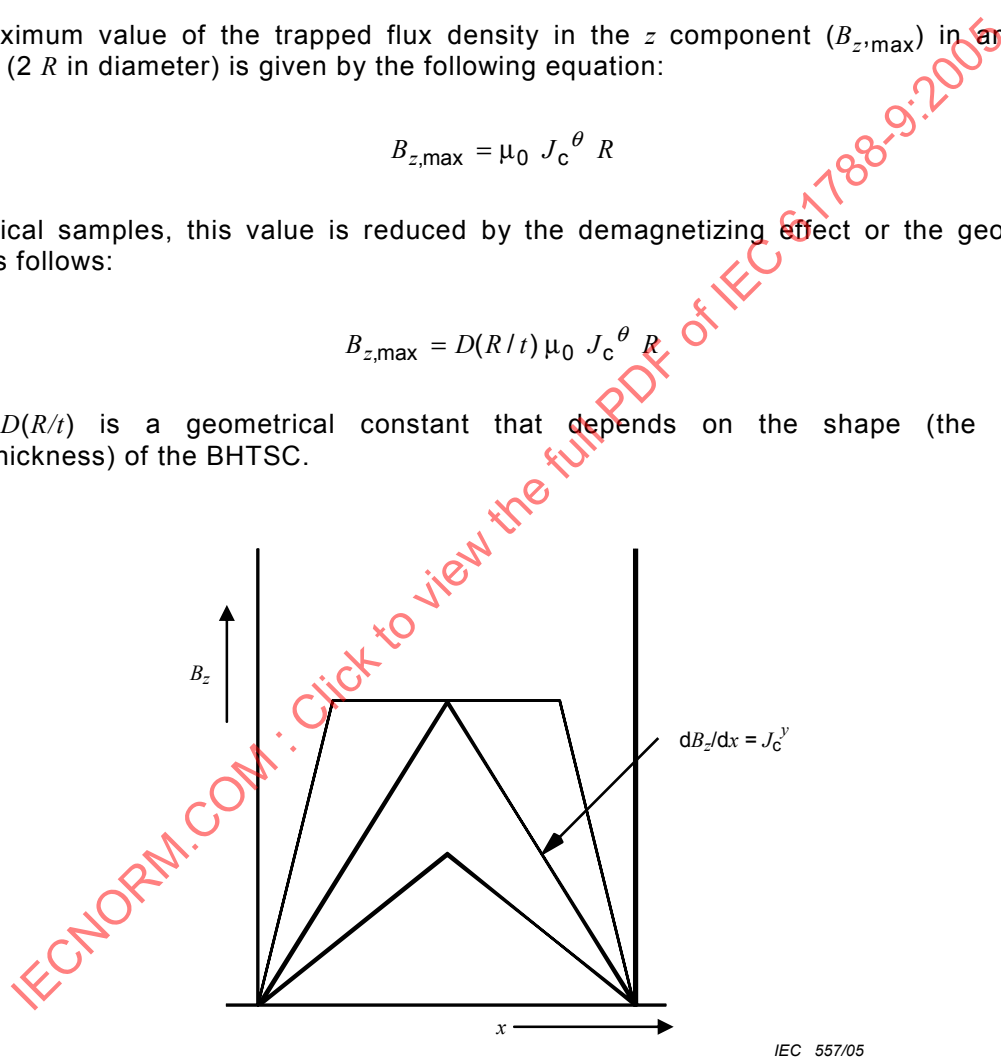
The maximum value of the trapped flux density in the z component ($B_{z,\max}$) in an infinite cylinder ($2R$ in diameter) is given by the following equation:

$$B_{z,\max} = \mu_0 J_c^\theta R$$

In practical samples, this value is reduced by the demagnetizing effect or the geometrical effect as follows:

$$B_{z,\max} = D(R/t) \mu_0 J_c^\theta R$$

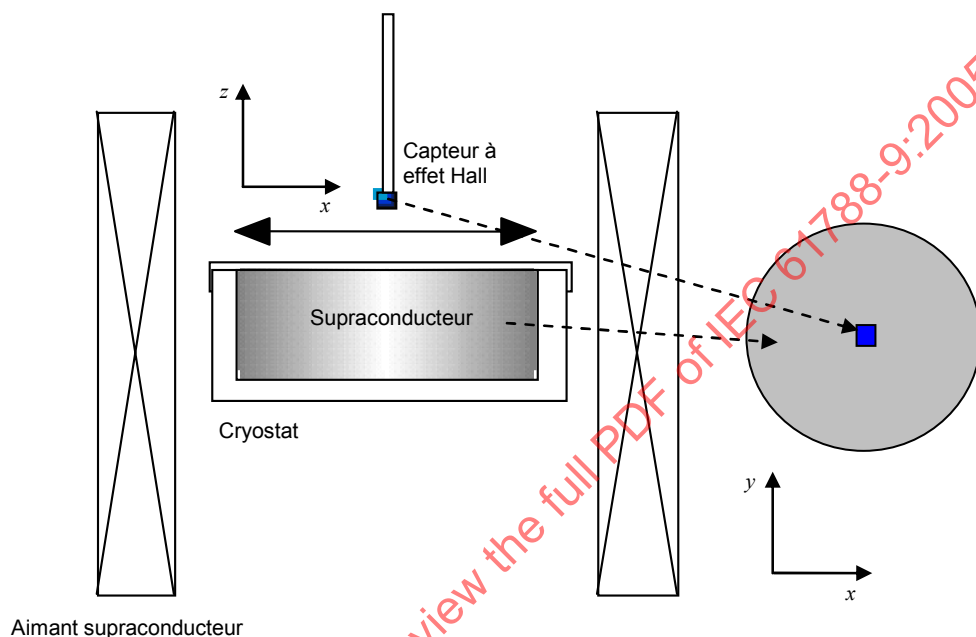
where $D(R/t)$ is a geometrical constant that depends on the shape (the ratio of radius/thickness) of the BHTSC.



IEC 557/05

Figure 1 – Principle of trapped flux density in bulk superconductor

La Figure 2 est le schéma de l'installation expérimentale pour mesurer la densité de flux résiduel [1]¹⁾. Il existe plusieurs méthodes de mesure de la densité de flux résiduel des BHTSC. La procédure de mesure suivante est typique. Premièrement, le champ est appliqué au supraconducteur. Deuxièmement, un échantillon est fixé sur la tête froide d'un cryostat, qui est refroidi jusqu'à la température attendue à l'aide d'un dispositif de refroidissement. Une fois la température attendue atteinte, le champ extérieur est retiré. Ensuite, la distribution du champ piégé par le BHTSC est mesurée, pour un entrefer donné, en balayant un capteur à effet Hall à la surface de l'éprouvette. Cette technique est appelée méthode d'aimantation par refroidissement en présence d'un champ.



IEC 558/05

Figure 2 – Vue schématique de l'installation expérimentale

5 Exigences

Une fois le champ extérieur retiré, la densité de flux résiduel diminuera progressivement avec le temps à partir de sa valeur initiale. Cela est dû au départ à l'écoulement de flux et ensuite au fluage de flux (collectivement nommés relaxation de flux). Cette valeur de crête initiale ne doit pas être utilisée dans la conception des machines.

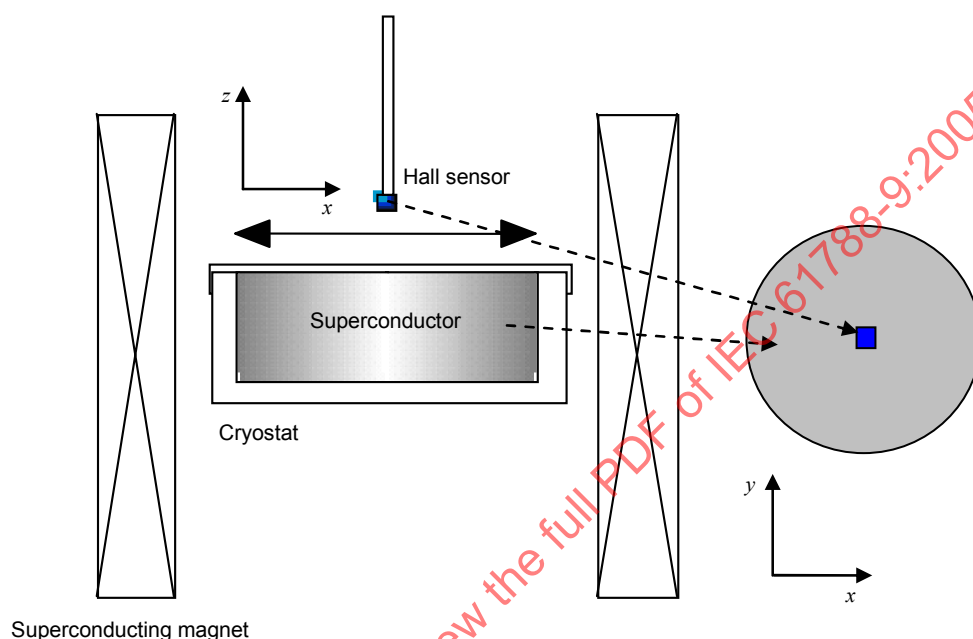
Les valeurs de densité de flux résiduel sont celles qui sont mesurées après qu'une période suffisamment longue se sera écoulée une fois l'installation du système de mesure effectuée. La valeur de densité de flux résiduel doit être mesurée au moins 15 min après le retrait du champ extérieur de l'éprouvette soumise à l'essai.

La précision attendue de cette méthode implique que le coefficient de variation dans n'importe lequel des essais de comparaison doit être inférieur ou égal à 5 % pour les mesures effectuées avec moins d'un mois d'intervalle [2].

Il relève de la responsabilité de l'utilisateur de la présente norme de consulter et d'établir les pratiques de santé et de sécurité appropriées et de déterminer l'applicabilité des limitations réglementaires avant de l'utiliser. Des précautions spécifiques sont données ci-dessous.

¹⁾ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la bibliographie.

Figure 2 shows a schematic diagram of the experimental set-up for trapped flux density measurements [1]¹⁾. There are several ways to measure the trapped flux density of BHTSC. A typical measurement procedure is as follows. Firstly, the field is applied on the superconductor. Secondly, the sample is fixed on the cold head of a cryostat, which is cooled to the target temperature by using a cooling device. After reaching the target temperature, the external field is removed. The distribution of the field trapped by the BHTSC is then measured by scanning a Hall sensor over the specimen surface at a defined gap. This is the so-called field-cooled (FC) method of magnetization.



IEC 558/05

Figure 2 – Schematic view of the experimental set-up

5 Requirements

Upon removal of the external field, the trapped flux density will decay with time from its initial value. This is due initially to flux flow and later to flux creep (collectively termed flux relaxation). The initial peak value shall not be used for the design of machines.

The trapped flux density values are those measured after a sufficiently long time has passed since the appropriate measurement conditions were reached. The trapped flux density values shall be measured at least 15 min after the external field is removed from the specimen under test.

The target precision of this method is that the coefficient of variation in any inter-comparison test shall be 5 % or less for measurements performed within 1 month of each other [2].

It is the responsibility of the user of this standard to consult and establish appropriate safety and health practices and to determine the applicability of regulatory limitations prior to use. Specific precautionary statements are given below.

¹⁾ Figures in square brackets refer to the bibliography.

Des risques existent dans ce type de mesure. De très forts courants continus avec de très faibles tensions ne représentent pas nécessairement un risque direct pour les personnes, mais les puissants champs magnétiques piégés par les BHTSC peuvent poser problème. Il est impératif d'isoler les champs magnétiques. L'énergie stockée dans les aimants supraconducteurs qui est utilisée pour générer le champ magnétique peut également créer de fortes impulsions de courant et/ou de tension ou déposer une grande quantité d'énergie thermique dans les systèmes cryogéniques, ce qui accélère l'ébullition et crée même des conditions explosives. Un contact direct de la peau avec des lignes de transfert de liquide froid, des «dewars» de stockage ou des composants de l'appareillage peut causer sa congélation immédiate, de même qu'un contact direct avec du cryogène renversé. Il est impératif de respecter les précautions de sécurité pour manipuler les liquides cryogéniques.

6 Appareillage

6.1 Cryostat

Le cryostat doit inclure un support d'éprouvette de BHTSC et un réservoir de cryogène liquéfié pour les mesures. D'autres dispositifs de refroidissement peuvent aussi être utilisés pour contrôler la température des éprouvettes. Avant les mesures, l'éprouvette doit être maintenue à la température de mesure pendant un temps suffisant pour permettre sa thermalisation, car les éprouvettes de BHTSC à gros grains ayant une taille type (diamètre supérieur à 3 cm) mettent beaucoup de temps à atteindre la température attendue. Le temps d'attente recommandé peut être calculé en considérant la taille et le coefficient de conductivité thermique du BHTSC. Pour un BHTSC à gros grains, la température a tendance à augmenter pendant les mesures, c'est pourquoi la puissance du dispositif de refroidissement doit être suffisante pour éviter la hausse de température de l'éprouvette.

6.2 L'aimant d'amorçage

En principe, tout aimant d'amorçage ou tout dispositif d'aimantation peut être utilisé tant que la densité de flux résiduel est à saturation (voir l'Article A.3).

L'aimant d'amorçage doit avoir une zone de travail plus grande que le BHTSC. Le champ généré par l'aimant requis pour amener à saturation la capacité de rétention de flux du BHTSC est déterminé par le facteur de démagnétisation de l'échantillon (voir l'Article A.3). Si le champ magnétique de l'aimant d'amorçage est suffisamment élevé, le champ appliqué ne doit pas nécessairement être uniforme.

L'amorçage du champ d'impulsion n'est pas recommandé dans la normalisation car l'erreur associée à ce procédé d'aimantation est très grande et les résultats ainsi obtenus sont généralement non reproductibles.

6.3 Support du BHTSC

Pendant les mesures de densité de flux résiduel, de grandes forces électromagnétiques vont agir sur le BHTSC. Ainsi, le BHTSC doit être solidement fixé sur le support, qui doit être non magnétique et doit avoir une résistance mécanique suffisante pour supporter la force électromagnétique. Le BHTSC doit être fixé sur le support, dans la plupart des cas avec des matériaux qui durcissent quand la température baisse. Si l'uniformité du BHTSC est suffisamment bonne quand l'axe c est aligné sur le champ extérieur, les mesures peuvent être effectuées en plaçant le BHTSC sur un substrat non magnétique.

A cause d'une grande anisotropie, les courants induits circulent principalement dans la branche $a-b$. Quand l'axe c n'est pas parallèle au champ extérieur, un grand couple agit sur le BHTSC pour aligner l'axe c de l'éprouvette parallèlement à la direction du champ extérieur. Le BHTSC s'inclinant souvent sous l'effet d'un tel couple, un support de couple supplémentaire s'avère nécessaire.

Hazards exist in this type of measurement. Very large direct currents with very low voltages do not necessarily provide a direct personal hazard, but strong magnetic fields trapped by the BHTSC may cause the problem. It is imperative to shield magnetic fields. Also the energy stored in the superconducting magnets commonly used for generating the magnetic field can cause large current and/or voltage pulses, or deposit a large amount of thermal energy in the cryogenic systems causing rapid boil-off or even explosive conditions. Direct contact of skin with cold liquid transfer lines, storage dewars or apparatus components can cause immediate freezing, as can direct contact with a spilled cryogen. It is imperative that safety precautions for handling cryogenic liquids be observed.

6 Apparatus

6.1 Cryostat

The cryostat shall include a BHTSC specimen support and a liquefied cryogen reservoir for the measurements. Other cooling devices can also be used for the temperature control of the specimens. Before measurements, the specimen shall be held at the measured temperature for a sufficient amount of time to cool, since large grain BHTSC specimens in typical size (greater than 3 cm in diameter) require a long time for the entire body to reach the target temperature. The recommended waiting time can be estimated by considering the size and thermal conductivity coefficient of the BHTSC. For a large grain BHTSC, the temperature tends to increase during the measurements, so the power of the cooling device shall be large enough to avoid a temperature rise of the specimen.

6.2 Activation magnet

In principle, any activation magnet or a magnetizing device can be used as long as the trapped flux density is saturated (see Clause A.3).

The activation magnet shall have a working area larger than the dimension of BHTSC. The magnetizing field required to saturate the field trapping ability of BHTSC is determined by the demagnetizing factor of the sample (see Clause A.3). If the field strength of the activation magnet is high enough, the applied field does not need to be uniform.

Pulse field activation is not recommended for standardization, since the error associated with this magnetization process is very large and its results are generally non-reproducible.

6.3 Support of BHTSC

During trapped flux density measurements, large electromagnetic forces will act on the BHTSC. Therefore, the BHTSC shall be firmly fixed to the support, which shall be non-magnetic and have a high enough mechanical strength to withstand the electromagnetic force. The BHTSC shall be fixed to the support, in most cases, with materials that harden at low temperatures. If the uniformity of the BHTSC is sufficiently good with the c -axis aligned to the external field, the measurements can be performed by simply placing the BHTSC on a non-magnetic substrate.

Due to the large anisotropy, induced currents mainly flow within the a - b plane. When the c -axis is not parallel to the external field, a large torque acts on the BHTSC so as to align the c -axis of the specimen parallel to the direction of external field. The BHTSC often tilts with such torque force that an extra support is necessary to withstand the torque.

Une grande force électromagnétique agit sur le BHTSC pendant les mesures, ce qui entraîne parfois sa fracture. Les BHTSC, matériaux céramiques, sont intrinsèquement fragiles; de plus, ils contiennent une grande quantité de pores et crevasses, ce qui détériore les propriétés mécaniques des BHTSC. C'est pourquoi la mesure pourrait entraîner la destruction du matériau. Les propriétés mécaniques peuvent être améliorées lors de la fabrication grâce au renforcement (voir l'Article A.4).

6.4 Unité de cartographie de champ

Une unité de cartographie de champ constituée d'un capteur magnétique à effet Hall ou de dispositions de capteurs magnétiques à effet Hall montés sur une platine de translation deux axes doit être utilisée. La zone de fonctionnement du capteur à effet Hall doit être strictement inférieure à 2 % de la zone éprouvette et doit avoir une sensibilité strictement inférieure à 0,001 T. Le domaine de translation du dispositif doit être supérieur à la plus grande dimension de l'éprouvette dans le plan x - y balayé.

La valeur du champ résiduel mesuré dépend de la distance entre la surface du dessus de l'éprouvette supraconductrice et le capteur à effet Hall. Cette distance, qui inclut l'épaisseur de la résine encapsulante et/ou la couche de renforcement, doit être maintenue à une valeur strictement inférieure à 10 % de l'épaisseur de l'éprouvette.

6.5 Mesures de température

La température du BHTSC doit être mesurée à l'aide d'un capteur de température approprié. Le capteur doit être monté sur l'embase aussi proche que possible de l'échantillon. On doit éviter l'usage des capteurs de température sensibles au champ magnétique.

7 Procédure de mesure

Le BHTSC doit être refroidi en présence du champ magnétique statique généré par l'aimant cité en 6.2 (refroidissement en présence d'un champ). Quand l'éprouvette est complètement refroidie, le champ d'amorçage doit être retiré ou réduit à zéro. Pour éviter une forte influence de l'écoulement de flux et du fluage de flux sur les mesures, on doit pouvoir installer l'éprouvette au moins 15 min avant d'effectuer les mesures.

La distribution du champ magnétique piégé par le BHTSC doit être mesurée à l'aide d'un capteur magnétique à effet Hall. Le capteur doit être balayé sur le plan x - y de l'éprouvette pour mesurer la composante z du champ magnétique sur une grille prédéfinie tout en maintenant un certain entrefer entre le capteur et la surface de l'éprouvette. L'espacement de la grille doit être strictement inférieur à 10 % de la plus grande des dimensions du plan x - y qui est balayé. Si la distribution du champ est symétrique dans une fourchette de 10 % sur chaque diamètre, la valeur de crête doit être considérée comme la densité de flux résiduel.

En variante, des dispositions de capteurs magnétiques à effet Hall peuvent être utilisées pour mesurer la densité de flux résiduel de l'éprouvette. Si l'espacement entre capteurs est suffisamment faible et que l'éprouvette est entièrement couverte de capteurs, un balayage n'est pas nécessaire.

Un étalonnage minutieux du capteur magnétique à effet Hall doit être effectué à température d'essai. La température à proximité du capteur à effet Hall doit être surveillée et utilisée pour corriger les données à l'aide de la courbe d'étalonnage du capteur à effet Hall.

8 Précision et justesse de la méthode d'essai

8.1 Température

La température de l'azote liquide doit être déterminée avec une précision de $\pm 0,25$ K, tout en maintenant l'éprouvette, montée sur l'embase de mesure.

A large electromagnetic force acts on the BHTSC during the measurements, which sometimes leads to fracture. BHTSC is a ceramic material and intrinsically brittle, furthermore it contains a large amount of pores and cracks, which deteriorates the mechanical properties of BHTSC. Thus the measurement might lead to the destruction of the BHTSC. The manufacturer can improve the mechanical properties by reinforcement (see Clause A.4).

6.4 Field mapping unit

A field mapping unit consisting of a magnetic Hall sensor or arrangements of magnetic Hall sensors mounted on a two-axis translational device shall be used. The sensing area of the Hall sensor shall be $<2\%$ of the area of the specimen and shall have sensitivity $<0,001\text{ T}$. The translation range of the device shall be larger than the largest dimension of the specimen in the x - y scanned plane.

The measured trapped field strength is dependent on the distance between the top surface of the superconducting specimen and the Hall sensor element. The distance, which includes the thickness of the encapsulating resin and/or layer of reinforcement, shall be kept at $<10\%$ of the specimen thickness.

6.5 Temperature measurements

The temperature of the BHTSC shall be measured with a suitable temperature sensor. The sensor shall be mounted on the support plate as closely to the sample as possible. Temperature sensors that are influenced by magnetic fields shall be avoided.

7 Measurement procedure

The BHTSC shall be cooled in the presence of a static magnetic field generated by the magnet discussed in 6.2 (field-cooled). When the specimen has been completely cooled, the activation field shall be removed or reduced to zero. In order to avoid a strong influence of flux flow and flux creep on the measurements, the specimen shall be allowed to settle for at least 15 min before measurements are performed.

The distribution of magnetic field trapped by BHTSC shall be measured with a magnetic Hall sensor. The sensor shall be scanned over the x - y plane of the specimen measuring the z component of magnetic field over a predetermined grid while maintaining a certain gap between the sensor element and the specimen surface. The grid spacing shall be $<10\%$ of the largest dimension of the x - y plane that is being scanned. If the field distribution is symmetric across every diameter within 10% , the peak value shall be regarded as the trapped flux density.

Alternatively, arrangements of magnetic Hall sensors can be used to measure the trapped flux density of the specimen. If the spacing of the sensors is small enough, and the entire specimen is covered by the sensors, scanning is not necessary.

Careful calibration of the magnetic Hall sensor shall be performed at operating temperature. The temperature near the Hall sensor shall be monitored and used to correct the data with the Hall sensor calibration curve.

8 Precision and accuracy of the test method

8.1 Temperature

The liquid nitrogen temperature shall be determined to an accuracy of $\pm 0,25\text{ K}$, while holding the specimen, which is mounted on the measuring base plate.

8.2 Champ

Le champ magnétique extérieur doit être déterminé avec une précision de $\pm 0,05$ T. Le capteur magnétique utilisé pour la cartographie de champ doit avoir une précision de $\pm 0,05$ T.

8.3 Distance d'entrefer

La distance entre la surface du dessus de l'éprouvette supraconductrice et le bas du capteur à effet Hall, qui comprend l'épaisseur de la résine encapsulante, doit être déterminée avec une précision de ± 10 %.

9 Rapport d'essai

Les indications suivantes doivent être notées si elles sont connues.

9.1 Eprouvette

L'éprouvette d'essai doit être identifiée, si possible, avec les informations suivantes.

- a) Forme et dimensions
- b) Traitement après développement (renforcement, irradiation, etc.)

9.2 Conditions d'essai

Les conditions d'essai suivantes doivent être notées.

- a) Aimant d'amorçage
Le champ maximal, le diamètre intérieur (ou le diamètre de l'échantillon pour un aimant BHTSC)
- b) Temps de réduction du champ extérieur à zéro
- c) Temps d'attente entre le retrait du champ extérieur et le début des mesures
- d) Spécification du capteur de champ magnétique
- e) Type, taille du capteur, zone d'amorçage, courbes d'étalonnage, sensibilité
- f) Emplacements du capteur de champ
- g) Méthode d'installation de l'éprouvette sur l'embase
- h) Matériaux, forme et dimension de l'embase
- i) Spécification de cryostat
- j) Nom(s) de thermomètres
- k) Emplacements des thermomètres par rapport au BHTSC

9.3 Densité de flux résiduel

Il convient que les informations suivantes soient fournies.

- a) Densité de flux résiduel
- b) Entrefer (entre le bas du capteur à effet Hall et le sommet de la surface de l'échantillon)
- c) Température
- d) Champ d'amorçage appliqué
- e) Carte de distribution du champ (optionnelle)

8.2 Field

The external magnetic field shall be determined to an accuracy of $\pm 0,05$ T. The magnetic sensor used for the field mapping shall be accurate within $\pm 0,05$ T.

8.3 Gap distance

The distance between the top surface of the superconducting specimen and the bottom of the Hall sensor element, which includes the thickness of the encapsulating resin, shall be determined to an accuracy of ± 10 %.

9 Test report

The following items shall be reported if known.

9.1 Specimen

The test specimen shall be identified, if possible, by the following information.

- a) Shape and dimensions
- b) Post growth treatment (reinforcement, irradiation etc.)

9.2 Test conditions

The following test conditions shall be reported.

- a) Activation magnet
The maximum field, the bore diameter (or sample diameter for BHTSC magnet)
- b) Time to reduce the external field to zero
- c) Waiting time to start measurements after the removal of the external field
- d) Specification of magnetic field sensor
- e) Kind, size, activation area, calibration curves, sensitivity
- f) Locations of field sensor
- g) Installation method of the specimen on the base plate
- h) Materials, shape and dimensions of the base plate
- i) Specification of cryostat
- j) Type(s) of thermometers
- k) Locations of thermometers with respect to the BHTSC

9.3 Trapped flux density

The following information should be provided.

- a) Trapped flux density
- b) Gap (between the bottom of the Hall sensor and the top of the sample surface)
- c) Temperature
- d) Applied activation field
- e) Field distribution map (optional)

Annexe A (informative)

Informations complémentaires relatives aux Articles 3 à 6

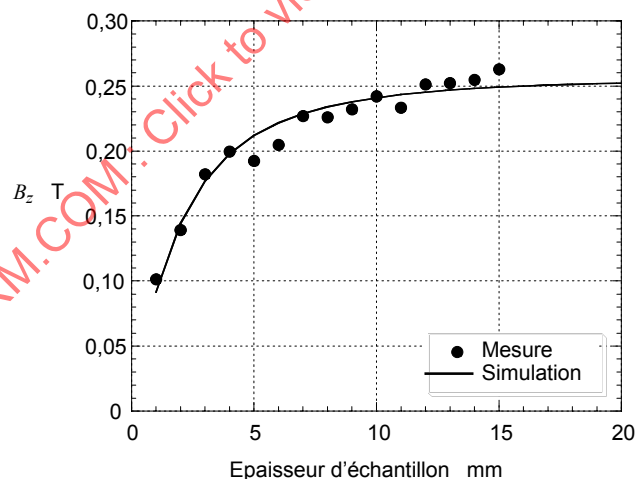
A.1 Définition des termes

Densité de flux résiduel totale

Pour les normes industrielles, la distribution de la composante z de la densité de flux résiduel est mesurée. Cependant, à cause de l'effet démagnétisant, la composante z est fortement altérée par la géométrie ou le rapport d'aspect d'un BHTSC. S'il est possible de mesurer toutes les composantes de la densité de flux résiduel, soit B_x , B_y , B_z , et si l'effet démagnétisant peut être négligé, $|\vec{B}| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$ est la densité de flux totale.

A.2 Effet de géométrie sur la densité de flux résiduel

La densité de flux résiduel est fortement dépendante de la géométrie de l'échantillon, spécialement le rapport d'aspect ou le rapport diamètre/épaisseur (voir Figure A.1). Sous l'effet des propriétés de la constante J_c-B , la densité de flux résiduel commence par croître avec l'augmentation de l'épaisseur puis atteint une valeur de saturation. C'est pourquoi il convient que les comparaisons entre échantillons soient effectuées avec des échantillons de même dimension, sinon, il est nécessaire de corriger l'effet de géométrie.



IEC 559/05

Figure A.1 – Dépendance de l'épaisseur de la densité de flux résiduel (B_z)

NOTE 1 Les échantillons ont un diamètre de 15 mm [3].

NOTE 2 La densité de flux résiduel augmente avec l'épaisseur puis atteint une valeur de saturation.

Annex A (informative)

Additional information related to Clauses 3 to 6

A.1 Definition of term

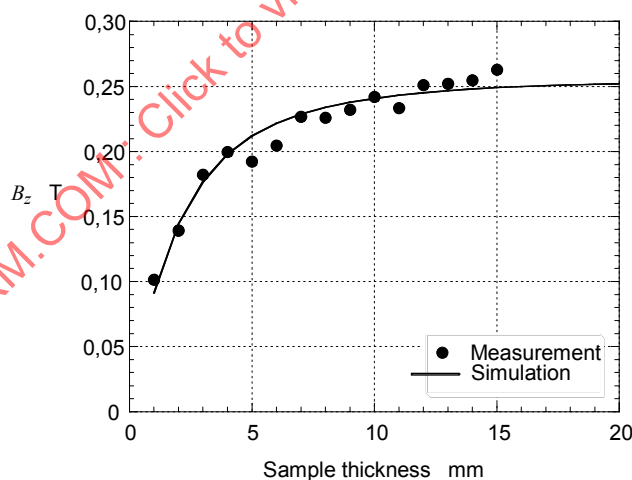
Total trapped flux density

For industrial standard, we measure the distribution of the z component of trapped flux density. However, due to the demagnetizing effect, the z component is strongly affected by the geometry or the aspect ratio of a BHTSC. If one can measure all the components of trapped flux density, which are B_x , B_y , B_z , and the demagnetizing effect can be neglected,

$|\vec{B}| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$ is termed the total flux density.

A.2 Geometrical effect on trapped flux density

The trapped flux density is strongly dependent on the sample geometry, especially the aspect ratio or the diameter/thickness ratio (see Figure A.1). Under constant J_c - B properties, the trapped flux density first increases with increasing thickness and saturates at a certain value. Thus an inter-comparison of different samples should be performed with the same dimensions, otherwise a correction of the geometry effect is necessary.



IEC 559/05

Figure A.1 – Thickness dependence of the trapped flux density (B_z)

NOTE 1 Samples are 15 mm in diameter [3].

NOTE 2 The trapped flux density increases with increasing thickness and then saturates.

A.3 Aimant d'amorçage

Les électroaimants conducteurs normaux peuvent être utilisés pour l'amorçage; cependant, il convient de confirmer que la densité de flux résiduel maximal du BHTSC est inférieure au champ d'amorçage.

Il est important que l'aimant d'amorçage ait une zone de travail plus grande que le BHTSC, zone dans laquelle un champ constant est appliqué au BHTSC soit à l'aide d'un électroaimant ou d'un autre BHTSC. Le champ généré par l'aimant doit être suffisant pour augmenter jusqu'à saturation la capacité de rétention de flux du BHTSC. Si le champ magnétique de l'aimant d'amorçage est suffisamment élevé, le champ appliqué ne doit pas nécessairement être uniforme. Il convient de déterminer le champ maximal en considérant le champ de saturation et les effets de désaimantation associés aux dimensions de l'échantillon. Par exemple, un champ appliqué d'au moins 1,75 fois le flux résiduel maximal est requis pour aimanter pleinement un échantillon supraconducteur avec un rapport largeur sur longueur de 2,5 [2]. Ce niveau d'aimantation augmente plus le rapport augmente.

A.4 Renforcement du BHTSC

Pendant les mesures de densité de flux résiduel, l'éprouvette de BHTSC est soumise à une grande contrainte thermique et à une grande pression électromagnétique. En céramique fragile, le BHTSC se fissure souvent à cause de ces contraintes. Il est donc souhaitable de renforcer les BHTSC non seulement pour la normalisation mais aussi pour les applications industrielles.

Les renforcements avec anneaux métalliques sont communément utilisés. Il a été récemment établi que l'imprégnation de résine améliorerait efficacement les propriétés mécaniques des BHTSC. Dans cette méthode, le BHTSC est immergé dans de la résine en fusion et la pression environnante est réduite par pompage. La résine remplit les fissures et les vides en surface, ce qui améliore considérablement les propriétés mécaniques.

A.5 Capteur magnétique

N'importe quel capteur magnétique peut être utilisé pour les mesures de densité de flux résiduel. Les capteurs à effet Hall et bobines de détection ont été communément utilisés pour les mesures. Les capteurs à effet Hall ont souvent une dépendance de température, si bien que la température du capteur à effet Hall et la méthode d'étalonnage utilisée doivent être connues. Une façon de garantir la température du capteur à effet Hall est de le faire fonctionner dans de l'azote liquide.

A.6 Extrapolation à l'entrefer zéro

Pour une comparaison correcte de la densité de flux résiduel, on peut facilement extrapoler la valeur de densité résiduelle B_z pour entrefer fini (z) à l'entrefer zéro en utilisant l'équation suivante dans le cas d'un cylindre:

$$B_z(z) = C \left((z + D) \ln \frac{R + \sqrt{R^2 + (z + D)^2}}{z + D} - z \ln \frac{R + \sqrt{R^2 + z^2}}{z} \right)$$

où C est la constante relative à la densité de courant critique, R est le rayon et D la hauteur du cylindre [4]. Par exemple, dans l'échantillon cylindrique de 30 mm de diamètre et 15 mm d'épaisseur et avec 2,6 T de valeur crête de densité de flux résiduel à l'entrefer zéro, la densité de flux résiduel chute quand l'entrefer augmente, comme l'illustre la Figure A.2. Toutefois, il convient de mentionner que cette méthode est une approximation de premier ordre, et qu'elle ne constituera pas une bonne approximation lorsque le champ dépend de façon significative de la densité de courant critique.

A.3 Activation magnet

Normal conducting electromagnets can be used for activation, however, it should be confirmed that the maximum trapped flux density of the BHTSC is smaller than the activation field.

It is important for the activation magnet to have a working area larger than the dimension of BHTSC, in which a constant field is applied to BHTSC either by an electromagnet or by another BHTSC. The field generated by the magnet needs to be high enough to saturate the field trapping ability of BHTSC. If the field strength of the activation magnet is high enough, the applied field does not need to be uniform. The maximum field should be determined by considering the saturation field and demagnetizing effects associated with the sample dimensions. For example, an applied field of at least 1,75 times the maximum trapped field is required to fully magnetize a superconducting sample with a width to thickness aspect ratio of 2,5 [2]. This level of magnetizing field increases with increasing the ratio.

A.4 Reinforcement of BHTSC

During trapped flux density measurements, the BHTSC specimen experiences a large thermal stress and a large electromagnetic pressure. Since the BHTSC is a brittle ceramic, it often fractures due to the stresses. Hence it is desirable to reinforce the BHTSC not only for standardization but also for industrial applications.

Reinforcements with metal rings are commonly employed. Recently, resin impregnation has been found to be effective in improving the mechanical properties of BHTSC. In this method, the BHTSC is immersed in molten resin and placed in a vacuum. The resin fills open cracks and voids near the surface, leading to a dramatic improvement of mechanical properties.

A.5 Magnetic sensor

Any magnetic sensor can be used for the measurements of trapped flux density. Hall sensors and pick-up coils have been commonly used for the measurements. Hall sensors often have temperature dependence, so the temperature of the Hall sensor needs to be known along with the calibration method used. One way to ensure the temperature of the Hall sensor is to operate it in liquid nitrogen.

A.6 Extrapolation to zero gap

For fair comparison of the trapped flux density, one may extrapolate the trapped flux density value B_z at a finite gap (z) to zero gap using the following equation in the case of a cylinder:

$$B_z(z) = C \left((z + D) \ln \frac{R + \sqrt{R^2 + (z + D)^2}}{z + D} - z \ln \frac{R + \sqrt{R^2 + z^2}}{z} \right)$$

where C is the constant related to the critical current density, R is the radius and D the height of the cylinder [4]. For example, in the cylindrical sample 30 mm in diameter and 15 mm in thickness with the peak value of the trapped flux density of 2,6 T at zero gap, the trapped flux density decays with gap as shown in Figure A.2. But one should notice that this method is a first order approximation, and will not be a good approximation when the field dependence of the critical current density is significant.

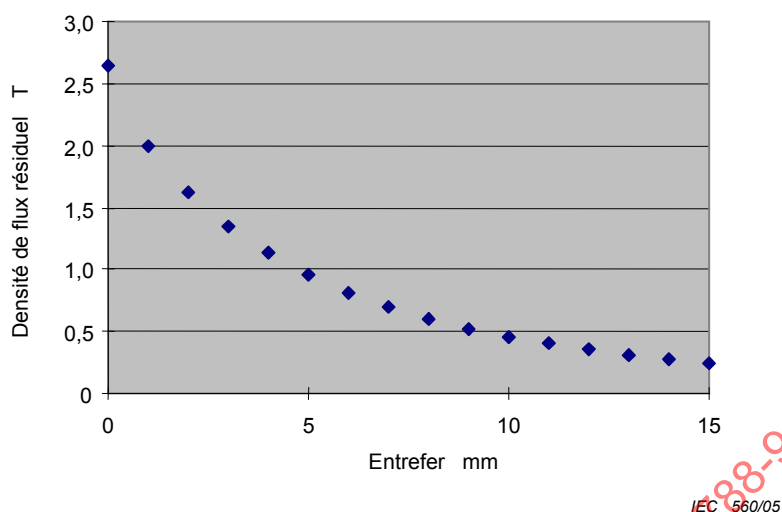


Figure A.2 – Dépendance de l'entrefer du champ magnétique

NOTE 1 Le diamètre de l'échantillon est de 30 mm et son épaisseur 15 mm. La valeur de crête de densité de flux résiduel est de 2,6 T à l'entrefer zéro.

NOTE 2 On peut facilement déterminer la valeur de densité résiduelle B_z pour un entrefer arbitraire (z) à partir des données obtenues pour un autre entrefer.

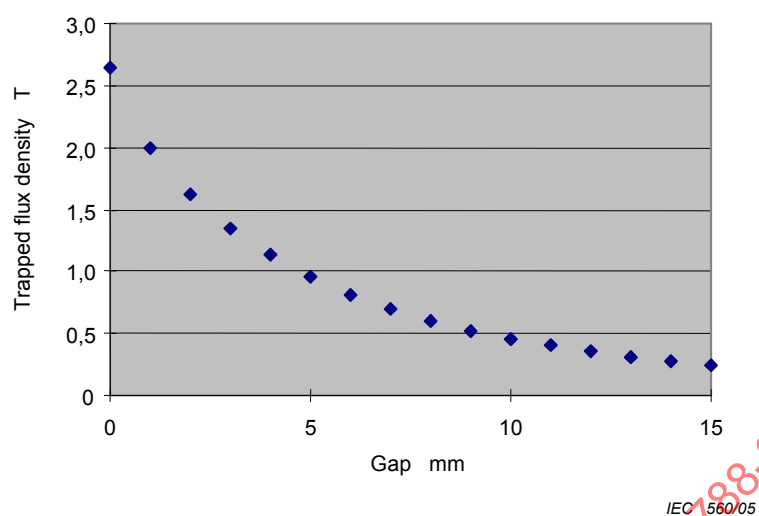


Figure A.2 – Gap dependence of the field strength

NOTE 1 The sample is 30 mm in diameter and 15 mm in thickness. The maximum trapped flux density is 2,6 T at zero gap.

NOTE 2 One may be able to determine the trapped flux density value B_z at any arbitrary gap (z) using the data at another gap.

Annexe B (informative)

Mesures de la force de lévitation des supraconducteurs haute température massifs

B.1 Principe

La force de lévitation est souvent utilisée pour caractériser les BHTSC. Les mesures de force étant plus faciles à effectuer que les mesures de densité de flux résiduel, elles sont plus largement utilisées. Cependant, la force de lévitation est essentiellement limitée par le champ magnétique et la distribution spatiale d'un aimant permanent communément utilisé pour les mesures de force.

B.2 Appareillage

B.2.1 Aimant permanent

Dans une méthode d'essai normalisée, il convient d'utiliser un aimant permanent (PM) avec des propriétés magnétiques identiques ($BH_{\max}$, B_r , et B_c) et des dimensions identiques (rayon et hauteur). Si la taille des BHTSC n'est pas la même, il convient que le rapport dimensionnel PM/BHTSC reste constant pour les essais comparatifs.

Comme les propriétés magnétiques de l'aimant permanent sont fortement dépendantes de la température, il convient également d'apporter un soin particulier au maintien d'une température d'aimant permanent constante pendant les mesures de force. A cet effet, il convient que les aimants permanents soient couverts de résine époxy ou d'autres matériaux à faible conductivité thermique. Il est également souhaitable d'isoler thermiquement le cryostat dans lequel est installé le BHTSC ou d'isoler thermiquement l'aimant permanent.

B.2.2 Support d'un supraconducteur massif

Pendant les mesures de force, il convient de fixer solidement le BHTSC sur son support, parce que le supraconducteur sera soumis à une grande force électromagnétique. Le BHTSC et son support sont refroidis dans un cryostat. Il convient de maintenir constante la température du cryostat pendant les mesures. Comme mentionné ci-dessus, il convient d'avoir une puissance de refroidissement de cryostat suffisante pour éviter l'augmentation de la température du BHTSC. Il convient d'avoir une résistance mécanique de support suffisante pour éviter le déplacement du BHTSC pendant les mesures de force. Dans la plupart des cas, le BHTSC est collé au support à l'aide d'un matériau qui durcit quand la température baisse. Il est souhaitable de mettre une fixation supplémentaire à l'aide d'un papier métallique non magnétique entre le BHTSC et son support.

B.2.3 Unité d'entraînement de l'aimant permanent

Les forces de lévitation sont mesurées pendant que l'aimant permanent est rapproché puis éloigné du BHTSC. Il convient d'avoir une faible vitesse d'approche de l'aimant permanent parce que cette vitesse affecte les valeurs de force et qu'elle décroît sous l'effet de l'écoulement de flux et du fluage de flux.

B.2.4 Unité de mesure de force

Il convient de mesurer la force de lévitation en utilisant un indicateur de contrainte normalisé. Il est recommandé d'utiliser une machine de traction mesurant les forces.

Annex B (informative)

Measurements for levitation force of bulk high temperature superconductors

B.1 Principle

The levitation force is often used for characterizing the BHTSC. The force measurements are much easier than the trapped flux density measurements, and thus more widely used. However, the levitation force is essentially limited by the field strength and the spatial distribution of a permanent magnet, which is commonly used for the force measurements.

B.2 Apparatus

B.2.1 Permanent magnet

A permanent magnet (PM), which has identical magnetic properties ($BH_{\max}$, B_r , and B_c) and identical dimensions (radius and height) should be used for a standard test method. When the size of the BHTSC is not the same, at least, the dimensional ratio of PM/BHTSC should be maintained constant for comparison.

Special care should also be paid to maintaining a temperature of the PM constant during the force measurements, since magnet properties of the PM are strongly temperature dependent. For this purpose, the PM should be covered with epoxy resin or other materials with small thermal conductivity. It is also desirable to thermally insulate the cryostat, in which the BHTSC is installed, or to thermally shield the PM.

B.2.2 The support of the bulk superconductor

During force measurements, the BHTSC should be firmly fixed to the support, since a large electromagnetic force will act on the superconductor. The support and the BHTSC are cooled in a cryostat, whose temperature should be kept constant during measurements. As mentioned above the cooling power of the cryostat should be large enough to avoid the temperature rise of the BHTSC. The mechanical strength of the support should be large enough to avoid the motion of the BHTSC during force measurements. In most cases, the BHTSC is glued to the support with a material that hardens with decreasing temperature. It is desirable to further fix the BHTSC to the support using a non-magnetic metal sheath.

B.2.3 Driving unit of the PM

The levitation forces are measured as the PM is moved toward and away from the BHTSC. The approach speed of the PM should be low, since it strongly affects the force values, and also the decay due to flux flow and flux creep.

B.2.4 Force measurement unit

The levitation force should be measured using a standardized strain gauge. The tensile testing machine type force measuring system is recommended.

B.3 Rapport d'essai

Il convient de mesurer la force de lévitation comme une fonction de l'entrefer entre l'aimant permanent et le BHTSC. Il convient d'avoir un entrefer initial suffisant pour éviter que le champ de l'aimant permanent ne soit piégé par le BHTSC. La force est d'abord mesurée quand le PM se rapproche du BHTSC, ensuite, la force est mesurée alors que le PM s'éloigne du BHTSC. Après un cycle de mesure, il convient de remonter la température du BHTSC au-dessus de la température critique, parce que le flux magnétique est toujours piégé par le BHTSC pendant les mesures de force, ce qui affectera les valeurs de force dans le cycle de mesure suivant. Il convient d'enregistrer la force et la distance à l'aide d'un ordinateur pour des vitesses d'approche identiques de l'aimant permanent lorsqu'il s'approche et s'éloigne du BHTSC.

Il convient de répéter les mesures de force en diminuant progressivement la vitesse d'approche de l'aimant permanent à chaque fois. Si l'approche est suffisamment lente, les courbes de force et d'entrefer deviennent les mêmes. Dans ce cas, la force de lévitation peut être définie comme la valeur pour un entrefer donné. Cependant, la valeur de force pouvant être utilisée pour concevoir des machines sera inférieure à cette valeur. Pour obtenir une telle valeur, le PM est approché à l'entrefer donné à une vitesse suffisamment lente et est ensuite laissé pendant 1 h en surveillant la décroissance de la force de lévitation. La force de lévitation est ensuite définie comme étant la valeur maintenue à cet entrefer pendant au moins 1 h.

Pour généraliser les résultats, il est possible de noter la force comme une fraction du maximum théorique, qui est la force obtenue quand le BHTSC se comporte comme un parfait aimant. Dans ce cas, les conditions de mesure de force ne sont pas vraiment si importantes. Le problème est le calcul du maximum théorique. (Les fournisseurs d'aimants permanents ont développé leurs propres logiciels afin d'obtenir cette valeur.)

B.4 Relation entre le champ magnétique piégé et la force de lévitation

Les valeurs de densité de flux résiduel ne sont fortement liées à la force de lévitation que lorsque le champ magnétique utilisé pour mesurer la force est suffisamment important pour que le champ extérieur atteigne le centre des éprouvettes. De telles conditions ne sont pas remplies dans la plupart des essais, au cours desquels la force de lévitation des BHTSC à gros grains est mesurée à l'aide d'un aimant permanent conventionnel. Cependant, les valeurs de densité de flux résiduel peuvent être converties en valeur de force de lévitation, une fois que la dépendance vis à vis du champ de J_c macroscopique est connue.

L'aimantation d'un supraconducteur est donnée par la relation suivante:

$$M(H) = AJ_c(B)d$$

où M est l'aimantation, A la constante géométrique, J_c la densité de courant critique et d l'échelle de longueur caractéristique de la boucle des super-courants. Cette équation s'applique à la fois aux mesures de force de lévitation et de densité de flux résiduel quand les supracourants circulent dans l'ensemble du supraconducteur. De telles conditions sont facilement réunies lors des mesures de densité de flux résiduel, mais pas lors des mesures de force, au cours desquelles les champs extérieurs ne pénètrent qu'une fine couche de surface. En état de pénétration partielle, M est donné par

$$M = -H + \frac{H^2}{J_c d}$$

B.3 Test report

The levitation force should be measured as a function of the gap between the PM and the BHTSC. The initial gap should be large enough to avoid the field of the PM being trapped by the BHTSC. First the force is measured as the PM approaches to the BHTSC, and then the force is measured as the PM moves away from the BHTSC. After the cycle, the BHTSC should be warmed above the critical temperature, since magnetic flux is always trapped by the BHTSC during the force measurements. This trapped flux would affect the force values in the second cycle. The force and the gap should be recorded with a computer at an identical approaching speed of the PM toward and away from the BHTSC.

Force measurements should be repeated by gradually reducing the approach speed of the PM each time. If the approach is slow enough, the force versus gap curves become the same. Here, the levitation force may be defined as the value at a defined gap. However, the force value, which can be used for machine design, will be smaller than this value. For obtaining such a value, the PM approaches to the defined gap at enough speed and is left there for 1 h while monitoring the decay of the levitation force. The levitation force is then defined as the value held at the gap for at least 1 h.

In order to make results more general it is also possible to report the force as a fraction of the theoretical maximum, that is the force obtained when the BHTSC behaves as a perfect diamagnet. In this case, the force measurement conditions are not so critically important. The problem is how to calculate the theoretical maximum. (PM companies have developed their own computer programs to obtain this value.)

B.4 Relationship between the trapped magnetic field and the levitation force

Trapped flux density values have a strong correlation to the levitation force only when the field strength used for force measurements is large enough for the external field to reach the centre of the specimen. Such a condition is not fulfilled in most experiments, where the levitation force of large grain BHTSC is measured using a conventional permanent magnet. However, the trapped flux density values may be converted to the levitation force values, once the field dependence of macroscopic J_c is known.

The magnetization of a superconductor is given by the following relation:

$$M(H) = AJ_c(B)d$$

where M is the magnetization, A is a geometrical constant, J_c the critical current density and d is the characteristic length scale of the supercurrent loop. This equation applies to both the levitation force and the trapped flux density measurements under the condition that supercurrents are flowing in the entire body. Such a condition is easily fulfilled in the trapped flux density measurements, however not for the force measurements, in which the external field does not reach the centre of the BHTSC. In the state of partial penetration, M is given by

$$M = -H + \frac{H^2}{J_c d}$$