

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61788-1

Deuxième édition
Second edition
2006-11

Supraconductivité –

Partie 1:

Mesure du courant critique –

**Courant critique continu de supraconducteurs
en composite Nb-Ti**

Superconductivity –

Part 1:

Critical current measurement –

**DC critical current of Nb-Ti composite
superconductors**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61788-1:2006

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**

61788-1

Deuxième édition
Second edition
2006-11

Supraconductivité –

Partie 1:

Mesure du courant critique –

**Courant critique continu de supraconducteurs
en composite Nb-Ti**

Superconductivity –

Part 1:

Critical current measurement –

**DC critical current of Nb-Ti composite
superconductors**

© IEC 2006 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

U

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.....	14
5 Exigences	14
6 Appareillage	16
6.1 Matériau du mandrin de mesurage	16
6.2 Construction du mandrin	16
7 Préparation du spécimen	18
7.1 Fixation du spécimen	18
7.2 Montage du spécimen	18
8 Procédure de mesure	20
9 Incertitude de la méthode d'essai	22
9.1 Courant critique.....	22
9.2 Température.....	22
9.3 Champ magnétique	22
9.4 Structure de support du spécimen et du mandrin	24
9.5 Protection du spécimen	24
10 Calcul des résultats	24
10.1 Critères de courant critique.....	24
10.2 Valeur n (calcul facultatif, se reporter à A.7.2).....	26
11 Compte rendu d'essai.....	28
11.1 Identification du spécimen d'essai	28
11.2 Compte rendu des valeurs I_C	28
11.3 Compte rendu des conditions d'essai	28
Annexe A (informative) Informations supplémentaires relatives à la norme	30
Annexe B (informative) Effet de champ induit.....	46
Annexe C (normative) Méthode d'essai pour les supraconducteurs composites Cu/Cu-Ni/Nb-Ti	50
Annexe D (informative) Guide pour l'estimation de la force de traction d'enroulement.....	52
Bibliographie.....	56
Figure 1 – Caractéristique $U-I$ intrinsèque.....	26
Figure 2 – Caractéristique $U-I$ avec une composante de transfert de courant.....	26
Figure A.1 – Instrumentation du spécimen avec une paire de prises de tension nulle.....	44
Tableau D.1 – Valeurs typiques de E à température ambiante pour divers matériaux.....	54

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	9
1 Scope.....	11
2 Normative references	11
3 Terms and definitions	11
4 Principle	15
5 Requirements	15
6 Apparatus.....	17
6.1 Measurement mandrel material	17
6.2 Mandrel construction	17
7 Specimen preparation.....	19
7.1 Specimen bonding.....	19
7.2 Specimen mounting.....	19
8 Measurement procedure.....	21
9 Uncertainty of the test method.....	23
9.1 Critical current.....	23
9.2 Temperature.....	23
9.3 Magnetic field.....	23
9.4 Specimen and mandrel support structure.....	25
9.5 Specimen protection.....	25
10 Calculation of results.....	25
10.1 Critical current criteria	25
10.2 n -value (optional calculation, refer to A.7.2)	27
11 Test report.....	29
11.1 Identification of test specimen	29
11.2 Report of I_c values	29
11.3 Report of test conditions.....	29
Annex A (informative) Additional information relating to the standard.....	31
Annex B (informative) Self-field effect	47
Annex C (normative) Test method for Cu/Cu-Ni/Nb-Ti composite superconductors	51
Annex D (informative) Guidance for estimating winding tensile force.....	53
Bibliography.....	57
Figure 1 – Intrinsic U - I characteristic	27
Figure 2 – U - I characteristic with a current transfer component.....	27
Figure A.1 – Instrumentation of specimen with a null voltage tap pair	45
Table D.1 – Typical values of E at room temperature for various materials	55

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SUPRACONDUCTIVITÉ –

**Partie 1: Mesure du courant critique –
Courant critique continu de supraconducteurs en composite Nb-Ti**

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 61788-1 a été établie par le comité d'études 90 de la CEI: Supraconductivité.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition publiée en 1998. Cette édition constitue une révision technique.

Les modifications techniques majeures apportées à cette seconde édition comprennent:

- l'addition d'une Annexe C normative et d'une Annexe D informative;
- les termes «exactitude» et «précision» ont été remplacés par le terme «incertitude»;
- l'uniformité du champ magnétique, qui était spécifiée à $\pm 2\%$, a été réduite pour être inférieure à la valeur la plus grande de $0,5\%$ ou $0,02\text{ T}$.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SUPERCONDUCTIVITY –**Part 1: Critical current measurement –
DC critical current of Nb-Ti composite 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 61788-1 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 1998. It constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- the addition of normative Annex C and informative Annex D;
- accuracy and precision statements were converted to uncertainty statements;
- the magnetic field uniformity statement was tightened from $\pm 2\%$ to be less than the larger of 0,5% or 0,02 T.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
90/196/FDIS	90/201/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.

Une liste de toutes les parties de la série CEI 61788, présentées sous le titre général *Supraconductivité*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-1:2006

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

FDIS	Report on voting
90/196/FDIS	90/201/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.

A list of all parts of IEC 61788 series, published under the general title *Superconductivity*, can be found on the IEC website.

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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-1:2006

INTRODUCTION

Les courants critiques de supraconducteurs en composite permettent d'établir les limites de conception des applications des fils supraconducteurs. Les conditions de fonctionnement des supraconducteurs dans ces applications déterminent en grande partie leur comportement, et il est permis d'utiliser les essais effectués selon la méthode présentée dans la présente partie de la CEI 61788 pour obtenir une partie des informations permettant de déterminer si un supraconducteur spécifique est adapté ou non.

Il est également permis d'utiliser les résultats obtenus grâce à la présente méthode pour détecter, dans les propriétés supraconductrices d'un supraconducteur en composite, des modifications résultant de variables de traitement, de la manipulation, du vieillissement, d'autres applications ou conditions ambiantes. La présente méthode est utile dans le contrôle de la qualité, les essais de réception et de recherche, lorsque les précautions précisées dans la présente norme sont observées.

Les courants critiques de supraconducteurs en composite dépendent de nombreuses variables. Il est nécessaire de considérer ces variables lors des essais et de l'application de ces matériaux. Les conditions d'essai telles que le champ magnétique, la température et l'orientation relative du spécimen, le courant et le champ magnétique sont déterminées en fonction de l'application considérée. Il est permis de déterminer la configuration d'essai en fonction du conducteur considéré, avec certaines tolérances. Il est permis de déterminer le critère spécifique de courant critique en fonction de l'application considérée. En cas d'irrégularités lors des essais, il est permis de mesurer un certain nombre de spécimens d'essai.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-1:2006

INTRODUCTION

The critical currents of composite superconductors are used to establish design limits for applications of superconducting wires. The operating conditions of superconductors in these applications determine much of their behaviour, and tests made with the method given in this part of IEC 61788 may be used to provide part of the information needed to determine the suitability of a specific superconductor.

Results obtained from this method may also be used for detecting changes in the superconducting properties of a composite superconductor due to processing variables, handling, ageing or other applications or environmental conditions. This method is useful for quality control, acceptance or research testing, if the precautions given in this standard are observed.

The critical current of composite superconductors depends on many variables. These variables need to be considered in both the testing and the application of these materials. Test conditions such as magnetic field, temperature and relative orientation of the specimen, current and magnetic field are determined by the particular application. The test configuration may be determined by the particular conductor through certain tolerances. The specific critical current criterion may be determined by the particular application. It may be appropriate to measure a number of test specimens if there are irregularities in testing.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-1:2006

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 1: Mesure du courant critique – Courant critique continu de supraconducteurs en composite Nb-Ti

1 Domaine d'application

Cette partie de la CEI 61788 couvre une méthode d'essai pour la détermination du courant critique continu des supraconducteurs en composite Cu/Nb-Ti qui ont un rapport cuivre/supraconducteur supérieur à 1 ou des fils Cu/Cu-Ni/Nb-Ti qui ont un rapport cuivre/supraconducteur supérieur à 0,9 et un alliage cuivre (Cu-Ni)/supraconducteur supérieur à 0,2, où le diamètre des filaments supraconducteurs Nb-Ti est supérieur à 1 μm . Les modifications pour les Cu/Cu-Ni/Nb-Ti sont décrites dans l'Annexe C. Les Cu-Ni pourront faire référence aux parties principales de cette norme avec les exceptions listées dans l'Annexe C qui remplacent (et dans certains cas contredisent) certaines étapes du texte principal.

La présente méthode est destinée à être utilisée avec des supraconducteurs caractérisés par des courants critiques inférieurs à 1 000 A et des valeurs n supérieures à 12, dans des conditions d'essai normalisées et avec des champs magnétiques inférieurs ou égaux à 0,7 fois la valeur du champ magnétique critique le plus élevé. Le spécimen d'essai est immergé dans un bain d'hélium liquide à une température mesurée pendant l'essai. Le conducteur d'essai en composite Cu/Nb-Ti a une structure monolithique, avec une superficie de section ronde ou rectangulaire inférieure à 2 mm². Le spécimen utilisé dans la présente méthode d'essai a la forme d'une bobine inductive. La présente norme présente les écarts par rapport à la méthode d'essai qui sont autorisés dans les essais de série, ainsi que d'autres restrictions spécifiques.

Les conducteurs d'essai dont les courants critiques sont supérieurs à 1 000 A ou dont les superficies de section sont supérieures à 2 mm² pourraient faire l'objet d'une mesure par la présente méthode, en prévoyant une augmentation de l'incertitude et avec un effet de champ induit plus important (voir Annexe B). Il est permis d'utiliser d'autres géométries de spécimen d'essai, plus spécialisées et mieux adaptées aux essais sur les conducteurs plus grands, qui ne sont pas incluses dans la présente norme, par souci de simplicité et pour réduire l'incertitude.

La méthode d'essai décrite dans la présente norme est supposée adaptable à d'autres fils supraconducteurs en composite, après des modifications appropriées.

2 Références normatives

Les documents référencés ci-après sont indispensables pour l'application de ce document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, c'est l'édition la plus récente du document référencé (y compris tous ses amendements) qui s'applique.

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

3 Termes et définitions

Pour les besoins de la présente norme, les termes et les définitions donnés dans la CEI 60050-815, dont certains sont répétés ci-après par souci de commodité, et ceux qui suivent s'appliquent.

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 1: Critical current measurement – DC critical current of Nb-Ti composite superconductors

1 Scope

This part of IEC 61788 covers a test method for the determination of the d.c. critical current of either Cu/Nb-Ti composite superconductors that have a copper/superconductor ratio larger than 1 or Cu/Cu-Ni/Nb-Ti wires that have a copper/superconductor ratio larger than 0,9 and a copper alloy (Cu-Ni)/superconductor ratio larger than 0,2, where the diameter of Nb-Ti superconducting filaments is larger than 1 μm . The changes for the Cu/Cu-Ni/Nb-Ti are described in Annex C. The Cu-Ni uses all of the main part of the standard with the exceptions listed in Annex C that replace (and in some cases are counter to) some of the steps in the main text.

This method is intended for use with superconductors that have critical currents less than 1 000 A and n -values larger than 12, under standard test conditions and at magnetic fields less than or equal to 0,7 of the upper critical magnetic field. The test specimen is immersed in a liquid helium bath at a known temperature during testing. The test conductor has a monolithic structure with a round or rectangular cross-sectional area that is less than 2 mm². The specimen geometry used in this test method is an inductively coiled specimen. Deviations from this test method that are allowed for routine tests and other specific restrictions are given in this standard.

Test conductors with critical currents above 1 000 A or cross-sectional areas greater than 2 mm² could be measured with the present method with an anticipated increase in uncertainty and a more significant self-field effect (see Annex B). Other, more specialized, specimen test geometries may be more appropriate for larger conductor testing which have been omitted from this present standard for simplicity and to retain a lower uncertainty.

The test method given in this standard is expected to apply to other superconducting composite wires after some appropriate modifications.

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, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 815: Superconductivity*

3 Terms and definitions

For the purposes of this standard, the terms and definitions given in IEC 60050-815, some of which are repeated here for convenience, and the following apply.

3.1

courant critique

I_c

courant continu maximal qui peut être considéré comme passant sans résistance

NOTE I_c est fonction du champ magnétique et de la température.

[VEI 815-03-01]

3.2

critère de courant critique

critère I_c

critère utilisé pour déterminer le courant critique I_c , basé sur le champ électrique E ou sur la résistivité, ρ

NOTE On utilise souvent $E = 10 \mu\text{V/m}$ ou $E = 100 \mu\text{V/m}$ comme critère de champ électrique et $\rho = 10^{-13} \Omega\cdot\text{m}$ ou $\rho = 10^{-14} \Omega\cdot\text{m}$ comme critère de résistivité.

[VEI 815-03-02, modifiée]

3.3

valeur n (d'un supraconducteur)

exposant obtenu lorsque l'on modélise, dans une certaine étendue de champ électrique ou de résistivité, la courbe tension/courant $U(I)$ par une équation du type $U \propto I^n$

[VEI 815-03-10]

3.4

quench

transition incontrôlable et irréversible d'un supraconducteur ou d'un dispositif supraconducteur, de l'état supraconducteur à l'état conducteur normal

NOTE Ce terme s'applique habituellement aux aimants supraconducteurs.

[VEI 815-03-11]

3.5

fil supraconducteur à trois composants

fil composite supraconducteur dont la matrice est constituée d'un composant supraconducteur et de deux matériaux conducteurs normaux

NOTE Ce terme est utilisé principalement pour des supraconducteurs composites

[VEI 815-04-33]

3.6

force de Lorentz (sur un fluxon)

force appliquée à un fluxon par un courant

NOTE 1 La force par unité de volume est donnée par $J \times B$, où J est la densité du courant et B l'induction magnétique.

NOTE 2 La «force de Lorentz» est définie dans le VEI 121-11-20 [1]¹

[VEI 815-03-16]

3.7

transfert de courant (d'un composite supraconducteur)

phénomène de transfert d'un courant continu dans l'espace de filament en filament dans un composite supraconducteur, générant une tension le long du conducteur

¹) Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

3.1**critical current** **I_c**

maximum direct current that can be regarded as flowing without resistance

NOTE I_c is a function of magnetic field strength and temperature.

[IEV 815-03-01]

3.2**critical current criterion** **I_c criterion**criterion to determine the critical current, I_c , based on the electric field strength, E , or the resistivity, ρ NOTE $E = 10 \mu\text{V/m}$ or $E = 100 \mu\text{V/m}$ is often used as the electric field strength criterion, and $\rho = 10^{-13} \Omega\cdot\text{m}$ or $\rho = 10^{-14} \Omega\cdot\text{m}$ is often used as the resistivity criterion.

[IEV 815-03-02, modified]

3.3 **n -value** (of a superconductor)exponent obtained in a specific range of electric field strength or resistivity when the voltage/current $U(I)$ curve is approximated by the equation $U \propto I^n$

[IEV 815-03-10]

3.4**quench**

uncontrollable and irreversible transition of a superconductor or a superconducting device from the superconducting state to the normal conducting state

NOTE A term usually applied to superconducting magnets.

[IEV 815-03-11]

3.5**three-component superconducting wire**

composite superconducting wire composed of a superconducting component and two normal conducting materials

NOTE This term is mostly used for Cu/Cu-Ni/Nb-Ti composite superconductors

[IEV 815-04-33]

3.6**Lorentz force (on fluxons)**

force applied to fluxons by a current

NOTE 1 The force per unit volume is given by $J \times B$, where J is a current density, and B is a magnetic flux density.NOTE 2 "Lorentz force" is defined in IEC 121-11-20.[1]¹⁾

[IEV 815-03-16]

3.7**current transfer** (of composite superconductor)

phenomenon that a d.c. current transfers spatially from filament to filament in a composite superconductor, resulting in a voltage generation along the conductor

1) Figures in square brackets refer to the Bibliography.

NOTE Dans la mesure I_c , ce phénomène apparaît typiquement près des contacts du courant où le courant injecté circule le long du conducteur de la périphérie vers l'intérieur jusqu'à l'obtention d'une répartition uniforme entre les filaments.

3.8

méthode à vitesse de balayage constante

méthode d'acquisition des données $U-I$ où un courant balaye à vitesse constante l'étendue entre 0 et une valeur I_c tout en acquérant fréquemment et de façon périodique des données $U-I$

3.9

méthode de variation et de maintien

méthode d'acquisition de données $U-I$ où un courant prend successivement des valeurs réparties de façon appropriée le long de la courbe $U-I$ et est maintenu constant à chacune de ces valeurs le temps nécessaire pour acquérir un certain nombre de lectures du courant et de la tension

4 Principe

Le courant critique d'un composite supraconducteur est déterminé à partir d'une caractéristique de tension (U) – courant (I) mesurée à une valeur donnée du champ magnétique statique appliqué (champ magnétique) et à une température spécifiée dans un bain d'hélium liquide et à pression constante. Pour obtenir une caractéristique $U-I$, un courant continu est appliqué au spécimen supraconducteur et la tension générée le long d'une section du spécimen est mesurée. Le courant est augmenté à partir de zéro et la caractéristique $U-I$ est enregistrée. Le courant critique est déterminé comme étant le courant pour lequel un critère de champ électrique (E_c) ou un critère de résistivité spécifique (ρ_c) est atteint. Pour E_c ou ρ_c , il existe un critère de tension correspondant (U_c) pour une séparation entre prises de tension spécifiées.

5 Exigences

Le courant critique d'un supraconducteur doit être mesuré en appliquant un courant continu (I) au spécimen supraconducteur puis en mesurant la tension (U) générée le long d'une section du spécimen. Le courant doit être augmenté à partir de zéro et la caractéristique tension-courant ($U-I$) doit être générée et enregistrée.

Le spécimen doit être fixé au mandrin de mesure avec une tension suffisante ou au moyen d'un adhésif à basse température.

NOTE 1 L'exception C.2.1 remplace cette phrase pour les spécimens Cu/Cu-Ni/Nb-Ti

L'incertitude cible de la présente méthode est définie par un coefficient de variation (écart type divisé par la moyenne des déterminations de courant critique) qui ne doit pas dépasser 3 % dans une comparaison inter laboratoire.

NOTE 2 L'exception C.2.2 remplace cette phrase pour les spécimens Cu/Cu-Ni/Nb-Ti

L'utilisation d'une correction de transfert de courant commune est exclue de la présente méthode d'essai. De plus, si une signature de transfert de courant est déclarée lors du mesurage, ce dernier doit être déclaré non valide.

Il incombe à l'utilisateur de la présente norme d'établir, après consultation, des règles d'hygiène et de sécurité appropriées, et de déterminer l'applicabilité des restrictions en matière de réglementation avant utilisation. Des spécifications préventives sont données ci-après.

NOTE In the I_c measurement, this phenomenon appears typically near the current contacts where the injected current flows along the conductor from periphery to inside until uniform distribution among filaments is accomplished.

3.8

constant sweep rate method

a $U-I$ data acquisition method where a current is swept at a constant rate from zero to a current above I_c while frequently and periodically acquiring $U-I$ data

3.9

ramp-and-hold method

a $U-I$ data acquisition method where a current is ramped to a number of appropriately distributed points along the $U-I$ curve and held constant at each one of these points while acquiring a number of voltages and current readings

4 Principle

The critical current of a composite superconductor is determined from a voltage (U) – current (I) characteristic measured at a certain value of a static applied magnetic field strength (magnetic field) at a specified temperature in a liquid cryogen bath at a constant pressure. To get a $U-I$ characteristic, a direct current is applied to the superconductor specimen and the voltage generated along a section of the specimen is measured. The current is increased from zero and the $U-I$ characteristic generated is recorded. The critical current is determined as the current at which a specific electric field strength (electric field) criterion (E_c) or resistivity criterion (ρ_c) is reached. For either E_c or ρ_c , there is a corresponding voltage criterion (U_c) for a specified voltage tap separation.

5 Requirements

The critical current of a superconductor shall be measured by applying a direct current (I) to the superconductor specimen and then measuring the voltage (U) generated along a section of the specimen. The current shall be increased from zero and the voltage-current ($U-I$) characteristic generated and recorded.

The specimen shall be affixed to the measurement mandrel with sufficient tension or a low temperature adhesive.

NOTE 1 Exception C.2.1 replaces this sentence for Cu/Cu-Ni/Nb-Ti specimens.

The target uncertainty of this method is defined as a coefficient of variation (standard deviation divided by the average of the critical current determinations) that shall not exceed 3 % in an interlaboratory comparison.

NOTE 2 Exception C.2.2 replaces this sentence for Cu/Cu-Ni/Nb-Ti specimens.

The use of a common current transfer correction is excluded from this test method. Furthermore, if a current transfer signature is pronounced in the measurement, then the measurement shall be considered invalid.

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.

Ces types de mesures sont susceptibles de présenter des risques. La présence de courants continus élevés et de tensions très basses ne représente pas nécessairement un risque direct pour l'utilisateur, mais des courts-circuits accidentels des fils avec d'autres conducteurs tels que des outils ou des lignes de transfert peuvent dégager une énergie importante et produire des arcs ou des brûlures électriques. Il est impératif d'isoler les fils de courant et de les protéger des courts-circuits. L'énergie accumulée dans les aimants supraconducteurs généralement utilisés pour fournir le champ magnétique de fond est également susceptible de produire des courants élevés et/ou des impulsions de tension, ou de placer de grandes quantités d'énergie thermique dans les systèmes cryogéniques, ce qui produit une évaporation rapide ou même des conditions explosives. Dans des conditions d'évaporation rapide, les matériaux cryogènes peuvent générer des conditions de manque d'oxygène dans l'environnement immédiat et une ventilation supplémentaire peut être nécessaire. L'utilisation de liquides cryogéniques est indispensable au refroidissement des supraconducteurs, pour permettre la transition vers l'état de supraconduction. Le contact direct de la peau avec des conduits de transfert de liquides froids, des vases de Dewar de stockage ou des composants d'appareillage peut provoquer une congélation immédiate, de même que le contact direct avec un cryogène répandu. S'ils sont utilisés incorrectement, les vases de Dewar contenant de l'hélium liquide peuvent provoquer le piégeage d'air et d'eau sous forme solide dans les conduits de ventilation sous pression et provoquer la surpression du vase de Dewar et mener à la défaillance malgré les dispositifs communs de sécurité. L'utilisation d'hydrogène liquide n'est pas recommandée et n'est pas nécessaire pour ces mesures. Il est impératif d'observer les règles de sécurité lors de la manipulation des liquides cryogéniques.

6 Appareillage

6.1 Matériau du mandrin de mesurage

Le mandrin de mesurage doit être constitué d'un matériau isolant ou d'un matériau conducteur non ferromagnétique recouvert ou non d'une couche isolante.

La déformation de traction à la température de mesurage, produite par la contraction thermique différentielle du spécimen et du mandrin de mesurage, ne doit pas excéder 0,2 %.

Des matériaux de mandrin appropriés sont recommandés dans l'Annexe A. Il est permis d'utiliser n'importe lequel d'entre eux.

NOTE 1 L'exception C.2.3 remplace cette phrase pour les spécimens Cu/Cu-Ni/Nb-Ti

Lorsqu'un matériau conducteur utilisé ne comporte pas de couche isolante, le courant de fuite dans le mandrin doit être inférieur à 0,2 % du courant total lorsque le courant du spécimen est en I_c (voir 9.5 et A.3.1).

NOTE 2 L'exception C.2.4 remplace cette phrase pour les spécimens Cu/Cu-Ni/Nb-Ti.

6.2 Construction du mandrin

Le diamètre du mandrin doit être supérieur à 24 mm et compatible avec la limite de déformation de flexion (voir 7.2).

De préférence, le mandrin doit comporter un sillon hélicoïdal autour duquel le spécimen doit être enroulé. L'angle de pas du sillon doit être inférieur à 7°.

Si le spécimen n'est pas enroulé autour d'un sillon hélicoïdal, il faut que les conditions relatives à l'angle du pas soient respectées. Cette méthode d'enroulement du spécimen pourrait rendre le support du spécimen inadapté et provoquer des variations plus importantes de son angle de pas (voir 7.2).

Hazards exist in this type of measurement. Very large direct currents with very low voltages do not necessarily provide a direct personal hazard, but accidental shorting of the leads with another conductor, such as tools or transfer lines, can release significant amounts of energy and cause arcs or burns. It is imperative to isolate and protect current leads from shorting. Also the stored energy in superconducting magnets commonly used for the background magnetic field can cause similar large current and/or voltage pulses or deposit large amounts of thermal energy in the cryogenic systems causing rapid boil-off or even explosive conditions. Under rapid boil-off conditions, cryogens can create oxygen-deficient conditions in the immediate area and additional ventilation may be necessary. The use of cryogenic liquids is essential to cool the superconductors to allow transition into the superconducting state. 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. If improperly used, liquid helium storage dewars can freeze air or water in pressure vent lines and cause the dewar to over-pressurize and fail despite the common safety devices. The use of liquid hydrogen is not recommended and not necessary for these measurements. It is imperative that safety precautions for handling cryogenic liquids be observed.

6 Apparatus

6.1 Measurement mandrel material

The measurement mandrel shall be made from an insulating material or from a conductive non-ferromagnetic material that is either covered or not covered with an insulating layer.

The tensile strain at the measuring temperature, induced by the differential thermal contraction of the specimen and the measurement mandrel, shall not exceed 0,2 %.

Suitable mandrel materials are recommended in Annex A. Any one of these may be used.

NOTE 1 Exception C.2.3 replaces this sentence for Cu/Cu-Ni/Nb-Ti specimens.

When a conductive material is used without an insulating layer, the leakage current through the mandrel shall be less than 0,2 % of the total current when the specimen current is at I_c (see 9.5 and A.3.1).

NOTE 2 Exception C.2.4 replaces this sentence for Cu/Cu-Ni/Nb-Ti specimens.

6.2 Mandrel construction

The diameter of the mandrel shall be larger than 24 mm and consistent with the bending strain limit (see 7.2).

Preferably the mandrel shall have a helical groove in which the specimen shall be wound. The pitch angle of the groove shall be less than 7°.

If no helical groove is used to wind the specimen, the same conditions given for the pitch angle shall be met. This approach to winding the specimen could result in inadequate support of the specimen and larger variation in the pitch angle of the specimen (see 7.2).

L'angle entre l'axe du spécimen (portion entre les prises de tension) et le champ magnétique doit être égal à $(90 \pm 7)^\circ$. Cet angle doit être déterminé avec une incertitude type combinée qui ne dépassera pas 1° .

Le contact de courant et le mandrin de mesurage doivent former un ensemble rigide, de façon à éviter toute concentration de contrainte sur le spécimen dans la région de transition située entre le mandrin et le contact de courant.

7 Préparation du spécimen

7.1 Fixation du spécimen

La tension d'enroulement et/ou un adhésif à basse température (tel que la graisse silicone à vide, la graisse Apiezon®²⁾ à vide ou la résine époxyde) doivent permettre de fixer le spécimen au mandrin de mesurage de manière à réduire ses mouvements. Lorsqu'un adhésif à basse température est utilisé, une quantité minimale doit être appliquée et l'excès d'adhésif doit être enlevé de la surface extérieure du spécimen après montage du spécimen.

NOTE 1 L'exception C.2.5 remplace cette phrase pour les spécimens Cu/Cu-Ni/Nb-Ti

L'adéquation du montage du spécimen doit être attestée par l'obtention de la reproductibilité du courant critique spécifié.

Le spécimen ne doit pas être fixé au mandrin par soudage entre les contacts de courant.

NOTE 2 L'exception C.2.6 remplace cette phrase pour les spécimens Cu/Cu-Ni/Nb-Ti

7.2 Montage du spécimen

Le spécimen d'essai ne doit pas comporter de jointure ni d'épissure.

La superficie de section S du spécimen doit être déterminée dans le plan transversal à l'axe du conducteur avec une incertitude type combinée ne dépassant pas 2,5 %.

Le fil doit être enroulé sous forme d'une petite bobine de manière inductive. L'enroulement du spécimen doit empêcher toute torsade supplémentaire du spécimen.

Pour un fil comportant une section rectangulaire, le spécimen doit être enroulé sous forme de bobine, de façon que le champ magnétique appliqué soit parallèle à la face la plus large du spécimen.

Pour garantir que le spécimen est bien positionné dans le sillon, une force de traction doit être appliquée au fil lors de l'enroulement et cette force ne doit pas provoquer une déformation de traction du fil supérieure à 0,1 % (voir Annexe D).

NOTE L'exception C.2.7 remplace cette phrase pour les spécimens Cu/Cu-Ni/Nb-Ti

La déformation en flexion maximale, provoquée lors du montage du spécimen, ne doit pas être supérieure à 3 %.

Les deux extrémités du fil doivent être soudées au contact de courant. La longueur minimale de la partie soudée du contact de courant doit être la plus grande des trois valeurs suivantes: 40 mm, 30 fois le diamètre du fil ou 30 fois l'épaisseur du fil.

2) Apiezon® est l'appellation commerciale d'un produit distribué par M&I Materials Ltd, UK (www.apiezon.com). Cette information est donnée à l'intention des utilisateurs du présent document et ne signifie nullement que la CEI approuve ou recommande l'emploi exclusif du produit ainsi désigné. Des produits équivalents peuvent être utilisés s'il est démontré qu'ils conduisent aux mêmes résultats.

The angle between the specimen axis (portion between the voltage taps) and the magnetic field shall be $(90 \pm 7)^\circ$. This angle shall be determined with a combined standard uncertainty not to exceed 1° .

The current contact shall be rigidly fastened to the measurement mandrel to avoid stress concentration on the specimen in the region of transition between the mandrel and the current contact.

7 Specimen preparation

7.1 Specimen bonding

Winding tension and/or a low temperature adhesive (such as silicone vacuum grease, Apiezon®²⁾ vacuum grease or epoxy) shall be used to bond the specimen to the measurement mandrel to reduce specimen motion. When a low-temperature adhesive is used, a minimum shall be applied and the excess adhesive shall be removed from the outer surface of the specimen after the specimen has been mounted.

NOTE 1 Exception C.2.5 replaces this sentence for Cu/Cu-Ni/Nb-Ti specimens.

The adequacy of specimen bonding shall be demonstrated by a successful completion of the specified critical current repeatability.

Solder shall not be used to bond the specimen to the mandrel between the current contacts.

NOTE 2 Exception C.2.6 replaces this sentence for Cu/Cu-Ni/Nb-Ti specimens.

7.2 Specimen mounting

There shall be no joints or splices in the test specimen.

The cross-sectional area S of the specimen shall be determined in the plane transverse to the axis of the conductor with a combined standard uncertainty not to exceed 2,5 %.

The wire shall be wound in the shape of a small coil in an inductive manner. The specimen shall not be wound in a manner that would introduce additional twists into the specimen.

For a wire with a rectangular cross-section, the specimen shall be wound in a coil so that the applied magnetic field is parallel to the wide face of the specimen.

To ensure that the specimen is well-seated in the groove, a tensile force shall be applied to the wire during winding and this force shall not result in more than 0,1 % tensile strain (see Annex D) on the wire.

NOTE Exception C.2.7 replaces this sentence for Cu/Cu-Ni/Nb-Ti specimens.

The maximum bending strain induced during the mounting of the specimen shall not exceed 3 %.

Both ends of the wire shall be fixed to the current contact with solder. The minimum length of the soldered part of the current contact shall be the largest of 40 mm, 30 wire diameters or 30 wire thicknesses.

²⁾ Apiezon® is the trade name of a product supplied by M&I Materials Ltd., UK (www.apiezon.com). This information is given for the convenience of users of this document and does not constitute an endorsement by IEC of the product named. Equivalent products may be used if they can be shown to lead to the same results.

Le nombre de tours du spécimen soudés sur chaque contact de courant ne doit pas dépasser trois.

La distance la plus courte d'un contact de courant à une prise de tension doit être supérieure à 40 mm.

Les prises de tension doivent être soudées au spécimen. Minimiser l'inductance mutuelle entre le courant du spécimen et la zone formée par le spécimen et les prises de tension en enroulant dans le sens inverse, autour du spécimen, la section non tordue des prises de tension, comme le montre la Figure A.1.

La distance L le long du spécimen entre les prises de tension doit être mesurée avec une incertitude type combinée ne dépassant pas 2,5 %. La séparation entre les prises de tension doit être supérieure à 50 mm.

Pour les besoins de l'essai, le spécimen et le mandrin doivent être montés dans un cryostat d'essai composé d'un vase de Dewar d'hélium liquide, d'un aimant et de sa structure de support, et de la structure de support du spécimen.

8 Procédure de mesure

Le spécimen doit être immergé dans de l'hélium liquide pour la durée de la phase d'acquisition des données. La température du bain d'hélium liquide doit être mesurée avant et après chaque détermination de I_c .

Le courant du spécimen doit rester suffisamment faible pour que le spécimen n'entre pas dans l'état normal, à moins qu'un circuit de protection contre le quench ou un shunt résistif ne soit utilisé pour protéger le spécimen.

Si on utilise la méthode à vitesse de balayage constante, le temps de variation entre zéro et I_c doit être supérieur à 10 s.

Lorsqu'on utilise la méthode de variation et maintien, la vitesse de balayage du courant entre les signaux de consigne du courant doit être inférieure à la vitesse équivalente pour une variation du courant de zéro à I_c en 3 s.

Le champ magnétique continu doit être appliqué dans la direction de l'axe du mandrin. La relation entre le champ magnétique et le courant de l'aimant doit être préalablement mesurée. Le courant de l'aimant doit être mesuré avant chaque détermination de I_c . Le champ magnétique appliqué doit être parallèle à la face la plus large et perpendiculaire à l'axe du câble des spécimens présentant des sections efficaces rectangulaires.

La direction du courant et le champ magnétique appliqué doivent produire une force de Lorentz dirigée vers l'intérieur sur la longueur du spécimen, entre les prises de tension.

NOTE L'exception C.2.8 remplace cette phrase pour les spécimens Cu/Cu-Ni/Nb-Ti

Enregistrer la caractéristique $U-I$ du spécimen d'essai dans les conditions de l'essai, ainsi que l'augmentation monotone du courant.

Une caractéristique $U-I$ valide doit produire un courant I_c avec un écart type obtenu dans des conditions de répétabilité ne dépassant pas 0,5 % et la caractéristique doit être stable dans le temps avec des tensions égales ou inférieures au critère de courant critique.

No more than three turns of the specimen shall be soldered onto each current contact.

The shortest distance from a current contact to a voltage tap shall be greater than 40 mm.

The voltage taps shall be soldered to the specimen. Minimize the mutual inductance between the specimen current and the area formed by the specimen and the voltage taps by counterwinding the untwisted section of the voltage taps back along the specimen, as shown in Figure A.1.

The distance L along the specimen between the voltage taps shall be measured with a combined standard uncertainty not to exceed 2,5 %. This voltage tap separation shall be greater than 50 mm.

For testing, the specimen and mandrel shall be mounted in a test cryostat consisting of a liquid helium dewar, a magnet and support structure, and a specimen support structure.

8 Measurement procedure

The specimen shall be immersed in liquid helium for the data acquisition phase. The temperature of the liquid helium bath shall be measured before and after each determination of I_c .

The specimen current shall be kept low enough so that the specimen does not enter the normal state unless a quench protection circuit or resistive shunt is used to protect the specimen from damage.

When using the constant sweep rate method, the time for the ramp from zero current to I_c shall be more than 10 s.

When using the ramp-and-hold method, the current sweep rate between current set points shall be lower than the equivalent of ramping from zero current to I_c in 3 s.

The d.c. magnetic field shall be applied in the direction of the mandrel axis. The relation between the magnetic field and the magnet current shall be measured beforehand. The magnet current shall be measured before each determination of I_c . The applied magnetic field shall be parallel to the wide face and orthogonal to the wire axis of the specimens with rectangular cross-sections.

The direction of the current and the applied magnetic field shall result in an inward Lorentz force over the length of the specimen between the voltage taps.

NOTE Exception C.2.8 replaces this sentence for Cu/Cu-Ni/Nb-Ti specimens.

Record the U - I characteristic of the test specimen under test conditions and monotonically increasing current.

A valid U - I characteristic shall give an I_c with a standard deviation obtained under repeatability conditions not to exceed 0,5 % and the characteristic shall be stable with time for voltages at or below the critical current criterion.

La tension de base de la caractéristique $U-I$ doit être considérée comme l'enregistrement de la tension à un courant zéro avec la méthode de variation et de maintien de courant, ou comme la tension moyenne à approximativement $0,1 I_c$ avec la méthode à vitesse de balayage constante.

9 Incertitude de la méthode d'essai

9.1 Courant critique

Le courant critique doit être déterminé à partir d'une caractéristique tension-courant mesurée grâce à une technique à quatre bornes.

La source de courant doit délivrer un courant continu dont les variations périodiques et aléatoires maximales sont inférieures à $\pm 2 \%$ en I_c , dans la largeur de bande de 10 Hz à 10 MHz.

Une résistance standard à quatre bornes avec une incertitude type combinée ne dépassant pas 0,25 % doit être utilisée pour déterminer le courant du spécimen.

Un enregistreur ainsi que les préamplificateurs, filtres ou voltmètres requis, ou une combinaison de ces appareils doivent être utilisés pour enregistrer la caractéristique $U-I$. L'enregistrement produit doit permettre de déterminer U_c avec une incertitude type combinée ne dépassant pas 5 % et le courant correspondant avec une incertitude type combinée ne dépassant pas 0,5 %.

9.2 Température

Un cryostat doit fournir l'environnement requis pour la mesure de I_c et le spécimen doit être mesuré pendant son immersion dans de l'hélium liquide. Le bain d'hélium liquide doit être appliqué de sorte que la température du bain soit proche du point d'ébullition normal pour la pression atmosphérique typique du site d'essai. La température du spécimen est supposée être la même que celle du liquide. La température du liquide doit être exprimée avec une incertitude type combinée ne dépassant pas 0,01 K, mesurée au moyen d'un capteur de pression ou d'un capteur de température approprié.

La différence entre la température du spécimen et celle du bain doit être minimisée.

Pour convertir la pression observée dans le cryostat en une valeur de température, le schéma de phase de l'hélium doit être utilisé. La mesure de la pression doit avoir une incertitude suffisamment faible pour obtenir l'incertitude exigée pour la mesure de température. Lorsque la profondeur de l'hélium liquide est supérieure à 1 m, il peut être nécessaire d'effectuer une correction des têtes.

9.3 Champ magnétique

Un système d'aimant doit fournir le champ magnétique avec une incertitude type combinée ne dépassant pas 0,5 % ou 0,01 T, selon la valeur la plus élevée.

Le champ magnétique, sur la longueur du spécimen entre les contacts de tension, doit avoir une uniformité ne dépassant pas 0,5 % ou 0,02 T, selon la valeur la plus grande.

Les variations périodiques et aléatoires maximales du champ magnétique ne doivent pas dépasser $\pm 1 \%$ ou $\pm 0,02$ T, suivant la valeur la plus grande.

The baseline voltage of the U - I characteristic shall be taken as the recorded voltage at zero current for the ramp and hold current method, or the average voltage at approximately $0,1 I_c$ for the constant sweep rate method.

9 Uncertainty of the test method

9.1 Critical current

The critical current shall be determined from a voltage-current characteristic measured with a four-terminal technique.

The current source shall provide a d.c. current having a maximum periodic and random deviation of less than ± 2 % at I_c , within the bandwidth 10 Hz to 10 MHz.

A four-terminal standard resistor, with a combined standard uncertainty not to exceed 0,25 %, shall be used to determine the specimen current.

A recorder and necessary preamplifiers, filters or voltmeters, or a combination thereof, shall be used to record the U - I characteristic. The resulting record shall allow the determination of U_c with a combined standard uncertainty not to exceed 5 % and the corresponding current with a combined standard uncertainty not to exceed 0,5 %.

9.2 Temperature

A cryostat shall provide the necessary environment for measuring I_c and the specimen shall be measured while immersed in liquid helium. The liquid helium bath shall be operated so that the bath temperature is near the normal boiling point for the typical atmospheric pressure of the test site. The specimen temperature is assumed to be the same as the temperature of the liquid. The liquid temperature shall be reported with a combined standard uncertainty not to exceed 0,01 K, measured by means of a pressure sensor or an appropriate temperature sensor.

The difference between the specimen temperature and the bath temperature shall be minimized.

For converting the observed pressure in the cryostat into a temperature value, the phase diagram of helium shall be used. The pressure measurement shall have an uncertainty that is low enough to obtain the required uncertainty of the temperature measurement. For liquid helium depths greater than 1 m, a head correction may be necessary.

9.3 Magnetic field

A magnet system shall provide the magnetic field with a combined standard uncertainty not to exceed 0,5 % or 0,01 T, whichever is larger.

The magnetic field, over the length of the specimen between the voltage contacts, shall have a uniformity not to exceed 0,5 % or 0,02 T, whichever is larger.

The maximum periodic and random deviation of the magnetic field shall not exceed ± 1 % or $\pm 0,02$ T, whichever is larger.

9.4 Structure de support du spécimen et du mandrin

La structure de support doit assurer un support approprié du spécimen et permettre son orientation par rapport au champ magnétique. Le support du spécimen est approprié s'il permet d'obtenir des déterminations supplémentaires du courant critique avec la répétabilité décrite à l'Article 8.

La configuration d'essai du spécimen doit avoir la forme d'une bobine inductive.

9.5 Protection du spécimen

Si un shunt résistif ou un circuit de protection contre le quench est utilisé en parallèle avec le spécimen, le courant dans le shunt ou le circuit doit être inférieur à 0,2 % du courant total en I_c .

10 Calcul des résultats

10.1 Critères de courant critique

Le courant critique, I_c , doit être déterminé en utilisant un critère de champ électrique E_c ou un critère de résistivité ρ_c si la section totale du supraconducteur en composite est préférée pour l'estimation de la résistivité (voir Figures 1 et 2).

Dans le cas d'un critère de champ électrique, deux valeurs de I_c doivent être déterminées, pour des critères de 10 $\mu\text{V/m}$ et 100 $\mu\text{V/m}$. Dans l'autre cas, deux valeurs de I_c doivent être déterminées, pour des critères de résistivité de $10^{-14} \Omega\text{m}$ et $10^{-13} \Omega\text{m}$.

Lorsqu'il est difficile d'obtenir un mesurage correct de I_c pour un critère de 100 $\mu\text{V/m}$, il faut remplacer E_c par un critère inférieur à 100 $\mu\text{V/m}$. Sinon, des mesurages utilisant le critère de résistivité sont recommandés.

Le courant I_c doit être déterminé comme étant le courant correspondant au point de la courbe $U-I$ où la tension est égale à U_c mesurée en fonction de la tension de base (voir Figures 1 et 2):

$$U_c = L E_c \quad (1)$$

où

U_c est le critère de tension, en microvolts;

L est la séparation entre prises de tension, en mètres;

E_c est le critère de champ électrique, en microvolts/mètres.

ou, en utilisant un critère de résistivité:

$$U_c = I_c \rho_c L/S \quad (2)$$

où

U_c , I_c et ρ_c représentent respectivement la tension, le courant et la résistivité correspondants mesurés au point d'intersection d'une ligne droite et de la courbe $U-I$, comme le montre la Figure 1, et

S représente la superficie de section hors-tout exprimée en mètres carrés.

Une ligne droite doit être tracée de la tension de base à la tension moyenne proche de 0,7 I_c (voir Figures 1 et 2). Il n'est pas exclu que la pente finie de cette droite soit due au transfert de courant. Pour une détermination valide de I_c , la pente de la droite doit être inférieure à 0,3 U_c/I_c quand U_c et I_c sont déterminés avec un critère de 10 $\mu\text{V/m}$ ou $10^{-14} \Omega\text{m}$.

9.4 Specimen and mandrel support structure

The support structure shall provide an adequate support for the specimen and the orientation of the specimen with respect to the magnetic field. The specimen support is adequate if it allows additional determinations of critical current with the repeatability described in Clause 8.

The test configuration of the specimen shall be an inductive coil

9.5 Specimen protection

If a resistive shunt or quench protection circuit is used in parallel with the specimen, then the current through the shunt or the circuit shall be less than 0,2 % of the total current at I_c .

10 Calculation of results

10.1 Critical current criteria

The critical current, I_c , shall be determined by using an electric field criterion, E_c , or a resistivity criterion, ρ_c , where the total cross-section of the composite superconductor is preferred for the estimation of the resistivity (see Figures 1 and 2).

In the case of an electric field criterion, two values of I_c shall be determined at criteria of 10 $\mu\text{V/m}$ and 100 $\mu\text{V/m}$. In the other case, two values of I_c shall be determined at resistivity criteria of $10^{-14} \Omega\text{m}$ and $10^{-13} \Omega\text{m}$.

When it is difficult to measure the I_c properly at a criterion of 100 $\mu\text{V/m}$, an E_c criterion less than 100 $\mu\text{V/m}$ must be substituted. Otherwise, the measurements using the resistivity criterion are recommended.

The I_c shall be determined as the current corresponding to the point on the U - I curve where the voltage is U_c measured relative to the baseline voltage (see Figures 1 and 2):

$$U_c = L E_c \quad (1)$$

where

U_c is the voltage criterion, in microvolts;

L is the voltage tap separation, in metres;

E_c is the electric field criterion, in microvolts/metre.

or, when using a resistivity criterion:

$$U_c = I_c \rho_c L/S \quad (2)$$

where

U_c , I_c and ρ_c are the corresponding voltage, current and resistivity to the intersecting point of a straight line with the U - I curve as shown in Figure 1, and

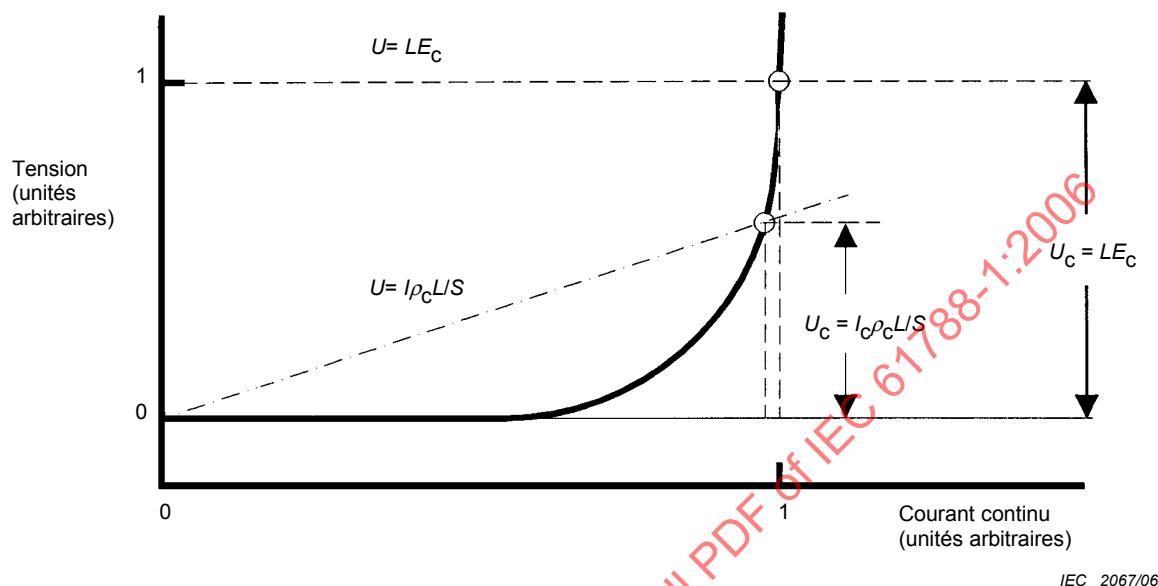
S is the overall cross-sectional area in square metres.

A straight line shall be drawn from the baseline voltage to the average voltage near 0,7 I_c (see Figures 1 and 2). A finite slope of this line may be due to current transfer. A valid determination of I_c requires that the slope of the line be less than 0,3 U_c/I_c , where U_c and I_c are determined at a criterion of 10 $\mu\text{V/m}$ or $10^{-14} \Omega\text{m}$.

10.2 Valeur n (calcul facultatif, se reporter à A.7.2)

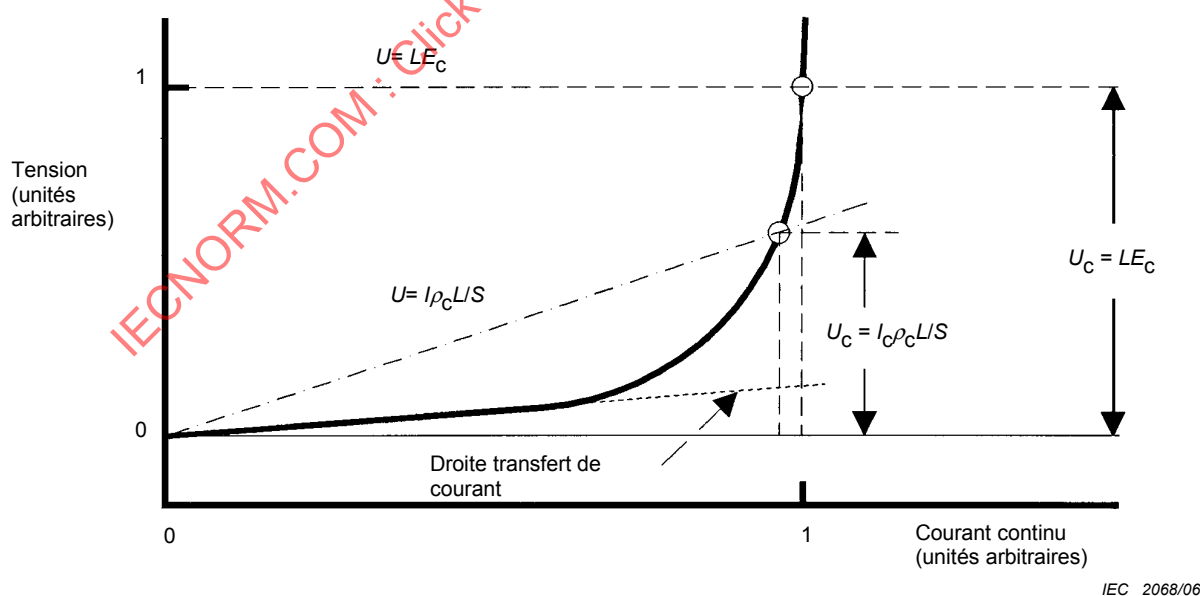
La valeur n doit être calculée comme étant la pente du tracé de $\log U$ en fonction de $\log I$ dans la région où I_c est déterminé, ou doit être calculée en utilisant deux valeurs de I_c déterminées en 10.1 avec deux critères différents.

L'étendue des critères utilisés pour déterminer n doit être mentionnée.



NOTE La figure montre l'application du champ électrique et des critères de résistivité dans la détermination du courant critique.

Figure 1 – Caractéristique $U-I$ intrinsèque



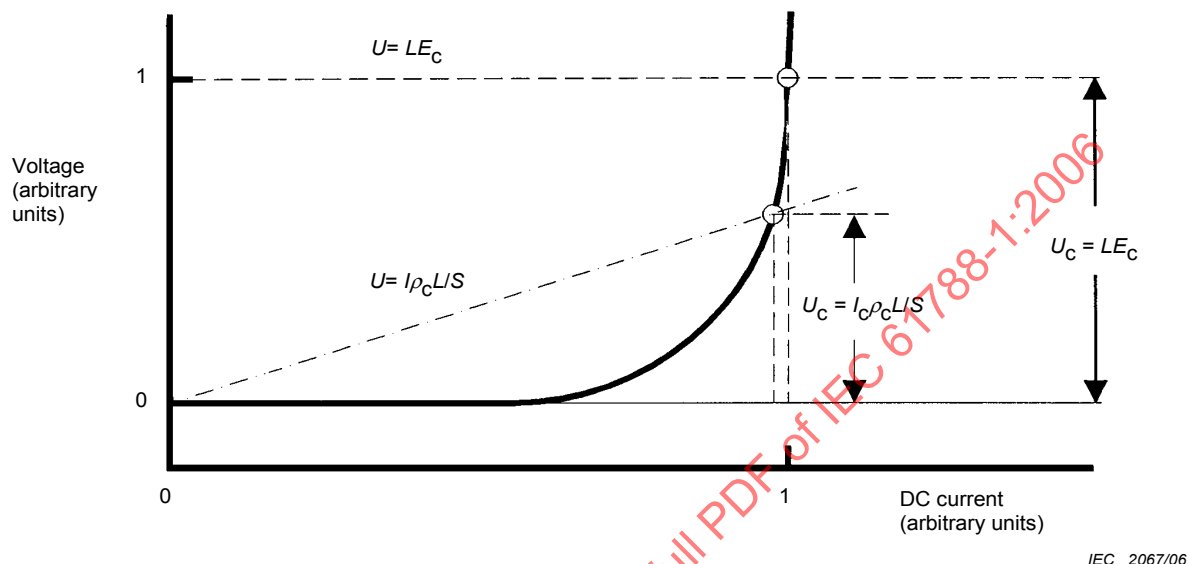
NOTE La figure montre l'application du champ électrique et des critères de résistivité dans la détermination du courant critique sur une caractéristique $U-I$, avec une composante de transfert de courant représentée sous la forme d'une région linéaire traversée par un courant bas.

Figure 2 – Caractéristique $U-I$ avec une composante de transfert de courant

10.2 n -value (optional calculation, refer to A.7.2)

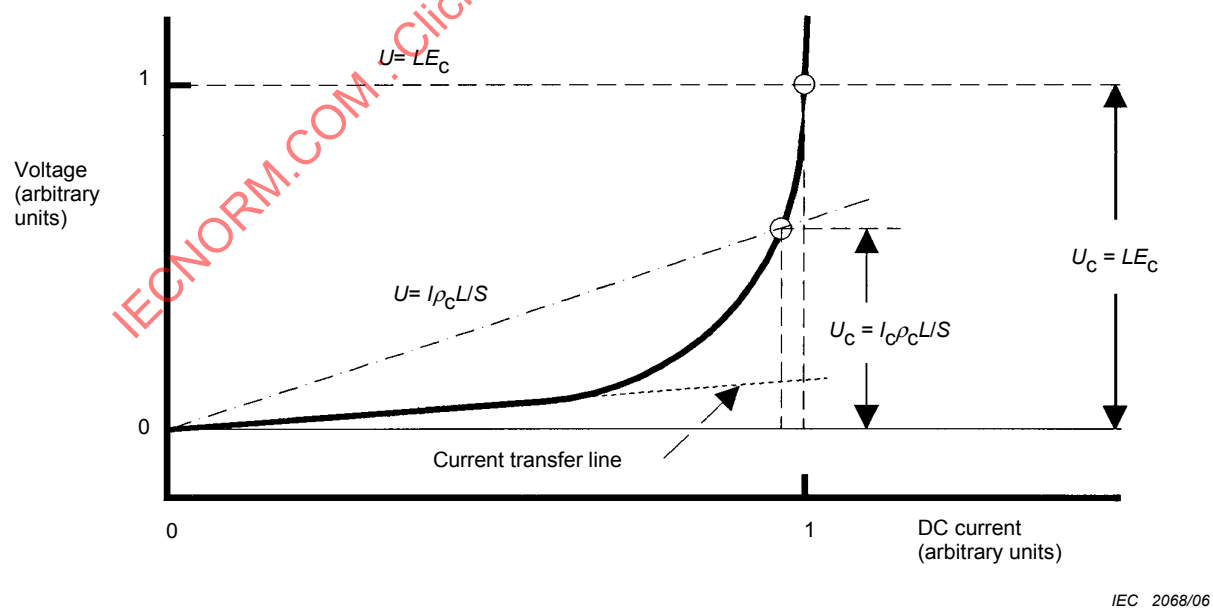
The n -value shall be calculated as the slope of the plot of $\log U$ versus $\log I$ in the region where the I_c is determined, or shall be calculated using two I_c values as determined in 10.1 at two different criteria.

The range of the criteria used to determine n shall be reported.



NOTE The application of the electric field and resistivity criteria to determine the critical current is shown.

Figure 1 – Intrinsic U - I characteristic



NOTE The application of the electric field and resistivity criteria to determine the critical current on a U - I characteristic, with a current transfer component exhibited as a linear region at low current is shown.

Figure 2 – U - I characteristic with a current transfer component

11 Compte rendu d'essai

11.1 Identification du spécimen d'essai

Le spécimen d'essai doit être, si possible, déterminé par les caractéristiques suivantes:

- a) nom du fabricant du spécimen;
- b) classification et/ou symbole;
- c) numéro de lot;
- d) matières premières et leur composition chimique;
- e) forme et superficie de la section du fil, nombre de filaments, diamètre des filaments, pas de torsade et rapport cuivre/supraconducteur.

11.2 Compte rendu des valeurs I_c

Les valeurs I_c doivent être mentionnées, de même que les critères correspondants.

11.3 Compte rendu des conditions d'essai

Les conditions d'essai suivantes doivent être mentionnées:

- a) champ magnétique de l'essai et uniformité du champ;
- b) température de l'essai;
- c) nombre de tours de la bobine utilisée pour l'essai;
- d) technique utilisée pour enrouler la bobine;
- e) longueur entre les prises de tension et longueur totale du spécimen;
- f) plus courte distance d'un contact de courant à une prise de tension;
- g) plus courte distance entre les contacts de courant;
- h) longueur de soudure des contacts de courant;
- i) méthode de fixation du spécimen, avec identification du matériau de fixation;
- j) matériau du mandrin;
- k) diamètre du mandrin;
- l) profondeur, forme, pas et angle des sillons.

11 Test report

11.1 Identification of test specimen

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

- a) name of the manufacturer of the specimen;
- b) classification and/or symbol;
- c) lot number;
- d) raw materials and their chemical composition;
- e) shape and area of the cross-section of the wire, number of filaments, diameter of filaments, twist pitch and copper/superconductor ratio.

11.2 Report of I_c values

The I_c values, along with their corresponding criteria, shall be reported.

11.3 Report of test conditions

The following test conditions shall be reported:

- a) test magnetic field and uniformity of field;
- b) test temperature;
- c) number of turns of the tested coil;
- d) technique used to wind the coil;
- e) length between voltage taps and total specimen length;
- f) shortest distance from a current contact to a voltage tap;
- g) shortest distance between current contacts;
- h) soldered length of the current contacts;
- i) specimen bonding method, including identification of bonding material;
- j) mandrel material;
- k) mandrel diameter;
- l) depth, shape, pitch and angle of grooves.

Annexe A (informative)

Informations supplémentaires relatives à la norme

A.1 Domaine d'application

Un grand nombre de variables ayant un effet significatif sur la valeur mesurée du courant critique doivent être portées à l'attention de l'utilisateur. La présente annexe informative en abordera plusieurs.

La méthode décrite dans la présente norme ne s'applique pas à des fils dont le rapport cuivre/supraconducteur (c'est-à-dire le rapport de volume de Cu/Nb-Ti) est inférieur à 1, car il n'est pas exclu que les caractéristiques tension-courant ($U-I$) observées soient instables avec des champs magnétiques bas.

Les restrictions de la présente méthode d'essai ont pour but d'obtenir l'incertitude nécessaire dans la toute dernière phase de qualification des conducteurs longs.

Cette norme exige que le spécimen soit éprouvé en immersion dans de l'hélium liquide proche du point d'ébullition de l'hélium liquide à la pression atmosphérique normale du site. Les essais dans de l'hélium liquide à des températures autres que celles proches de ce point normal d'ébullition ou les essais dans un gaz ou sous vide ne sont pas couverts par le domaine de cette norme.

A.2 Exigences

Le courant critique continu à déterminer par la présente méthode est le courant électrique continu maximal au-dessous duquel un supraconducteur peut être considéré comme n'ayant pas de résistance, tout au moins à des fins pratiques, pour une température et un champ magnétique donnés.

Généralement, la limite supérieure du champ magnétique d'essai (égale à 0,7 fois le champ magnétique critique le plus élevé) sera 8 T à une température proche de 4,2 K.

La longueur totale minimale du spécimen est 210 mm, c'est-à-dire la somme des valeurs suivantes.

- longueur de soudure des contacts de courant (2×40 mm);
- distance entre les contacts de courant et les contacts de tension (2×40 mm);
- distance minimale séparant les prises de tension (50 mm).

Dans le cas d'essais de série pour lesquels le respect de ces restrictions spécifiques n'est pas envisageable en pratique, la présente norme peut être utilisée comme un ensemble de directives générales en prévoyant une augmentation de l'incertitude.

Pour des essais de série, on accepte une plage plus grande de paramètres, mais dans les comparaisons croisées et les vérifications de fonctionnement finales, des restrictions sont nécessaires pour compenser les effets de la facilité d'utilisation sur l'incertitude cible recherchée.

Annex A (informative)

Additional information relating to the standard

A.1 Scope

There are a large number of variables that have a significant effect on the measured value of critical current which need to be brought to the attention of the user. Some of these will be addressed in this informative annex.

The method described in this standard is not applicable to wires with a copper/superconductor ratio (i.e. a volume ratio of Cu/Nb-Ti) that is smaller than 1, because the observed voltage-current ($U-I$) characteristics may not be stable at low magnetic fields.

The reason for the restrictions in this test method is to obtain the necessary uncertainty in the final definitive phase of long conductor qualification.

This standard requires that the specimen is to be tested while immersed in liquid helium that is near the boiling point of liquid helium at the normal atmospheric pressure of the test site. Testing in liquid helium at temperatures other than near this normal boiling point or testing in a gas or a vacuum is not covered by the scope of this standard.

A.2 Requirements

The d.c. critical current intended to be determined by the present method is the maximum direct electric current below which a superconductor can be regarded as resistance-less, at least for practical purposes, at a given temperature and magnetic field.

Typically, the upper limit of the test magnetic field (0,7 of the upper critical magnetic field) will be 8 T at a temperature near 4,2 K.

The minimum total length of the specimen is 210 mm, which represents the sum of the following:

- soldered length of current contacts (2×40 mm);
- distance between current and voltage contacts (2×40 mm);
- the minimum voltage tap separation (50 mm).

In the case of routine tests where it is impractical to adhere to these specific restrictions, this standard can be used as a set of general guidelines with an anticipated increase in uncertainty.

For routine tests, a wider range of parameters is accepted, but in definitive intercomparisons and performance verification, restrictions are needed to balance ease of use and resulting target uncertainty.

Les mesurages sur des spécimens courts et droits constituent des pratiques acceptables dans des mesurages de série, si la superficie de section du spécimen est petite en comparaison de sa longueur. Cependant, par souci de simplicité, cette géométrie du spécimen n'est pas prise en compte.

Il est vraisemblable que les mesurages effectués sur les spécimens enroulés de manière non inductive (bifilaire) et combinés à des spécimens fixés avec de la résine époxyde permettent d'obtenir une incertitude semblable à l'incertitude recherchée par la présente méthode. Cependant, par souci de simplicité, cette géométrie du spécimen n'est pas prise en compte. Avec une géométrie de spécimen bifilaire, la force de Lorentz est dirigée vers l'extérieur du mandrin de mesurage sur une partie de la longueur du spécimen et la graisse à vide en silicone ou la tension, dans ce cas, ne suffit pas à empêcher le spécimen de bouger.

Les mesurages effectués sur un mandrin non ferromagnétique en acier inoxydable, avec fixation par soudage au mandrin, constituent des pratiques acceptables pour des mesurages de série. Dans ce cas, il sera difficile d'estimer la valeur du courant dérivé par le mandrin, en particulier si la soudure est supraconductrice et si les mesurages sont effectués dans des champs magnétiques bas.

Lorsqu'une étude de la direction des champs magnétiques est requise sur un spécimen comportant une section rectangulaire, deux choix se présentent. On peut obtenir tous les angles de champ possibles lorsque le mesurage porte sur une géométrie de spécimen droit sous l'effet d'un aimant à accès radial. On peut obtenir deux angles de champ possibles (0° et 90°) lorsque le mesurage porte sur une géométrie de spécimen en U et une géométrie de spécimen en forme de bobine sous l'effet d'un aimant solénoïde. Aucune de ces deux méthodes de géométrie de spécimen (en U et en forme de bobine) n'est décrite ici.

L'incertitude recherchée par la méthode décrite dans la présente norme est définie par les résultats d'une comparaison croisée entre laboratoires. Les résultats de comparaisons de ce type effectuées précédemment ont été utilisés, dans la présente méthode d'essai, pour exprimer les tolérances des nombreuses variables qui affectent l'incertitude des mesures de courant critique. L'incertitude recherchée, dans le cas d'une comparaison croisée entre laboratoires, est un coefficient de variation (écart type divisé par la moyenne des déterminations de courant critique) inférieur à 3 %.

Le coefficient de variation fournit des informations supplémentaires sur la distribution des résultats prévue, à partir d'un grand nombre de déterminations. Cependant, si des erreurs systématiques significatives se produisent, il n'est pas exclu que les mesurages de deux laboratoires diffèrent de deux ou plusieurs fois le coefficient de variation.

L'incertitude prévue et acceptée des mesures du courant critique dans des champs magnétiques de l'ordre de 0,8 fois le champ critique le plus élevé (environ 9 T à 4,2 K) présentera un coefficient de variation plus élevé, car I_c est très sensible au champ magnétique, à la température, à la déformation et à la sensibilité de la tension requise.

Il est vraisemblable que l'incertitude du champ magnétique dans la présente méthode d'essai soit le facteur le plus déterminant du manque d'incertitude global de la mesure du courant critique. Cependant, il peut ne pas être possible d'atteindre une tolérance plus restrictive, en raison de la difficulté de calibration de ce paramètre.

Il n'est pas exclu que la méthode d'essai permettant la détermination des valeurs I_c des fils composites exclus de la présente méthode d'essai puisse être abordée dans de futurs documents.

Measurements on short, straight specimens are considered acceptable practice for routine measurements if the cross-sectional area of the specimen is small in comparison with its length. However, for simplicity, this specimen geometry is omitted.

Measurements on non-inductively wound (bifilar) specimens in combination with epoxy specimen bonding are expected to give an uncertainty similar to the target uncertainty of this method. However, for simplicity, this specimen geometry is omitted. For a bifilar specimen geometry, the Lorentz force is away from the measurement mandrel for part of the specimen's length, and silicone vacuum grease or tension is not strong enough to keep the specimen from moving in this case.

Measurements on a non-ferromagnetic stainless steel mandrel combined with the use of solder to bond the specimen to the mandrel is considered acceptable practice for routine measurements. It will be difficult to estimate the amount of current shunted through the mandrel in this case, especially if a superconducting solder is used and the measurements are made in low magnetic fields.

When a magnetic field direction study is requested on a specimen with a rectangular cross-sectional area, there are two options. All field angles are possible by measuring a straight specimen geometry in a radial access magnet. Two field angles (0° and 90°) are possible by measuring a hairpin specimen geometry and a coiled specimen geometry in a solenoid magnet. Neither the straight nor the hairpin specimen geometry method is covered here.

The target uncertainty of the method described in this standard is defined by the results of an interlaboratory comparison. Results from previous interlaboratory comparisons were used in this test method to formulate the tolerances of the many variables that affect the uncertainty of critical current measurements. The target uncertainty, for an interlaboratory comparison, is a coefficient of variation (standard deviation divided by the average of critical current determinations) that is less than 3 %.

The coefficient of variation provides additional information on the expected distribution of results from a large number of determinations. However, if there are significant systematic errors, the measurements of two laboratories may differ by two or more times the coefficient of variation.

The expected and accepted uncertainty of critical current measurements at magnetic fields in the order of 0,8 times the upper critical field (around 9 T at 4,2 K) will have a higher coefficient of variation due to the increased sensitivity of I_c to magnetic field, temperature, strain and required voltage sensitivity.

It is expected that the uncertainty of the magnetic field in this test method may be the single most significant contributor to the overall uncertainty of the critical current measurement. However, a more restrictive tolerance may not be achievable due to the difficulty in calibrating this parameter.

The test method for determining the I_c values of superconducting composite wires excluded from the present test method may be addressed in future documents.

A.3 Appareillage

A.3.1 Matériau du mandrin de mesurage

Pour le mandrin de mesurage, il est recommandé d'utiliser les matériaux indiqués ci-dessous. Cependant, d'autres matériaux peuvent être utilisés, à condition qu'ils respectent les critères mentionnés en 6.1.

Matériau isolant:

- composite de fibre de verre et résine époxyde, le spécimen étant situé dans le plan du produit;
- tube en composite de fibre de verre et résine époxyde, fabriqué à partir d'une souche de plaque, de telle façon que les plans du produit soient perpendiculaires à l'axe du tube;
- tube en composite de fibre de verre et résine époxyde, laminé avec parois fines.

Matériau conducteur non ferromagnétique recouvert d'une couche isolante:

- alliage de cuivre non ferromagnétique, tel que le laiton;
- acier inoxydable non ferromagnétique.

Matériau conducteur non ferromagnétique et non recouvert d'une couche isolante:

- acier inoxydable non ferromagnétique;
- Sn avec Ti (5 % masse) et Al (2,5 % masse), avec comme restriction que ce matériau devient supraconducteur à des températures inférieures à 3,7 K.
- alliage de cuivre comme le laiton (Cu-Zn) et le cupronickel (Cu-Ni).

Le courant de fuite à travers un mandrin conducteur sans couche isolante peut être estimé en faisant des mesures dans les conditions d'essai avec et sans spécimen sur le mandrin. La mesure de la chute de tension entre contacts de courant sans spécimen et dans les conditions d'essai peut être utilisée pour estimer la résistance de la ligne de fuite y compris la résistance de contact. La mesure de la chute de tension entre contacts de courant avec un spécimen et dans les conditions d'essai peut ensuite être utilisée pour évaluer le courant de fuite.

Il est possible d'avoir un courant de fuite significatif dans un mandrin conducteur lorsqu'on mesure des conducteurs thermiquement instables [2]. Une section du conducteur à l'extérieur des prises de tension régulières peut passer à l'état normal, provoquant un courant de fuite significatif, une baisse du courant net réel dans le spécimen, et des résultats confus. Ceci peut facilement être détecté en surveillant et en enregistrant la tension sur une paire de prises de diagnostic qui mesure la tension entre les contacts du courant et le spécimen.

A.3.2 Construction du mandrin

En cas d'utilisation d'un sillon hélicoïdal, il est recommandé de choisir une profondeur de sillon au moins égale à la moitié du diamètre du fil, avec un fil rond ou à la moitié de l'épaisseur du fil, avec un fil rectangulaire. Généralement, le sillon utilisé avec un fil rond est en forme de V et celui utilisé avec un fil rectangulaire est de forme rectangulaire.

Un angle de pas de 7° correspond à un pas de 9 mm pour un diamètre de mandrin de 24 mm.

Généralement, les contacts de courant sont constitués d'anneaux cylindriques en cuivre comme indiqué à la Figure A.1 et il convient d'utiliser un anneau ayant un diamètre extérieur proche du diamètre intérieur du spécimen enroulé, afin de minimiser la déformation en flexion.

A.3 Apparatus

A.3.1 Measurement mandrel material

The following materials are recommended for measurement mandrel material. There is, however, no restriction on using other materials as long as they satisfy the criteria mentioned in 6.1.

Insulating material:

- fibreglass epoxy composite, with the specimen lying in the plane of the fabric;
- fibreglass epoxy composite tube fabricated from a plate stock so that the planes of the fabric are perpendicular to the axis of the tube;
- thin-walled rolled fibreglass epoxy composite tube.

Conductive non-ferromagnetic material covered with an insulating layer:

- non-ferromagnetic copper alloy, such as brass;
- non-ferromagnetic stainless steel.

Conductive non-ferromagnetic material without an insulating layer:

- non-ferromagnetic stainless steel;
- Ti-5 mass % Al-2,5 mass % Sn, with the limitation that this material is superconductive at temperatures below 3,7 K.
- copper alloys like brass (Cu-Zn) and cupronickel (Cu-Ni).

The leakage current through a conductive mandrel without an insulating layer can be estimated by making measurements under test conditions with and without a specimen on the mandrel. The measurement of voltage drop from current contact to current contact without a specimen and under test conditions can be used to estimate the resistance of the leakage path including contact resistance. Then, the measurement of voltage drop from current contact to current contact with a specimen and under test conditions can be used to estimate the leakage current.

It is possible to have a significant leakage current through a conductive mandrel when measuring conductors that are thermally unstable [2]. A section of the conductor outside the regular voltage taps can switch to the normal state, causing significant leakage current, a lowering of the actual net current through the specimen, and highly misleading results. This can easily be detected by monitoring and recording the voltage on a pair of diagnostic taps that measure the voltage between the current contacts to the specimen.

A.3.2 Mandrel construction

If a helical groove is chosen, it is recommended that the groove depth be at least half the wire diameter for a round wire or at least half the thickness for a rectangular wire. Typically, the groove for a round wire is V-shaped and the groove for a rectangular wire is rectangular-shaped.

A 7° pitch angle corresponds to a pitch of 9 mm for a 24 mm mandrel diameter.

Typically, the current contacts are made from cylindrical copper rings as shown in Figure A.1 and the outer diameter of the ring should be close to the inner diameter of the coiled specimen to minimize bending strain.

Généralement, un fil supraconducteur à forte capacité est utilisé pour conduire le courant vers le contact de courant et à partir du contact de courant, afin de réduire la charge calorifique près des extrémités du spécimen.

Il est possible d'envelopper partiellement les fils supraconducteurs autour des anneaux de cuivre afin de réduire la résistance effective du contact. Si le courant critique du fil supraconducteur est beaucoup plus élevé que celui du spécimen dans les conditions d'essai, il convient de ne pas recouvrir plus de 90 % de la circonférence de l'anneau de cuivre par le fil.

A.4 Préparation du spécimen

A.4.1 Fixation du spécimen

Le déplacement du spécimen peut provoquer un quench prématuré du circuit (emballement thermique irréversible) ou un bruit de tension et, par la suite, une réduction de la reproductibilité du courant critique.

La tension d'enroulement peut assurer un support approprié au spécimen, en fonction de la contraction thermique différentielle entre le spécimen et le mandrin de mesurage.

Bien qu'un adhésif à basse température puisse permettre de réduire la probabilité de quench, un surplus d'adhésif peut provoquer un quench en empêchant la circulation calorifique entre le spécimen et le bain d'hélium.

Pour obtenir une fixation solide du spécimen, il faut que la surface du mandrin de mesurage soit rugueuse et propre, et que celle du spécimen soit propre.

Il est peu pratique d'indiquer une seule technique de fixation des spécimens pour tous les conducteurs et tous les matériaux du mandrin de mesurage.

La fixation par soudage du spécimen au mandrin de mesurage entre les contacts de courant est exclue, car le courant de fuite devient difficile à estimer, la stabilité est augmentée artificiellement et la contraction thermique différentielle est amplifiée.

Cependant, quelque soit la technique de fixation du spécimen, une augmentation excessive de la température du spécimen doit être prise en considération.

A.4.2 Montage du spécimen

La superficie de section du conducteur est mesurée avant son montage et elle est utilisée dans la détermination de I_c lorsqu'un critère de résistivité est utilisé. Une incertitude type combinée de 2,5 % est suffisante pour la détermination de I_c et ρ_c ; cependant, il n'est pas exclu qu'une incertitude type combinée ne dépassant pas 0,5 % soit nécessaire pour déterminer la densité de courant critique J_c .

La courbure de la bobine est la même que la courbure naturelle du bobinage.

En règle générale, une des extrémités du fil est fixée. Une tension d'enroulement est ensuite appliquée au spécimen. L'autre extrémité est fixée. Enfin, les contacts de courant sont soudés.

Le soudage de plusieurs spires au contact de courant peut provoquer un affaiblissement du champ magnétique. Ce dernier est engendré par le courant produit par modification du signal de consigne de fond du champ magnétique.

Typically, a higher current capacity superconductive lead is used to carry current to and from the current contact to reduce the heat load near the ends of the specimen.

Superconductive leads may be wrapped partway around the copper rings to reduce the effective contact resistance. If the critical current of the superconductive lead is much larger than that of the specimen under test conditions, then the lead should not cover more than 90 % of the circumference of the copper ring.

A.4 Specimen preparation

A.4.1 Specimen bonding

Specimen motion can result in a premature quench (irreversible thermal runaway), voltage noise and ultimately a reduction in the repeatability of critical current.

Winding tension can provide adequate specimen support depending on the differential thermal contraction between the specimen and the measurement mandrel.

Although a low temperature adhesive can help reduce the likelihood of a quench, too much adhesive can cause a quench by inhibiting the heat flow from the specimen to the helium bath.

A rough and clean surface on the measurement mandrel and a clean surface on the specimen is needed for strong specimen bonding.

It is impractical to specify a single specimen bonding technique for all conductors and measurement mandrel materials.

The use of solder to bond the specimen to the measurement mandrel between the current contacts is not allowed for reasons of difficulty in estimating leakage current, artificially increasing stability and amplified differential thermal contraction.

However, in any specimen bonding technique, an excessive temperature rise of the specimen may be considered.

A.4.2 Specimen mounting

The cross-sectional area of the conductor is measured before it is mounted and this area is used in the determination of I_c when a resistivity criterion is used. A combined standard uncertainty of 2,5 % is sufficient for the determination of I_c and ρ_c ; however, a combined standard uncertainty not in excess of 0,5 % may be needed when a critical current density J_c determination is desired.

The coil is wound with the same curvature as the natural curvature set from spooling.

In general, one end of the wire is anchored. Winding tension is applied to the specimen. The other end is anchored. The current contacts are then soldered.

Multiple turns soldered to the current contact can cause a slowly decaying magnetic field. This magnetic field is produced by the current induced by a change in the background magnetic field set point.

La structure de support du spécimen doit permettre de maintenir le spécimen au centre de l'aimant de fond dans le cryostat d'hélium liquide, et de supporter les fils de courant et de tension entre le milieu à température ambiante et le bain d'hélium liquide.

Pour réduire les tensions thermoélectriques sur les fils de tension du spécimen, on utilise des fils de tension en cuivre qui relient sans interruption le bain d'hélium liquide au milieu à température ambiante, créant ainsi un environnement isotherme pour tous les raccords ou connexions placés à température ambiante. Il convient de noter que les joints ou les connexions immergés dans l'hélium liquide sont isothermes.

A.5 Procédure de mesure

Il n'est pas exclu qu'un circuit de protection contre le quench ou un shunt résistif soit nécessaire pour protéger le spécimen des dommages causés par le courant du spécimen, au cas où le spécimen entrerait dans l'état normal.

Une méthode d'acquisition des données $U-I$, appelée méthode à vitesse de balayage constante, consiste à faire osciller le courant à vitesse constante à partir de zéro jusqu'à un courant très légèrement supérieur à I_c . Les limitations de la vitesse de variation indiquées à l'Article 8 résultent des considérations relatives à la tension inductive et au chauffage des spécimens.

Les tensions inductives aux vitesses de variation les plus élevées autorisées peuvent ne pas être constantes avec un courant dépendant de la vitesse de variation, de la sensibilité de la tension, de l'historique de quench du spécimen, et lorsque le champ environnant a été récemment modifié [3]. Ces tensions inductives variables peuvent se révéler être des tensions de transfert du courant et limiter la validité des mesures données en 10.1. Cet effet sur les mesures peut être diminué en élevant premièrement le cycle du courant à I_c et en revenant à zéro après tout changement dans le champ magnétique appliqué ou après le quench du spécimen.

Une deuxième méthode d'acquisition des données $U-I$, appelée méthode de variation et de maintien du courant, consiste à faire varier le courant en un nombre de points répartis de façon appropriée le long de la courbe puis à maintenir le courant constant en chacun de ces points tout en effectuant un certain nombre de lectures du courant et de la tension. Dans ce cas, une vitesse de variation plus rapide entre chaque signal de consigne du courant est autorisée. Cependant, une courte pause est nécessaire après chaque variation rapide du courant.

Des temps de pause de 3 s peuvent être nécessaires suivant la vitesse de variation, la sensibilité de la tension, l'historique de quench du spécimen, et lorsque le champ environnant a été récemment modifié [3]. Cet effet sur les mesures peut être diminué en élevant premièrement le cycle du courant à I_c et en revenant à zéro après tout changement dans le champ magnétique appliqué ou après quench du spécimen.

Si le bruit du système est important en comparaison de la valeur recommandée de la tension, il est souhaitable d'augmenter le temps de variation du courant zéro à I_c au-delà de 150 s de façon à accorder plus de temps à l'intégration des données. Dans ce cas, il convient de prendre soin d'augmenter suffisamment la capacité thermique et/ou la surface de refroidissement des contacts de courant, de façon à annuler l'influence de la production de chaleur due à la durée nécessaire aux mesures. Il convient de noter que la méthode de variation et de maintien du courant permet l'intégration de données qui peuvent être réparties de manière appropriée sur la caractéristique $U-I$.

The specimen support structure is needed to hold the specimen in the centre of the background magnet in a liquid helium cryostat, and to support current and voltage leads between room and liquid helium temperatures.

To reduce thermoelectric voltages on the specimen voltage leads, copper voltage leads are used which are continuous from the liquid helium bath to room temperature where an isothermal environment for all room temperature joints or connections is provided. It should be noted that the joints or connections immersed in liquid helium are isothermal.

A.5 Measurement procedure

A quench protection circuit or a resistive shunt may be necessary to protect the specimen from damage caused by the specimen current in the event that the specimen enters the normal state.

One method of U - I data acquisition, called constant sweep rate method, is to sweep the current at a constant rate from zero to a current that is just a little above I_c . The ramp rate limitations in Clause 8 are due to considerations of inductive voltage and specimen heating.

The inductive voltages at the upper end of the allowed ramp rates may not be constant with current, depending on ramp rate, voltage sensitivity, quench history of the specimen, and when the background field was last changed [3]. These variable inductive voltages can appear to be current transfer voltages and can limit the validity of the measurement in 10.1. This effect may be reduced in subsequent measurements by first cycling the current up to I_c and back to zero after any change in the applied magnetic field or after the specimen has quenched.

A second method of U - I data acquisition, called the ramp and hold method, is to ramp the current to a number of appropriately distributed points along the curve and hold the current constant at each of these points while acquiring a number of voltage and current readings. A faster ramp rate is allowed between each current set point in this case. However, a short settling time is needed after each fast current ramp.

Settling times as long as 3 s may be necessary depending on ramp rate, voltage sensitivity, quench history of the specimen, and when the background field was last changed [3]. This effect may be reduced in subsequent measurements by first cycling the current up to I_c and back to zero after any change in the applied magnetic field or after the specimen has quenched.

If the system noise is significant compared to the prescribed value of voltage, it is desirable to increase the time for the ramp from zero current to I_c to more than 150 s in order to allow more time for data averaging. In this case, care should be taken to increase the heat capacity and/or cooling surface of the current contacts enough to suppress the influence of heat generation due to the longer time required for the measurement. It should be noted that the step and hold current method allows for averaging data which can be appropriately distributed along the U - I characteristic.

Dans le temps, soumettre le spécimen à des variations de courant peut créer une tension positive ou négative sur les prises de tension. Cette source de tension parasite peut être identifiée pendant la variation car elle est proportionnelle à la vitesse de variation. Si cette tension est importante en comparaison de U_c , diminuer la vitesse de dérivation, diminuer la surface de la boucle formée par les prises de tension et le spécimen situé entre eux, ou bien utiliser la méthode de variation et de maintien du courant.

On note qu'un glissement tour à tour ou un déplacement continu du spécimen peut se produire pendant la variation, en raison de l'augmentation de la force de Lorentz dans le temps. Si cette source de tension parasite est importante en comparaison de U_c , contrôler la direction de la force de Lorentz, améliorer la stabilité du spécimen ou la stabilité thermique, ou bien utiliser la méthode de variation et de maintien du courant.

Si la caractéristique $U-I$ n'est pas valide, il est permis d'accroître la reproductibilité en améliorant la protection contre le quench du spécimen. Des modifications peuvent également permettre d'améliorer la stabilité du spécimen ou la stabilité thermique (par l'allongement éventuel des contacts de courant et la diminution éventuelle de la quantité d'adhésif sur la surface externe du spécimen).

Il est possible d'inclure dans la tension de base les tensions thermoélectriques, les tensions décalées, les tensions de terre et les tensions en mode commun. On suppose que ces tensions demeurent relativement constantes pendant la durée d'enregistrement de chaque caractéristique $U-I$. De légères variations de tensions thermoélectriques et décalées peuvent être supprimées de façon approchée en mesurant la tension de base avant et après le mesurage de la courbe $U-I$ et en supposant que la variation est linéaire dans le temps. Si la variation de tension est importante en comparaison de U_c , il convient d'apporter des corrections à la configuration expérimentale.

Des variations des tensions de terre et en mode commun peuvent être considérées comme des fonctions irrégulières du courant du spécimen et, si elles sont élevées, il convient de prendre des mesures pour les réduire. Ces variations sont difficiles à distinguer d'une tension de transfert de courant et la limitation du transfert de courant limiterait également la validité de la mesure. Un essai permettant de détecter les problèmes de tension en mode commun peut être effectué en mesurant une paire de prises de tension nulle (voir Figure A.1) et en la considérant comme une fonction du courant du spécimen. Il convient de ne pas considérer une valeur non nulle de la tension mesurée sur cette paire comme une fonction du courant du spécimen, bien qu'il soit permis de la traiter comme une fonction de la vitesse de balayage du courant. Si la tension mesurée est une fonction du courant, cela indiquera le niveau du problème.

A.6 Incertitude de la méthode d'essai

Une méthode facultative permettant d'estimer la précision globale de la mesure du courant critique par un laboratoire consiste à obtenir puis à mesurer le matériau de référence SRM-1457 normalisé, disponible à l'adresse suivante:

National Institute of Standards and Technology
Standard Reference Materials Program
100 Bureau Drive, Stop 2322
Gaithersburg, MD 20899-2322
U.S.A.
Telephone:(301)975-6776
Fax:(301)948-3730
srminfo@nist.gov
<http://www.nist.gov/srm>

Le mesurage du SRM par la présente méthode est valide, si l'on prend les précautions mentionnées dans le certificat SRM (ce qui signifie qu'il est permis de remplacer la méthode d'essai ASTM répertoriée dans le certificat par la présente méthode d'essai).

With time, ramping the specimen current can induce a positive or negative voltage on the voltage taps. This source of interfering voltage during the ramp can be identified by its proportional dependence on ramp rate. If this voltage is significant compared to U_c , then decrease the ramp rate, decrease the area of the loop formed by the voltage taps and the specimen between them, or else use the step and hold current method.

Notice that stick-slip or continuous specimen motion can occur during the ramp due to the increasing Lorentz force with time. If this source of interfering voltage is significant compared to U_c , then check the direction of the Lorentz force, improve the specimen support or thermal stability, or use the ramp and hold current method.

If the $U-I$ characteristic is not valid, the repeatability may be improved by improving the quench protection of the specimen. Changes can also be made to improve the specimen support or thermal stability (which might have longer current contacts and less adhesive on the outer surface of the specimen).

The baseline voltage may include thermoelectric, off-set, ground loop and common mode voltages. It is assumed that these voltages remain relatively constant for the time it takes to record each $U-I$ characteristic. Small changes in thermoelectric and off-set voltages can be approximately removed by measuring the baseline voltage before and after the $U-I$ curve measurement and assuming a linear change with time. If the change in the baseline voltage is significant compared to U_c , then corrective action to the experimental configuration should be taken.

Variations in ground loop and common-mode voltages can be irregular functions of specimen current and thus, if they are large, action should be taken to reduce them. This is difficult to distinguish from a current transfer voltage and would limit the validity of the measurement through the current transfer limit. A test for common-mode problems can be performed by measuring a null voltage tap pair (see Figure A.1) as a function of specimen current. A non-zero voltage measured on this pair should not be a function of specimen current, although it may be a function of current sweep rate. If it is a function of current, this will indicate the level of the problem.

A.6 Uncertainty of the test method

An optional method for assessing the overall uncertainty of a laboratory's critical current measurement system is to obtain and measure the standard reference material SRM-1457 which is available from:

National Institute of Standards and Technology
Standard Reference Materials Program
100 Bureau Drive, Stop 2322
Gaithersburg, MD 20899-2322
U.S.A.

Telephone: (301) 975-6776
Fax: (301) 948-3730
srminfo@nist.gov
<http://www.nist.gov/srm>

It is valid to measure the SRM with the present test method together with the precaution on the SRM certificate (i.e. the present test method may be substituted for the ASTM test method listed on the certificate).

Il n'est pas exclu que l'amplitude de l'effet de champ induit et la dépendance entre celui-ci et le courant, le diamètre de la bobine, le pas, etc., produise des effets systématiques détectables, mais il est peu vraisemblable que cette dépendance soit importante en comparaison de l'incertitude recherchée dans une comparaison croisée entre laboratoires sur des spécimens presque identiques. Cependant, une estimation approximative de l'effet de champ induit sur I_c peut être effectuée, si nécessaire, en utilisant les informations contenues dans le rapport d'essai. Voir l'Annexe B pour de plus amples informations sur l'effet de champ induit.

Il n'est pas exclu qu'un circuit de protection contre le quench, qui remet le courant du spécimen à zéro lorsque la tension dépasse un seuil de déclenchement, soit nécessaire pour obtenir des déterminations supplémentaires du courant critique.

A.7 Calcul des résultats

A.7.1 Critères de courant critique

Pour certaines applications, la superficie de section Nb-Ti est prise comme critère de résistivité. Cette superficie est généralement déterminée par la mesure du rapport Cu/Nb-Ti en utilisant la méthode de pesage, d'attaque et de pesage. Une procédure d'essai normalisée correspondante est disponible (voir la CEI 61788-5 [4]).

En cas d'adoption du critère $10^{-14} \Omega m$, il n'est pas exclu que la distance entre les prises de tension doive être supérieure à 500 mm pour que le signal atteigne le rapport de bruit.

Il n'est pas exclu qu'une plus grande séparation entre les connexions de courant et de tension soit nécessaire s'il existe une composante de transfert de courant importante qui se rapporte aux critères.

A.7.2 Valeur n (calcul facultatif)

On peut généralement obtenir une valeur approchée de la caractéristique $U-I$ du supraconducteur par l'équation empirique à loi en puissance:

$$U = U_0 (I/I_0)^n \quad (A.1)$$

où

U est la tension du spécimen, en microvolts (μV);

U_0 est la tension de référence, en microvolts (μV);

I est le courant du spécimen, en ampères (A);

I_0 est le courant de référence, en ampères (A).

Les valeurs n (sans unité) reflètent la forme générale de la courbe.

Le tracé de $\log U$ en fonction de $\log I$ n'est pas toujours linéaire, même pour les valeurs du courant proches du critère de courant critique $E_c = 10 \mu V/m$, et il est donc nécessaire de mentionner la portée des critères utilisés pour déterminer n . En règle générale, cette portée est $10 \mu V/m$ à $100 \mu V/m$ ou $10^{-14} \Omega m$ à $10^{-13} \Omega m$.

Pour la dispersion des valeurs n déterminées, il est possible d'obtenir un coefficient de variation atteignant 20 % et la procédure permettant de déterminer la valeur n est donc facultative dans la présente méthode.

The size and complex dependence of the self-field effect on current, coil diameter, pitch, etc. may result in a detectable systematic effect, but is not expected to be significant compared to the target uncertainty for an interlaboratory comparison on nearly identical specimens. However, a rough estimation of the self-field effect on I_c can be made, if necessary, using the information contained in the test report. See Annex B for a further discussion of the self-field effect.

A quench protection circuit that resets the specimen current to zero when the specimen voltage exceeds a trip point may be necessary to allow additional determinations of critical current.

A.7 Calculation of results

A.7.1 Critical current criteria

For some applications, the Nb-Ti cross-sectional area is used in the resistivity criterion. This area is usually determined by a measurement of the Cu to Nb-Ti ratio using the weighing, etching and weighing method. A corresponding standard test procedure is available (see IEC 61788-5 [4]).

When the criterion of $10^{-14} \Omega\text{m}$ is adopted, the distance between voltage taps may need to be greater than 500 mm to increase the signal-to-noise ratio.

A larger separation between current and voltage connections may be necessary if a significant current transfer component exists relative to the criteria.

A.7.2 n -value (optional calculation)

The superconductor's U - I characteristic can usually be approximated by the empirical power-law equation:

$$U = U_0 (I/I_0)^n \quad (\text{A.1})$$

where

U is the specimen voltage, in microvolts (μV);

U_0 is a reference voltage, in microvolts (μV);

I is the specimen current, in amperes (A);

I_0 is a reference current, in amperes (A).

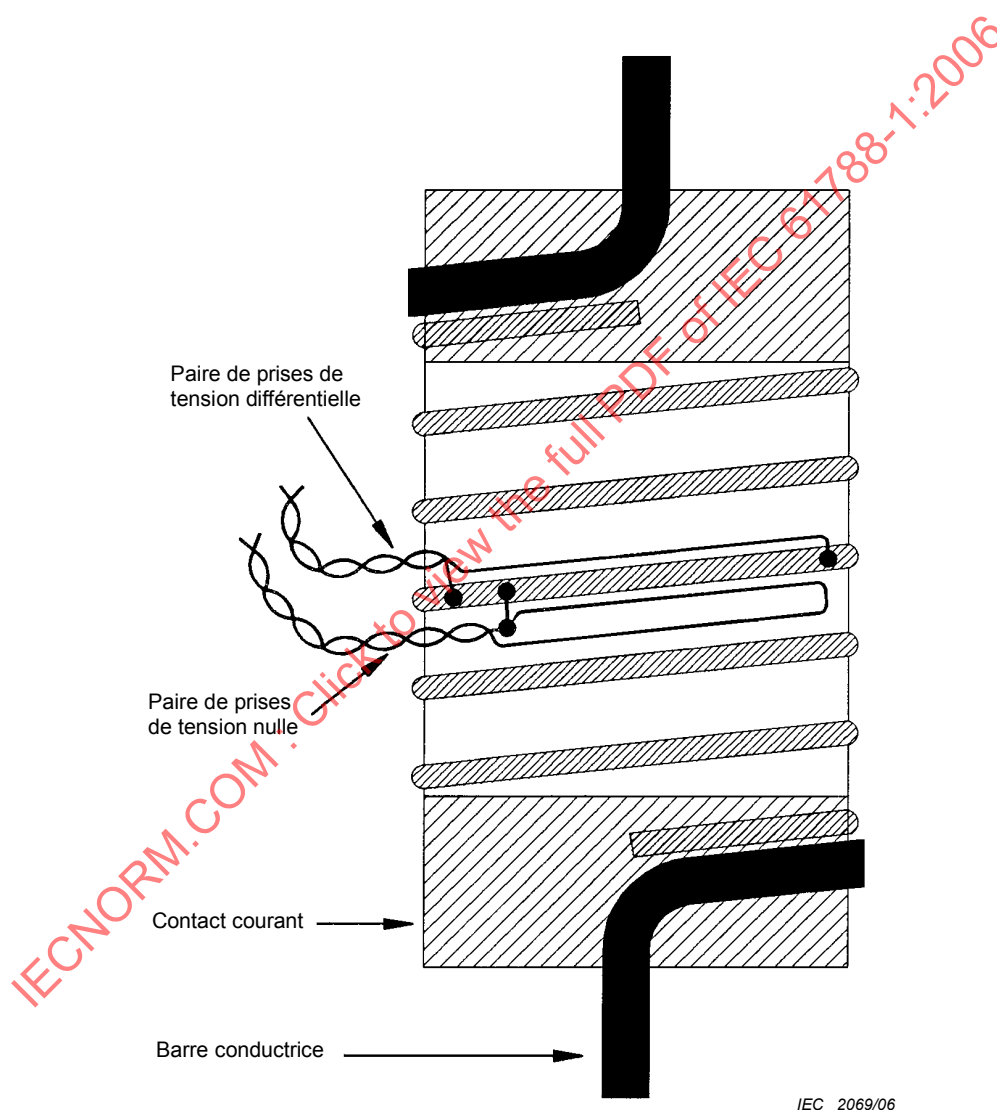
The n -value (no units) reflects the general shape of the curve.

A plot of $\log U$ versus $\log I$ is not always linear, even in the current range near the critical current criterion $E = 10 \mu\text{V/m}$, thus the range of the criteria used to determine n needs to be reported. Typically this range is $10 \mu\text{V/m}$ to $100 \mu\text{V/m}$ or $10^{-14} \Omega\text{m}$ to $10^{-13} \Omega\text{m}$.

The scatter in the determined values of n may have a coefficient of variation as large as 20 %, therefore the procedure for determining the n -value is optional in the present method.

Il n'est pas exclu que les effets suivants contribuent à la variabilité de la valeur n :

- bruit de la tension;
- ondulation du courant;
- refroidissement du spécimen (quantité d'adhésif utilisée ou stabilité supplémentaire apportée par un mandrin conducteur non isolé);
- ondulation et uniformité du champ magnétique;
- champ induit du courant du spécimen;
- gradient thermique du spécimen.



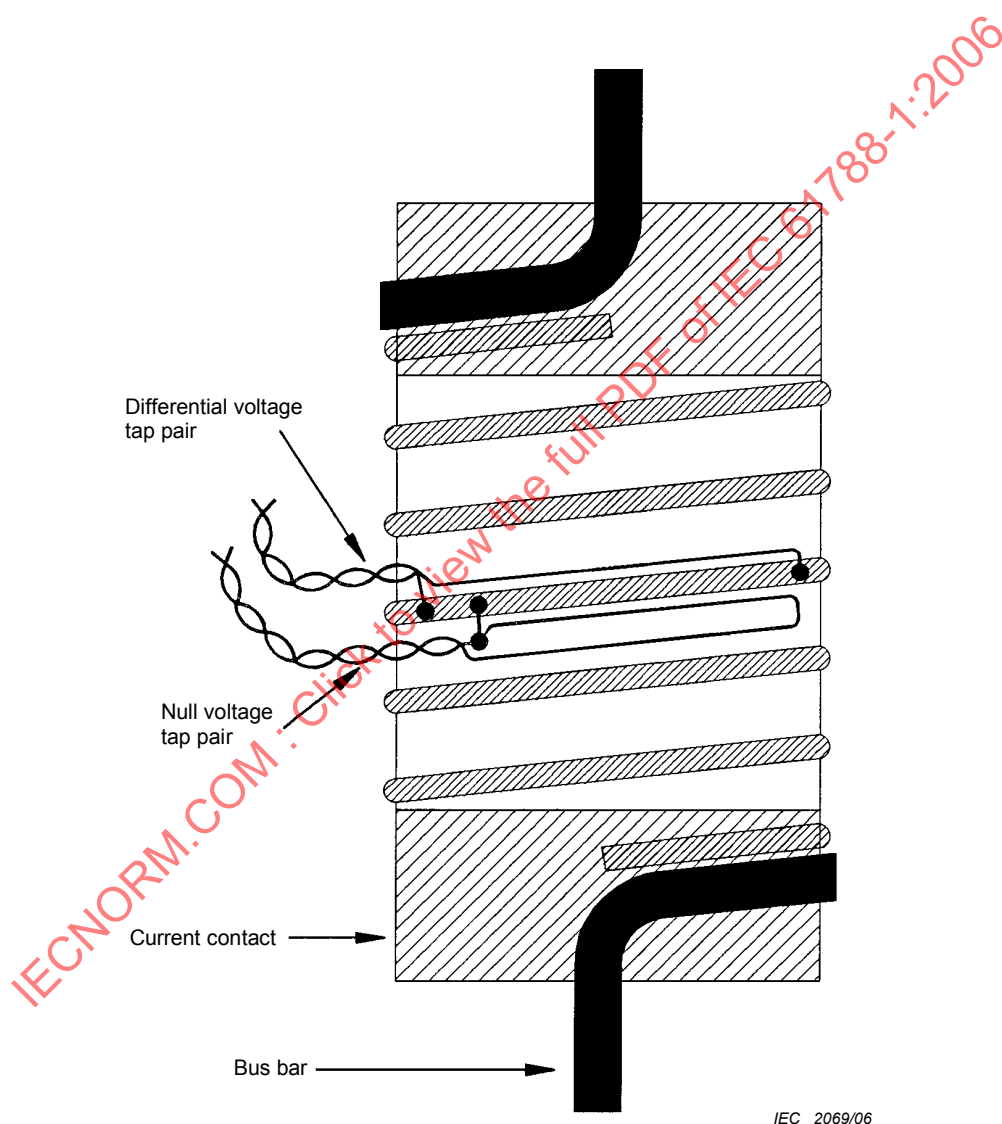
IEC 2069/06

NOTE La paire de prises de tension nulle est utilisée pour détecter les problèmes de tension de terre ou en mode commun. La paire de prises de tension différentielle (représentée ici sur une longueur réduite pour plus de clarté) n'est pas activée tant qu'une paire séparée est connectée au spécimen, comme le montre la figure, un fil de la paire étant mis en court-circuit avec le fil qui reste connecté au spécimen. La configuration de la paire de prises de tension nulle comprend une petite boucle qui permet de simuler l'inductance mutuelle de la paire de prises de tension différentielle. Il convient que la tension mesurée sur la paire de prises de tension nulle ne soit pas une fonction du courant du spécimen, bien qu'il soit permis que la tension soit une fonction de la vitesse de balayage du courant. Si la tension mesurée est une fonction du courant, cela indique le niveau du problème.

Figure A.1 – Instrumentation du spécimen avec une paire de prises de tension nulle

Other effects that may contribute to the variability of the n -value are the following:

- voltage noise;
- current ripple;
- specimen cooling (amount of adhesive used or extra stability from an un insulated conductive mandrel);
- magnetic field ripple and uniformity;
- self-field of the specimen current;
- a thermal gradient on the specimen.



NOTE The null voltage tap pair is used for the detection of ground loop or common-mode voltage problems. The differential voltage tap pair (shown here over a short length for clarity) is left undisturbed while a separate pair is attached to the specimen as shown, with one lead of the pair shorted to the other one which is still connected to the specimen. The null voltage tap pair is configured with a small loop of wire to simulate the mutual inductance of the differential voltage tap pair. The voltage measured on the null voltage tap pair should not be a function of specimen current, although it may be a function of current sweep rate. If it is a function of current, this indicates the level of the problem.

Figure A.1 – Instrumentation of specimen with a null voltage tap pair

Annexe B (informative)

Effet de champ induit

En raison du courant élevé circulant dans un spécimen enroulé sous forme de bobine, le spécimen génère son propre champ magnétique, ce qui produit l'effet de champ induit sur le courant critique mesuré. Ce champ induit est généré en plus du champ magnétique appliqué et le champ total auquel est soumis le spécimen est donc supérieur au champ magnétique appliqué sur une portion de la superficie de section du conducteur. Certains laboratoires effectuent une correction approchée prenant en compte ce champ induit supplémentaire.

Dans une comparaison croisée de mesures du courant critique entre laboratoires, la correction de champ induit risquerait de compromettre inutilement les données I_c , puisque les spécimens de chaque laboratoire seraient soumis à un effet de champ induit presque semblable. Les seuls facteurs pouvant affecter le champ induit seraient le diamètre et le pas du mandrin de mesurage (qui fait l'objet d'un contrôle dans une comparaison croisée entre laboratoires) et l'homogénéité du champ magnétique appliqué. Il n'est pas nécessaire d'effectuer une correction approchée pour prendre en compte l'effet de champ induit, car les spécimens sont presque identiques dans les comparaisons croisées entre laboratoires. Si certains laboratoires qui participent à la comparaison croisée corrigent les données du courant critique pour prendre en compte l'effet de champ induit et si d'autres ne le font pas, les résultats obtenus ne sont pas comparables. Il semble donc préférable, dans les comparaisons croisées entre laboratoires, de ne pas effectuer de corrections pour prendre en compte l'effet de champ induit sur le courant critique.

La correction de champ induit n'en est pas moins utile et nécessaire pour comparer les densités des courants critiques pour des fils de diamètre différent. Dans les comparaisons de densités de courant critique de fils de diamètre différent, les courants induits auxquels sont soumis les conducteurs diffèrent et il convient de les corriger. Les densités de courant obtenues après correction du champ induit produiraient des données plus comparables. Une correction approchée se base sur le champ magnétique d'un fil long et droit:

$$B_{SF} = \mu_0 I / (2\pi r) \quad (B.1)$$

où

B_{SF} est la valeur approchée du champ induit, en teslas (T);

μ_0 est la perméabilité magnétique du vide, $4\pi \times 10^{-7}$ H/m;

I est le courant, en ampères (A);

r est le rayon du fil, en mètres (m).

Cette équation peut également s'écrire sous la forme suivante:

$$B_{SF} = (4 \times 10^{-4}) I / d \quad (B.2)$$

où

B_{SF} est la valeur approchée du champ induit, en teslas (T);

I est le courant, en ampères (A);

d est le diamètre du fil, en millimètres (mm).