

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61788-2

Deuxième édition
Second edition
2006-11

Supraconductivité –

Partie 2:

**Mesure du courant critique –
Courant critique continu des
supraconducteurs composites Nb₃Sn**

Superconductivity –

Part 2:

**Critical current measurement –
DC critical current of Nb₃Sn
composite superconductors**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61788-2:2006

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

61788-2

Deuxième édition
Second edition
2006-11

Supraconductivité –

Partie 2:

**Mesure du courant critique –
Courant critique continu des
supraconducteurs composites Nb₃Sn**

Superconductivity –

Part 2:

**Critical current measurement –
DC critical current of Nb₃Sn
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

W

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	6
INTRODUCTION	10
1 Domaine d'application	12
2 Références normatives	12
3 Termes et définitions	14
4 Principe	16
5 Exigences	16
6 Appareillage	18
6.1 Matériau du mandrin de réaction	18
6.2 Construction du mandrin de réaction	18
6.3 Matériaux du mandrin de mesurage	20
6.4 Construction du mandrin de mesurage	20
6.5 Réalisation des mesures	20
7 Préparation du spécimen	20
7.1 Montage du spécimen pour le traitement thermique de réaction	20
7.2 Traitement thermique de réaction	22
7.3 Montage du spécimen pour la mesure	22
7.4 Fixation du spécimen	22
8 Procédure de mesure	24
9 Justesse et précision de la méthode d'essai	26
9.1 Courant critique	26
9.2 Température	26
9.3 Champ magnétique	26
9.4 Structure de support du spécimen	26
9.5 Protection du spécimen	26
10 Calcul des résultats	28
10.1 Critères de courant critique	28
10.2 Valeur n (calcul facultatif, se reporter à A.7.2)	30
11 Rapport d'essai	30
11.1 Identification du spécimen d'essai	30
11.2 Compte rendu des valeurs I_C	30
11.3 Compte rendu des conditions d'essai	32
Annexe A (informative) Informations supplémentaires relatives aux Articles 1 à 10	34
Annexe B (informative) Effet de déformation des conducteurs Nb ₃ Sn	58
Annexe C (informative) Effet du champ induit	62
Annexe D (normative) Méthode à un mandrin	66
Bibliographie	72

CONTENTS

FOREWORD.....	7
INTRODUCTION.....	11
1 Scope.....	13
2 Normative references	13
3 Terms and definitions	15
4 Principle	17
5 Requirements	17
6 Apparatus.....	19
6.1 Reaction mandrel material.....	19
6.2 Reaction mandrel construction	19
6.3 Measurement mandrel material	21
6.4 Measurement mandrel construction	21
6.5 Measurement set up.....	21
7 Specimen preparation.....	21
7.1 Specimen mounting for reaction heat treatment.....	21
7.2 Reaction heat treatment.....	23
7.3 Specimen mounting for measurement.....	23
7.4 Specimen bonding.....	23
8 Measurement procedure.....	25
9 Precision and accuracy of the test method.....	27
9.1 Critical current.....	27
9.2 Temperature.....	27
9.3 Magnetic field.....	27
9.4 Specimen support structure.....	27
9.5 Specimen protection.....	27
10 Calculation of results.....	29
10.1 Critical current criteria	29
10.2 n -value (optional calculation, refer to A.7.2)	31
11 Test report.....	31
11.1 Identification of test specimen	31
11.2 Report of I_C values	31
11.3 Report of test conditions.....	33
Annex A (informative) Additional information relating to Clauses 1 to 10.....	35
Annex B (informative) Strain effect of Nb ₃ Sn conductors	59
Annex C (informative) Self-field effect.....	63
Annex D (normative) One-mandrel method	67
Bibliography.....	73

Figure 1 – Caractéristique $U-I$ intrinsèque.....	28
Figure 2 – Caractéristique $U-I$ avec une composante de transfert de courant	28
Figure A.1 – Instrumentation du spécimen avec une paire de prises de tension nulle	44
Figure B.1 – Variabilité du courant critique avec la déformation uniaxiale (traction) pour un fil composite Nb ₃ Sn typique représentée avec différents champs magnétiques	60
Tableau A.1 – Données concernant la contraction thermique des supraconducteurs Nb ₃ Sn et matériaux choisis	56

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-2:2006

Figure 1 – Intrinsic U - I characteristic	29
Figure 2 – U - I characteristic with a current transfer component.....	29
Figure A.1 – Instrumentation of specimen with a null voltage tap pair	45
Figure B.1 – Uniaxial (tensile) strain dependence of critical current for a typical Nb ₃ Sn composite wire shown with various magnetic fields [7]	61
 Table A.1 – Thermal contraction data of Nb ₃ Sn superconductor and selected materials	57

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-2:2006

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 2: Mesure du courant critique – Courant critique continu des supraconducteurs composites Nb₃Sn

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 61788-2 a été établie par le comité d'études 90 de la CEI: Supraconductivité.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition publiée en 1999. Les modifications apportées à cette deuxième édition portent essentiellement sur la formulation, sans inclure de modification technique, et sur l'ajout d'une nouvelle annexe (annexe normative D) dans laquelle les spécifications de la méthode à un mandrin sont décrites.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SUPERCONDUCTIVITY –

**Part 2: Critical current measurement –
DC critical current of Nb₃Sn 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 61788-2 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 1999. Modifications made to the second edition are mostly wording that essentially includes no technical changes and an addition of a new annex (normative Annex D) in which the specifications in the one-mandrel method are described.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
90/195/FDIS	90/199/FDIS

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

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

Une liste de toutes les parties de la CEI 61788, sous le titre général: *Supraconductivité*, est disponible sur le site web de la CEI.

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-2:2006

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

FDIS	Report on voting
90/195/FDIS	90/199/RVD

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

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

A list of all parts of the IEC 61788 series, 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 61788-2:2006

INTRODUCTION

Les courants critiques des supraconducteurs composites sont utilisés pour 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 donnée dans la présente norme afin d'obtenir une partie des informations nécessaires pour 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 composite, des modifications résultant de variables de traitement, de la manipulation, du vieillissement, d'autres applications ou de conditions ambiantes. La présente méthode est utile dans le contrôle de la qualité, les essais de réception ou de recherche si les précautions données dans la présente norme sont observées.

Les courants critiques des supraconducteurs composites dépendent d'un grand nombre de variables. Il est nécessaire de considérer ces variables aussi bien lors des essais que lors 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 déterminés 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 peut être approprié de mesurer un certain nombre de spécimens d'essai.

La méthode d'essai couverte par la présente norme est basée sur celle concernant la détermination du courant critique des supraconducteurs composites Cu/Nb-Ti (CEI 61788-1[2] ¹⁾ et sur les travaux prénormatifs VAMAS (Projet Versailles sur les matériaux et normes avancés) concernant le courant critique des supraconducteurs composites Nb₃Sn. On sait que le courant critique des supraconducteurs Nb₃Sn est très sensible aux déformations mécaniques si on compare avec le cas des supraconducteurs Cu/Nb-Ti. C'est pourquoi certaines modifications sont effectuées dans les procédures d'essai qui peuvent affecter l'état de déformation du spécimen d'essai. Voir l'Annexe B pour l'historique de ces modifications.

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

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 the present standard 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.

The test method covered in this standard is based on that for the determination of the critical current of Cu/Nb-Ti composite superconductors (IEC 61788-1[2] ¹⁾ and the VAMAS (Versailles project on advanced materials and standards) prestandardization work on the critical current of Nb₃Sn composite superconductors. The critical current of Nb₃Sn superconductors is known to be highly sensitive to mechanical strain compared to Cu/Nb-Ti superconductors. Hence, some modifications are made on the test procedures which may affect the strain state of a test specimen. See Annex B for the background to these modifications.

1) Figures in square brackets refer to the Bibliography.

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 2: Mesure du courant critique – Courant critique continu des supraconducteurs composites Nb₃Sn

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61788 traite d'une méthode d'essai pour la détermination du courant critique continu des supraconducteurs composites Nb₃Sn qui sont fabriqués soit par le procédé du bronze, soit par le procédé de diffusion interne de l'étain, et dont le rapport cuivre/non-cuivre est supérieur à 0,2.

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 composite Nb₃Sn a une structure monolithique avec une surface de section ronde totale inférieure à 2 mm². Le spécimen utilisé dans la présente méthode d'essai a la forme d'une bobine inductive. La présente norme indique les écarts par rapport à la méthode d'essai permis dans des essais individuels de série et d'autres restrictions spécifiques.

Les conducteurs Nb₃Sn ayant des courants critiques supérieurs à 1 000 A ou des surfaces de section supérieure à 2 mm² peuvent être mesurés avec la présente méthode avec une réduction anticipée de précision et un effet de champ induit plus significatif (voir Annexe C). D'autres formes d'essai, plus spécialisées, peuvent être mieux appropriées pour des essais de conducteurs de plus grande taille qui ont été omis dans la présente norme dans un souci de simplicité et de précision.

En principe, il convient que la méthode d'essai indiquée dans la présente norme s'applique aux fils composites Nb₃Sn fabriqués selon un autre procédé. Cette méthode est également supposée adaptable à d'autres fils supraconducteurs composites après des modifications appropriées.

2 Références normatives

Le document référencé ci-après est indispensable 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 60050-815:2000, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Partie 815: Supra-conductivité*

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 2: Critical current measurement – DC critical current of Nb₃Sn composite superconductors

1 Scope

This part of IEC 61788 covers a test method for the determination of the d.c. critical current of Nb₃Sn composite superconductors which are fabricated by either the bronze process or the internal tin diffusion process and have a copper/non-copper ratio larger than 0,2.

This method is intended for use with superconductors which have critical currents of less than 1 000 A and n -values larger than 12 under standard test conditions and at magnetic fields of less than or equal to 0,7 times the upper critical magnetic field. The test specimen is immersed in a liquid helium bath at a known temperature during testing. The Nb₃Sn composite test conductor has a monolithic structure with a total round-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 which are allowed for routine tests and other specific restrictions are given in this standard.

Nb₃Sn conductors with critical currents above 1 000 A or total cross-sectional areas greater than 2 mm² can be measured with the present method with an anticipated reduction in precision and a more significant self-field effect (see Annex C). 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 precision.

The test method given in this standard should in principle apply to Nb₃Sn composite wires fabricated by any other process. This method is also expected to apply to other superconducting composite wires after some appropriate modifications.

2 Normative references

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

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

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et les définitions donnés dans la CEI 60050-815, dont certains sont repris ci-après dans un but pratique, et ceux qui suivent s'appliquent:

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

critères 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]

3.3

valeur n (d'un supraconducteur)

exposant obtenu lorsqu'on modélise, dans une certaine étendue de champ électrique ou de résistivité, la courbe tension (U) – courant (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

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 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$, où $\mathbf{J}$ est la densité du courant et $\mathbf{B}$ l'induction magnétique.

[VEI 815-03-16]

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

3.6

effet contrainte/déformation

effet d'effort/contrainte

changement des propriétés supraconductrices suite à l'application au supraconducteur de contraintes mécaniques, thermiques ou électromagnétiques

[VEI 815-03-14]

3 Terms and definitions

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

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]

3.3 n -value (of a superconductor)

exponent obtained in a specific range of electric field strength or resistivity when the voltage (U) – current (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 state

NOTE A term usually applied to superconducting magnets.

[IEV 815-03-11]

3.5 Lorentz force (on fluxons)

force applied to fluxons by a current

NOTE 1 The force per unit volume is given by $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$, where $\mathbf{J}$ is the current density, and $\mathbf{B}$ is the magnetic flux density.

[IEV 815-03-16]

NOTE 2 "Coulomb-Lorentz force" is defined in IEC 60050-815 [1].

3.6 stress effect strain effect

change in superconducting properties upon application of mechanical, thermal or electromagnetic stress to the superconductor

[IEV 815-03-14]

3.7

flexion

ε_b

déformation mécanique en pourcent résultant d'une flexion pure, définie par $\varepsilon_b = 100r/R$, où r est la demi-épaisseur du spécimen et R le rayon de courbure

[VEI 815-08-03]

3.8

transfert de courant (d'un supraconducteur composite)

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

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.

3.9

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 supérieure à I_c tout en acquérant fréquemment et de façon périodique des données $U-I$

3.10

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 spécimen doit être enroulé sur un mandrin de réaction cylindrique avec un sillon hélicoïdal et, après réaction, il doit être transféré sur un mandrin de mesure du même diamètre sur lequel l'angle hélicoïdal est conservé. Une méthode alternative avec un mandrin est donnée à l'Annexe D.

La longueur du spécimen doit dépasser 430 mm.

Le spécimen doit être fixé sur le mandrin de mesure en le serrant et/ou en le collant à l'aide d'un adhésif à basse température.

Dans la présente méthode, le champ magnétique appliqué doit être parallèle à l'axe du mandrin de mesure.

3.7

bending strain

ε_b

strain in percent arising from pure bending defined as $\varepsilon_b = 100r/R$, where r is a half of the specimen thickness and R is the bending radius

[IEV 815-08-03]

3.8

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

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.

3.9

constant sweep rate method

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

3.10

ramp-and-hold method

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 helium 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 specimen shall be wound on a cylindrical reaction mandrel with a helical groove and after reaction, transferred to a measurement mandrel of the same diameter on which the helical angle is preserved. An alternate one-mandrel method is given in Annex D.

The specimen shall be longer than 430 mm.

The specimen shall be affixed to the measurement mandrel by tightening the specimen and/or bonding with a low temperature adhesive.

In this test method, the applied magnetic field shall be parallel to the measurement mandrel axis.

La précision recherchée par la présente méthode est un coefficient de variation (écart type divisé par la moyenne des déterminations de courant critique), qui est inférieur à 3 % pour la mesure à 12 T et proche de 4,2 K.

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 de consulter et d'établir des règles d'hygiène et de sécurité appropriées et de déterminer l'applicabilité des restrictions en matière de réglementation avant utilisation. Des instructions de sécurité spécifiques sont données ci-après.

Ce type de mesure présente des dangers. 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. Un contact direct de la peau avec les canalisations de transfert de liquide froid, les vases de Dewar ou les différents organes de l'appareillage peuvent entraîner une congélation immédiate, comme un contact direct avec du fluide cryogénique en cas de déversement. Il est impératif d'observer les mesures de sécurité applicables à la manipulation de fluides cryogéniques.

6 Appareillage

Pour la méthode à un mandrin, continuer avec l'Article D.2.

6.1 Matériau du mandrin de réaction

Le mandrin de réaction doit être constitué d'un matériau résistant à la chaleur dont la surface peut être ou ne pas être traitée. Des matériaux appropriés pour les mandrins de réaction sont recommandés en A.3.1. Il est permis d'utiliser n'importe lequel d'entre eux.

6.2 Construction du mandrin de réaction

Il est recommandé que la forme d'ensemble du mandrin de réaction corresponde à celle du mandrin de mesurage sur lequel le spécimen individuel est à transférer.

Le diamètre du mandrin de réaction doit être suffisamment grand pour que la déformation de flexion du spécimen, qui est introduite dans le spécimen pendant l'enroulage, soit inférieure à 5 %.

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°. La profondeur du sillon doit être au moins égale à la moitié du diamètre du fil.

The target precision of this method is a coefficient of variation (standard deviation divided by the average of the critical current determinations), that is less than 3 % for the measurement at 12 T and near 4,2 K.

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 determine the applicability of regulatory limitations prior to use. Specific precautionary statements are given below.

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 the 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, cryogenics 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. It is imperative that safety precautions for handling cryogenic liquids be observed.

6 Apparatus

For the one-mandrel method, continue with Clause D.2.

6.1 Reaction mandrel material

The reaction mandrel shall be made from a heat-resistant material that may or may not have a treated surface. Suitable reaction mandrel materials are recommended in A.3.1. Any one of these may be used.

6.2 Reaction mandrel construction

The overall geometry of the reaction mandrel should be matched closely to that of the measurement mandrel to which the individual specimen is to be transferred.

The reaction mandrel shall have a diameter large enough that the specimen bending strain, which is introduced into the specimen during winding, is less than 5 %.

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°. The depth of the groove shall be at least half the wire diameter.

6.3 Matériaux du mandrin de mesure

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

Il est inévitable que le courant critique puisse dépendre du matériau du mandrin de mesure en raison de la contrainte produite par la contraction thermique différentielle entre le spécimen et le mandrin de mesure.

La déformation totale produite dans le spécimen à la température de mesure doit être réduite à $\pm 0,03\%$. En cas de déformation supérieure due à la contraction thermique différentielle du spécimen et du mandrin, on doit noter le courant critique à déterminer en état de déformation excessive par identification du matériau du mandrin.

Des matériaux appropriés pour les mandrins de mesure sont recommandés en A.3.3. Il est permis d'utiliser n'importe lequel d'entre eux.

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 courant critique I_c (voir 9.5).

6.4 Construction du mandrin de mesure

Le mandrin doit comporter un sillon hélicoïdal autour duquel le spécimen doit être enroulé.

Le diamètre du mandrin de mesure, l'angle de pas du sillon hélicoïdal, sa profondeur et sa forme doivent être proches de ceux du mandrin de réaction.

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 précision de $\pm 2^\circ$.

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

6.5 Réalisation des mesures

L'appareillage pour mesurer la caractéristique $U-I$ d'un spécimen supraconducteur est constitué d'une sonde, d'un cryostat d'essai, d'un système d'aimant et d'un système de mesure $U-I$.

La sonde, constituée d'un spécimen, d'un mandrin de mesure, d'une structure de support, de prises de tension, de fils de courant, etc., est insérée dans le cryostat d'essai rempli d'hélium liquide. Dans la plupart des cas, le cryostat contient un aimant solénoïde supraconducteur et sa structure de support pour appliquer un champ magnétique au spécimen. Le système de mesure $U-I$ se compose d'une source de courant continu, d'un enregistreur et des préamplificateurs nécessaires, de filtres ou voltmètres, ou d'une combinaison de ceux-ci. Un système d'acquisition des données assistée par ordinateur peut également être utilisé.

7 Préparation du spécimen

Pour la méthode à un mandrin, continuer avec l'Article D.4.

7.1 Montage du spécimen pour le traitement thermique de réaction

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

6.3 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 critical current may inevitably depend on the measurement mandrel material due to the strain induced by the differential thermal contraction between the specimen and the measurement mandrel.

The total strain induced in the specimen at the measuring temperature shall be minimized to be within $\pm 0,03$ %. If there is an excess strain due to the differential thermal contraction of the specimen and the mandrel, the critical current shall be noted to be determined under an excess strain state by identification of the mandrel material.

Suitable measurement mandrel materials are recommended in A.3.3. Any one of these may be used.

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 critical current I_c (see 9.5).

6.4 Measurement mandrel construction

The mandrel shall have a helical groove in which the specimen shall be wound.

The diameter of the measurement mandrel, the pitch angle of the helical groove and its depth and shape shall be close to those of the reaction mandrel.

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 an accuracy of $\pm 2^\circ$.

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

6.5 Measurement set up

The apparatus to measure the $U-I$ characteristic of a superconductor specimen consists of a specimen probe, a test cryostat, a magnet system and a $U-I$ measurement system.

The specimen probe, which consists of a specimen, a measurement mandrel, a specimen support structure, voltage taps, current leads etc. is inserted in the test cryostat filled with liquid helium. In most cases, the cryostat contains a superconducting solenoid magnet and its support structure to apply a magnetic field to the specimen. The $U-I$ measurement system consists of a d.c. current source, a recorder and necessary preamplifiers, filters or voltmeters, or a combination thereof. A computer-assisted data acquisition system may be also used.

7 Specimen preparation

For the one-mandrel method, continue with Clause D.4.

7.1 Specimen mounting for reaction heat treatment

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

Lorsqu'on utilise des critères de résistivité pour la détermination du courant critique, la surface totale de section S du spécimen doit être déterminée avec une précision de 5 %.

L'enroulement du spécimen doit empêcher toute torsade supplémentaire du spécimen.

Le spécimen doit être positionné dans le sillon du mandrin de réaction pratiquement sans tension (moins de 0,1 % de déformation de traction) de manière à ce que l'emplacement continue à être préservé et la pression de contact réduite au minimum pour prévenir la fixation par diffusion.

Le fil spécimen doit être retenu sur le mandrin de réaction en courbant les extrémités par de petits trous, un à chaque extrémité du mandrin, ou être retenu par une méthode équivalente.

Le spécimen doit être nettoyé pour éviter les effets de la contamination.

7.2 Traitement thermique de réaction

Le traitement thermique de réaction doit être effectué selon les spécifications du fabricant avec des limites d'erreur qui ne doivent pas être dépassées. Les variations de température dans le four doivent être contrôlées de manière à respecter ces limites.

7.3 Montage du spécimen pour la mesure

Après le traitement thermique de réaction, les extrémités du spécimen doivent être coupées pour correspondre au mandrin de mesurage.

Le spécimen doit être dévissé du mandrin de réaction en le serrant légèrement et en faisant tourner le mandrin à l'intérieur de celui-ci.

Le spécimen doit être immédiatement vissé au mandrin de mesurage de la même manière qu'il a été enlevé du mandrin de réaction. En le montant sur le mandrin de mesurage, le spécimen doit être placé dans le sillon et une extrémité doit être soudée à l'anneau de contact de courant. Le spécimen doit être enfoncé sur toute sa longueur en commençant par l'extrémité fixée en le positionnant ainsi fermement dans le sillon. L'extrémité libre doit ensuite être soudée à l'autre anneau de contact.

La longueur minimale de la partie soudée du contact de courant doit être supérieure à la plus petite valeur entre 40 mm et 30 fois le diamètre du fil. Il ne doit pas y avoir plus de trois tours de spécimen soudés sur chaque contact de courant.

La distance la plus courte entre un contact de courant et une prise de tension doit être supérieure à 100 mm.

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

La distance autour du spécimen entre les prises de tension, L , doit être mesurée avec une précision de 5 %. La séparation entre les prises de tension doit être supérieure à 150 mm.

7.4 Fixation du spécimen

On doit utiliser la tension d'enroulement du spécimen et/ou un adhésif à basse température (graisse silicone au vide ou résine époxyde) pour fixer le spécimen sur le mandrin de mesurage pour réduire ses mouvements. Si on utilise la tension du spécimen pour fixer le spécimen, cela doit alors être accompli pendant le montage du spécimen pour le procédé de mesurage (voir 7.3).

When using resistivity criteria for the critical current determination, the total cross-sectional area S of the specimen shall be determined to a precision of 5 %.

The specimen shall not be wound in a manner that would introduce additional twists into the specimen.

The specimen shall be located in the groove on the reaction mandrel under almost zero tension (less than 0,1 % tensile strain) so that location continues to be preserved and the contact pressure reduced to a minimum to discourage diffusion bonding.

The specimen wire shall be retained on the reaction mandrel by bending ends through small holes, one at each end of the mandrel, or be retained by some equivalent method.

The specimen shall be cleaned to avoid effects of contamination.

7.2 Reaction heat treatment

Reaction heat treatment shall be carried out according to the manufacturer's specification, which includes error limits which shall not be exceeded. Temperature variations within the furnace shall be controlled so as not to exceed those limits.

7.3 Specimen mounting for measurement

After the reaction heat treatment, the ends of the specimen shall be trimmed to suit the measurement mandrel.

The specimen shall be unscrewed from the reaction mandrel by lightly restraining it and rotating the mandrel within it.

The specimen shall be immediately screwed onto the measurement mandrel in the same manner as it was removed from the reaction mandrel. When mounting on the measurement mandrel, the specimen shall be laid into the groove and one end shall be soldered to the current contact ring. Starting from the fixed end, the specimen shall be stroked along its entire length, thus firmly seating the specimen in the groove. The free end shall then be soldered to the other contact ring.

The minimum length of the soldered part of the current contact shall be greater than the smaller of 40 mm and 30 wire diameters. No more than three turns of the specimen shall be soldered to each current contact.

The shortest distance from a current contact to a voltage tap shall be greater than 100 mm.

The voltage taps shall be soldered to the specimen. Minimize the mutual inductance between the applied 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 along the specimen between the voltage taps, L , shall be measured to an accuracy of 5 %. This voltage tap separation shall be greater than 150 mm.

7.4 Specimen bonding

Specimen tension and/or a low temperature adhesive (such as silicone vacuum grease or epoxy) shall be used to bond the specimen to the measurement mandrel to reduce specimen motion. If specimen tension is used to bond the specimen, then this shall be accomplished during the specimen mounting for the measurement process (see 7.3).

Lorsqu'on utilise un adhésif, une quantité minimale d'adhésif doit être appliquée dans le sillon contenant le spécimen et l'excès doit être enlevé de la surface extérieure du spécimen après montage du spécimen.

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

Le spécimen ne doit pas être fixé au mandrin par soudage.

8 Procédure de mesure

Le spécimen doit être immergé dans de l'hélium liquide pour la phase d'acquisition des données. Il est permis que le spécimen soit refroidi lentement dans une vapeur d'hélium ou introduit lentement dans un bain d'hélium liquide, ou tout d'abord immergé lentement dans de l'azote liquide et ensuite dans de l'hélium liquide. Le spécimen doit être refroidi et porté de la température ambiante à la température de l'hélium liquide (ou de l'azote liquide) en 5 min au moins.

Un cryostat doit fournir l'environnement nécessaire pour le mesurage 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 bain d'hélium liquide doit être mesurée pendant chaque détermination de I_c .

Le courant du spécimen doit être maintenu à un niveau suffisamment faible pour que le spécimen n'entre pas dans l'état normal sauf si un circuit de basculement de protection ou un shunt résistif est utilisé pour protéger le spécimen de tout dommage.

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. La dérive du courant pendant chaque signal de consigne du courant doit être inférieure à 1 % de I_c .

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 .

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

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 I_c reproductible avec une précision de 1 % et la caractéristique doit être stable dans le temps avec des tensions égales ou inférieures au critère de courant critique.

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.

When an adhesive is used, a minimum amount of adhesive shall be applied in the groove containing the specimen, and the excess shall be removed from the outer surface of the specimen after the specimen has been mounted.

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.

8 Measurement procedure

The specimen shall be immersed in liquid helium for the data acquisition phase. The specimen may be cooled slowly in helium vapour and then inserted into the liquid helium bath, or inserted slowly into the liquid helium bath, or first slowly immersed in liquid nitrogen and then liquid helium. The specimen shall be cooled from room temperature to liquid helium (or liquid nitrogen) temperature over a time period of at least 5 min.

The 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 temperature of the liquid helium bath shall be measured during 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 current drift during each current set point shall be less than 1 % of I_c .

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

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

A valid $U-I$ characteristic shall give a repeatable I_c to a precision of 1 % and the characteristic shall be stable with time for voltages at or below the critical current criterion.

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

9 Justesse et précision de la méthode d'essai

9.1 Courant critique

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

Une résistance standard à quatre bornes avec une précision au moins égale à 0,5 % doit être utilisée pour déterminer le courant du spécimen.

L'enregistrement de la caractéristique $U-I$ doit permettre de déterminer U avec une justesse de 10 %, le courant correspondant avec une précision de 1 % et une justesse de 1 %.

9.2 Température

La température du spécimen est supposée être la même que celle du liquide. La température du liquide doit être exprimée avec une précision de $\pm 0,02$ 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. Le mesurage de la pression doit être suffisamment précis pour permettre d'obtenir la précision requise du mesurage de la 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 magnétique doit fournir le champ magnétique avec une précision supérieure à $\pm 1\%$ et $\pm 0,02$ T et une justesse meilleure que $\pm 0,5\%$ et $\pm 0,02$ T, la valeur la plus grande étant retenue, sur la longueur du spécimen entre les prises de tension.

Le champ magnétique doit avoir une uniformité meilleure que 0,5 % et 0,02 T, la valeur la plus grande étant retenue, sur la longueur du spécimen entre les prises de tension.

Les variations périodiques et aléatoires maximales du champ magnétique doivent être inférieures à la valeur la plus grande de $\pm 1\%$ et $\pm 0,02$ T.

9.4 Structure de support du spécimen

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 une justesse de 1 %.

9.5 Protection du spécimen

Si un shunt résistif ou un circuit de basculement de protection 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 .

9 Precision and accuracy of the test method

9.1 Critical current

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 an accuracy of at least 0,5 %, shall be used to determine the specimen current.

The record of U - I characteristic shall allow the determination of U to a precision of 10 %, the corresponding current to an accuracy of 1 % and with a precision of 1 %.

9.2 Temperature

The specimen temperature is assumed to be the same as the temperature of the liquid. The liquid temperature shall be reported to an accuracy of $\pm 0,02$ 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 be accurate enough to obtain the required accuracy of the temperature measurement. For liquid helium depths greater than 1 m, a head correction may be necessary.

9.3 Magnetic field

A magnetic system shall provide the magnetic field to an accuracy better than the larger of ± 1 % and $\pm 0,02$ T and a precision better than the larger of $\pm 0,5$ % and $\pm 0,02$ T over the length of the specimen between the voltage taps.

The magnetic field shall have a uniformity better than the larger of 0,5 % and 0,02 T over the length of the specimen between the voltage taps.

The maximum periodic and random deviation of the magnetic field shall be less than the larger of ± 1 % and $\pm 0,02$ T.

9.4 Specimen support structure

The support structure shall provide 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 a precision of 1 %.

9.5 Specimen protection

If a resistive shunt or a 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 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 S du supraconducteur composite est préférée pour l'estimation de la résistivité (voir Figures 1 et 2).

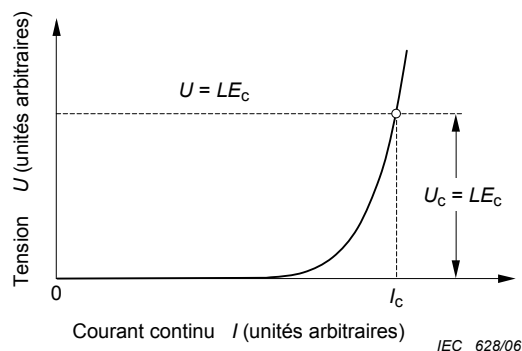


Figure 1a) – Application du critère du champ électrique

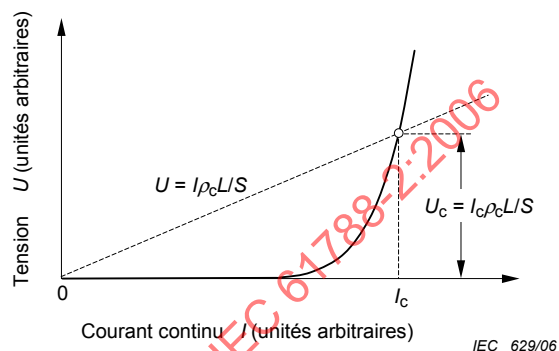


Figure 1b) – Application du critère de résistivité

NOTE L'application du critère du champ électrique (Figure 1a) et du critère de résistivité (Figure 1b) pour déterminer le courant critique est montrée ci-dessus.

Figure 1 – Caractéristique $U-I$ intrinsèque

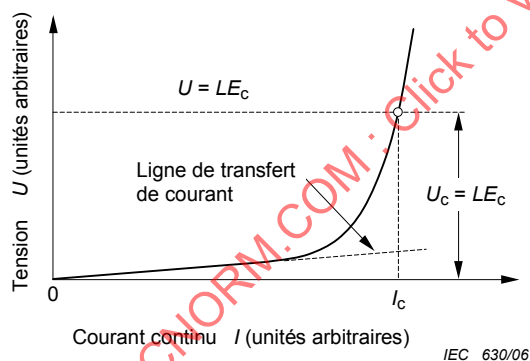


Figure 2a) – Application du critère du champ électrique

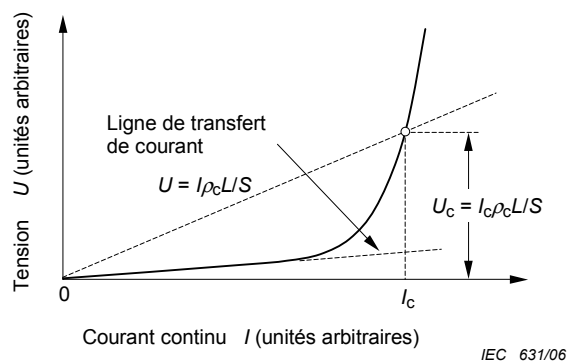


Figure 2b) – Application du critère de résistivité

NOTE L'application du critère du champ électrique (Figure 2a) et du critère de résistivité (Figure 2b) 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 est montrée ci-dessus.

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

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 $10^{-13} \Omega\text{m}$.

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-sectional area S of the composite superconductor is preferred for the estimation of the resistivity (see Figures 1 and 2).

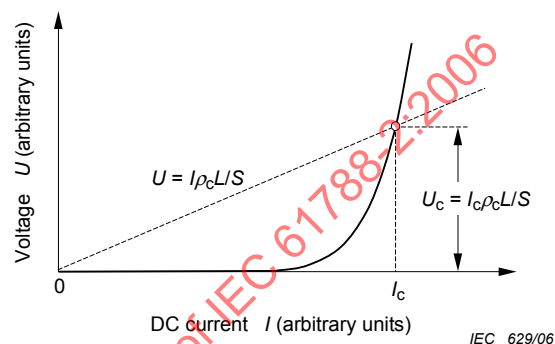
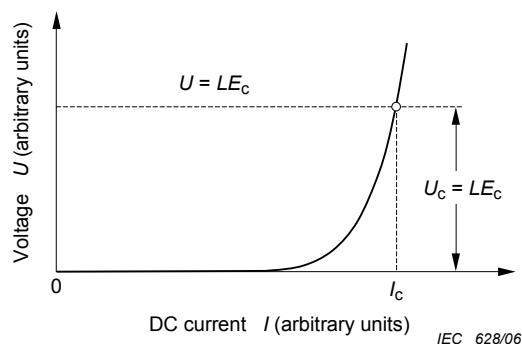


Figure 1a) – Application of the electric field criteria

Figure 1b) – Application of the resistivity criteria

NOTE The application of the (Figure 1a) electric field and (Figure 1b) resistivity criteria to determine the critical current is shown above.

Figure 1 – Intrinsic U - I characteristic

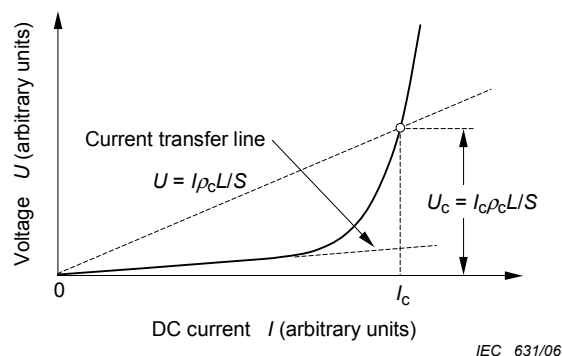
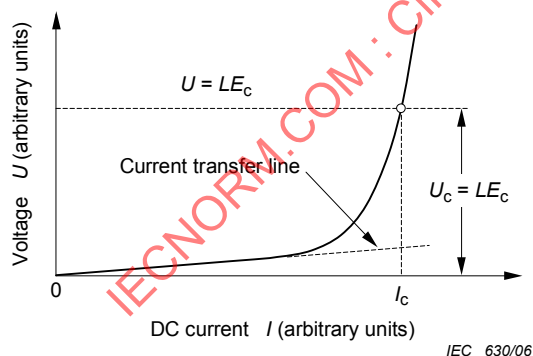


Figure 2a) – Application of the electric field criteria

Figure 2b) – Application of the resistivity criteria

NOTE The application of the (Figure 2a) electric field and (Figure 2b) 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 above.

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

In the case of 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 $10^{-13}\ \Omega\text{m}$.

Lorsqu'il est difficile d'obtenir un mesurage correct de I_c pour un critère de 100 $\mu\text{V/m}$, un critère E_c inférieur à 100 $\mu\text{V/m}$ doit le remplacer. 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 1a) et 2a)):

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

où

U_c est le critère de tension, en microvolts (μV);

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

E_c est le critère de champ électrique, en microvolts par mètre ($\mu\text{V/m}$).

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 sont les tensions, le courant et la résistivité correspondants, respectivement exprimés en microvolts, ampères et micro-ohms $\times$ mètres, au point d'intersection d'une ligne droite avec la courbe $U-I$ comme montré par les Figures 1b) et 2b), L étant la séparation entre prises de tension, en mètres, et S étant la section totale, 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 positive 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 $10^{-14} \Omega\text{m}$.

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.

11 Rapport d'essai

11.1 Identification du spécimen d'essai

Le spécimen d'essai doit être, si possible, identifié par les éléments suivants:

- nom du fabricant du spécimen;
- classification et/ou symbole;
- numéro de lot;
- matières premières avec leur composition chimique;
- forme et surface de la section du fil, nombre de filaments, diamètre des filaments, fractions de volume des filaments, rapport cuivre/non-cuivre, barrières, stabilisateur de cuivre et autres composants du fil, pas et direction de torsion;
- technique de procédé de fabrication (procédé du bronze, procédé de diffusion interne de l'étain, etc.).

11.2 Compte rendu des valeurs I_c

Les valeurs I_c et les critères correspondants doivent être mentionnés.

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 $\mu\text{V/m}$ shall 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 1a) and 2a)):

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

where

U_c is the voltage criterion, in microvolts (μV);

L is the voltage tap separation, in metres (m);

E_c is the electric field criterion, in microvolts/metre ($\mu\text{V/m}$).

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, in microvolts, amperes and micro-ohms $\times$ metres, respectively, to the intersecting point of a straight line with the $U-I$ curve as shown in Figures 1b) and 2b), L is the voltage tap separation, in metres, and S is the total 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 positive 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 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.

11 Test report

11.1 Identification of test specimen

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

- name of the manufacturer of the specimen;
- classification and/or symbol;
- lot number;
- raw materials and their chemical composition;
- shape and area of the cross-section of the wire, number of filaments, diameter of filaments, volume fractions of filaments, copper/non-copper ratio, barriers, copper stabilizer and other components in the wire, twist pitch and twist direction;
- manufacturing process technique (bronze, internal tin diffusion process, etc).

11.2 Report of I_c values

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

11.3 Compte rendu des conditions d'essai

Les conditions d'essai suivantes doivent être mentionnées:

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-2:2006

11.3 Report of test conditions

The following test conditions shall be reported:

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-2:2006

Annexe A (informative)

Informations supplémentaires relatives aux Articles 1 à 10

A.1 Généralités

Un grand nombre de variables ayant un effet significatif sur la valeur mesurée du courant critique a besoin d'être porté à l'attention de l'utilisateur. La présente annexe informative en aborde plusieurs (voir aussi l'Annexe B).

La méthode décrite dans la présente norme n'est pas applicable aux fils dont le rapport cuivre/non-cuivre (c'est-à-dire le rapport de volume du stabilisateur de Cu sur tous les autres composants du fil y compris les filaments Nb₃Sn et les barrières de diffusion) est inférieur à 0,2 car il n'est pas exclu que les caractéristiques tension-courant ($U-I$) observées soient instables avec des champs magnétiques bas.

Cette norme ayant été rédigée à l'origine aux milieux des années 1990 afin d'inclure une large gamme de paramètres de fils, les nouveaux fils Nb₃Sn haute performance, qui ont été développés au début des années 2000, entrent dans ce domaine d'application. Cependant, la conception des fils avec des combinaisons particulières de paramètres (faible teneur en cuivre à sans cuivre, haute densité de courant non-Cu, diamètre du filament effectif élevé, grands diamètres de fils) qui tendent toutes à augmenter I_c et diminuer la stabilité, n'avait pas été anticipée. Ce sujet a été débattu en détail par le responsable du groupe de travail et le consensus général est que cette norme est toujours valable pour son domaine d'application et une exigence clé est la caractéristique de répétition de I_c et de stabilité de $U-I$ listées à l'Article 8. L'utilisateur qui éprouve ces fils Nb₃Sn de haute performance a besoin de surveiller et vérifier la résistance de contact du courant et les dommages au spécimen près de la transition du contact du courant au mandrin de mesure de façon à répondre à cette exigence de répétabilité et de stabilité.

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.

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

A.2 Exigences

Dans la présente méthode d'essai, on prépare à la fois un mandrin de réaction et un mandrin de mesure. Le spécimen enroulé autour du mandrin de réaction subit un traitement thermique de réaction à une température proche de 700 °C pour former du Nb₃Sn. Après réaction, il est transféré sur un mandrin de mesure. Pour éviter toute déformation du spécimen, il est recommandé que chaque mandrin soit du même diamètre et ait le même sillon en spirale.

Généralement, la limite supérieure du champ magnétique d'essai (0,7 fois le champ magnétique critique le plus élevé) est 17 T à une température proche de 4,2 K.

Annex A (informative)

Additional information relating to Clauses 1 to 10

A.1 General

There is a large number of variables that have a significant effect on the measured value of critical current which needs to be brought to the attention of the user. Some of these are addressed in this informative annex (see also Annex B).

The method described in this standard is not applicable to wires with a copper/non-copper ratio (i.e. a volume ratio of Cu stabilizer to all other components of wire including Nb₃Sn filaments and diffusion barriers) that is smaller than 0,2 because the observed voltage-current (*U-I*) characteristics may not be stable at low magnetic fields.

Because this standard was originally written in the mid-1990's to be inclusive of a wide range of wire parameters, the new high-performance Nb₃Sn wires, which were developed in the early 2000's, fall within this scope. However, it was not anticipated that wires would be designed with the particular combination of wire parameters (low Cu to non-Cu ratio, high non-Cu current density, high effective filament diameter, and large wire diameters) that all tend to increase I_c and decrease stability. This topic has been discussed in detail by the responsible working group and the general consensus is that this standard is still valid for its Scope and a key requirement is the repeatable I_c and stable *U-I* characteristic listed in Clause 8. The user that is testing these high-performance Nb₃Sn wires needs to monitor and control the current-contact resistance and specimen damage near the transition from current contact to measurement mandrel in order to meet this repeatability and stability requirement.

This standard requires that the specimen 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.

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

A.2 Requirements

In this test method, both a reaction and a measurement mandrel are prepared. The specimen wound on a reaction mandrel is reaction-heat-treated at a temperature in the region of 700 °C to form Nb₃Sn. After reaction, it is transferred to a measurement mandrel. To avoid deformation of the specimen, each mandrel should be of the same diameter and have the same helical groove on it.

Typically, the upper limit of the test magnetic field (0,7 times the upper critical magnetic field) is 17 T at a temperature near 4,2 K.

La longueur totale minimale du spécimen est 430 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 (2×100 mm);
- distance minimale séparant les prises de tension (150 mm).

La précision 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 (première et deuxième comparaisons croisées VAMAS et une comparaison nationale japonaise) ont été utilisés dans la présente méthode d'essai pour formuler les tolérances des nombreuses variables qui affectent la précision des mesures du courant critique. La précision recherchée, pour une comparaison croisée entre laboratoires, est un coefficient de variation (écart type divisé par la moyenne de la détermination du courant critique) inférieur à 3 % pour la mesure à 12 T et proche de 4,2 K.

Le coefficient de variation fournit des informations supplémentaires concernant la distribution attendue des résultats à partir d'un grand nombre de déterminations. Cependant, s'il existe des erreurs systématiques importantes, il n'est pas exclu que les mesurages de deux laboratoires diffèrent de deux fois ou plus le coefficient de variation.

La précision recherchée et acceptée des mesurages du courant critique à 4,2 K et des champs magnétiques supérieurs à 12 T aura un coefficient de variation supérieur, en raison de la sensibilité accrue de I_c au champ magnétique, à la température, à la déformation et à la sensibilité de la tension requise. Elle atteindra un coefficient de variation de 5 % avec un champ magnétique de 0,7 fois le champ critique supérieur (environ 17 T à 4,2 K).

Il est vraisemblable que la précision du champ magnétique dans la présente méthode d'essai soit le facteur le plus déterminant du manque de précision globale du mesurage du courant critique. Cependant, il n'est pas exclu qu'une tolérance plus restrictive ne puisse pas être obtenue en raison de la difficulté d'étalonnage de ce paramètre.

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 diminution de précision.

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

Il est vraisemblable que les mesurages sur les matériaux de mandrin qui déforment l'échantillon de Nb_3Sn autrement que par déformation externe quasi nulle (déformation intrinsèque) donnent des résultats de courant critique cohérents. Cependant, ces résultats seront différents des résultats pour la déformation externe quasi nulle. Par exemple, les mandrins de mesurage Ti-6Al-4V (alliage titane contenant 6 % pondéral Al et 4 % pondéral V) produisent généralement des courants critiques dans un état de tension légère parce que la contraction thermique du mandrin Ti-6Al-4V est inférieure à celle du spécimen. Cependant, les résultats se sont avérés très homogènes dans les comparaisons internationales croisées entre laboratoires. Les mandrins en acier inoxydable ont également donné des résultats très homogènes dans les VAMAS [3] et dans les comparaisons entre laboratoires [4].

Cependant, les mandrins en acier inoxydable nécessitent des techniques sophistiquées pour la conception du mandrin en ce qui concerne l'épaisseur, l'enroulage serré du spécimen et sa fixation dans la mesure où la contraction thermique de l'acier inoxydable est presque atteinte, ou même un peu supérieure à celle du spécimen. C'est pourquoi le choix de tels matériaux de mandrin est considéré comme une pratique acceptable.

The minimum total length of the specimen is 430 mm, which represents the sum of the following:

- the soldered length of current contacts (2×40 mm);
- the distance between current and voltage contacts (2×100 mm);
- the minimum voltage tap separation (150 mm).

The target precision of the method described in this standard is defined by the results of an interlaboratory comparison. Results from previous interlaboratory comparisons (the first and second VAMAS intercomparisons and a Japanese domestic intercomparison) were used in this test method to formulate the tolerances of the many variables that affect the precision of critical current measurements. The target precision, for an interlaboratory comparison, is a coefficient of variation (standard deviation divided by the average of critical current determination) that is less than 3 % for the measurement at 12 T and near 4,2 K.

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 precision of critical current measurements at 4,2 K and magnetic fields larger than 12 T 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 will reach a coefficient of variation of 5 % at the magnetic field of 0,7 times the upper critical field (around 17 T at 4,2 K).

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

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 reduction in precision.

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 precision.

Measurements on mandrel materials which put the Nb₃Sn sample in a certain strain state, other than near zero external strain (the intrinsic strain state), are expected to produce consistent critical current results. However, these results will deviate from the results in near zero external strain state. For example, Ti-6Al-4V (titanium alloy containing 6 mass% Al and 4 mass% V) measurement mandrels generally produce critical currents in a slightly tensional state because the thermal contraction of Ti-6Al-4V mandrel is less than that of the specimen. However, the results have been confirmed to be very consistent in international interlaboratory comparisons. Stainless steel mandrels have also produced very consistent results in VAMAS [3] and interlaboratory comparisons [4].

However, stainless steel mandrels require skilful techniques for mandrel design of the wall thickness, tight winding of specimen, and specimen bonding since the thermal contraction of stainless steel is closely matched, or even slightly greater than that of the specimen. Thus, the selection of such mandrel materials is considered an acceptable practice.

Les mesurages sur des spécimens courts et droits constituent des pratiques acceptables dans des mesurages individuels de série si la surface de section du spécimen est petite comparée à sa longueur. Cependant, par souci de simplicité, la 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 précision semblable à la précision recherchée par la présente méthode. Cependant, par souci de simplicité, la 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 mesure sur une partie de la longueur du spécimen et la graisse ne suffit pas pour empêcher le spécimen de bouger.

Les mesurages effectués sur un mandrin non ferromagnétique en acier inoxydable avec utilisation de 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.

Les conducteurs rectangulaires pourraient être mesurés en utilisant la présente méthode. Dans ce cas, les mandrins sans sillons peuvent être préférables à la fois pour le traitement thermique de réaction et pour le mesurage si le spécimen est transféré sur le mandrin de mesure après réaction. Si le spécimen ne nécessite pas de transfert, les mandrins avec sillon rectangulaire au lieu du sillon en forme de V peuvent être appropriés. Dans les deux cas, il est recommandé d'utiliser une résine époxyde pour fixer le spécimen au mandrin de mesure.

La méthode d'essai pour la détermination des valeurs de I_c des fils supraconducteurs composites qui sont exclus de la présente méthode d'essai pourra être traitée dans de futures normes.

A.3 Appareillage

A.3.1 Matériau du mandrin de réaction

Pour le mandrin de réaction, il est recommandé d'utiliser les matériaux indiqués ci-dessous. Cependant, d'autres matériaux peuvent être utilisés dans la mesure où ils résistent à la fixation par diffusion avec le spécimen pendant le traitement thermique de réaction. Cependant, il est souhaitable que le coefficient d'expansion thermique du matériau soit proche de celui du fil spécimen.

- Céramique et graphite:
 - graphite;
 - alumine;
 - zircone.
- Alliage avec traitement de surface:
 - acier inoxydable avec couche en céramique (ou carbone);
 - acier inoxydable fortement oxydé en surface;
 - Ti-6Al-4V avec couche en céramique (ou carbone), ou Ti-5Al-2,5Sn (alliage titane contenant 5 % pondéral Al et 2,5 % pondéral Sn).

A.3.2 Construction du mandrin de réaction

Par exemple, une déformation de flexion de 5 % pour un spécimen de 1 mm de diamètre correspond à un diamètre du mandrin de réaction de 20 mm.

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 a precision similar to the target precision 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 length, and grease 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.

Rectangular cross-sectional conductors could be measured using the present method. In this case, mandrels without grooves may be preferable for both reaction heat treatment and measurement if the specimen is transferred to the measurement mandrel after reaction. If the specimen does not require transfer, mandrels with a rectangular groove instead of a V-shaped groove may be appropriate. In either case, it is recommended to use epoxy to secure the specimen to the measurement mandrel.

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

A.3 Apparatus

A.3.1 Reaction mandrel material

The following materials are recommended for reaction mandrel material. There is no restriction on using other materials as long as they resist diffusion bonding with the specimen during the reaction heat treatment. It is, however, desirable that the thermal expansion coefficient of the material is close to that of specimen wire.

- Ceramics and graphite:
 - graphite;
 - alumina;
 - zirconia.
- Alloy with surface treatment:
 - ceramic (or carbon) coated stainless steel;
 - heavily surface oxidized stainless steel;
 - ceramic (or carbon) coated Ti-6Al-4V or Ti-5Al-2,5Sn (titanium alloy containing 5 mass% Al and 2,5 mass% Sn).

A.3.2 Reaction mandrel construction

For example, a 5 % bending strain for a 1 mm diameter specimen corresponds to a reaction mandrel diameter of 20 mm.

Le sillon du mandrin de réaction est de préférence en forme de V. Les mandrins à sillon rectangulaire ou sans sillon peuvent être utilisés avec précaution. Lorsqu'on utilise des mandrins de réaction sans sillons, il est recommandé de co-enrouler le spécimen avec un isolant électrique pour obtenir un pas uniforme qui s'adaptera au pas du mandrin de mesure.

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

A.3.3 Matériaux du mandrin de mesure

Dans la présente méthode, la déformation du spécimen est contrôlée pour rester à un niveau minimal (inférieur à 0,03 %). Une contraction thermique de 0,03 % peut donner lieu à une variation de I_c d'environ 2 % à 12 T et proche de 4,2 K. Une des sources déterminantes de déformation est la différence entre les taux de contraction thermique du mandrin de mesure et du spécimen lorsqu'ils sont refroidis à la température de l'hélium liquide. Bien qu'elle dépende des fractions de volume des composants de la section, une contraction thermique typique d'un supraconducteur composite Nb_3Sn est de 0,25 % à 0,30 % de la température ambiante à 4,2 K.

Si la contraction thermique du mandrin de mesure est inférieure à celle du spécimen, le spécimen sera sous tension lorsqu'on le refroidit. La tension sera réduite par la distance d'isolement résiduelle entre le spécimen et le mandrin. Dans ce cas, il est noté que le jeu de l'enroulement peut être partiellement repris pendant le refroidissement. Par ailleurs, si la contraction thermique du mandrin de mesure est supérieure à celle du spécimen, la distance d'isolement du spécimen sera augmentée en plus de la distance d'isolement résiduelle de l'enroulement. C'est pourquoi il convient que la contraction thermique du matériau du mandrin de mesure soit choisie pour réduire la déformation externe du spécimen et pour éliminer la distance d'isolement résiduelle du spécimen à la suite du refroidissement.

Compte tenu des contractions thermiques typiques indiquées au Tableau A.1, les matériaux suivants sont conseillés pour le matériau du mandrin de mesure. Pour les matériaux alternatifs de mandrin, il est recommandé de procéder à une étude de qualification avant les essais individuels de série.

- Matériaux recommandés pour le mandrin de mesure:
 - 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.
- Matériaux alternatifs pour le mandrin de mesure:
 - acier inoxydable non ferromagnétique tel que SUS 316L avec ou sans couche isolante;
 - Ti-6Al-4V avec ou sans couche isolante, avec la condition que ce matériau est supraconducteur à 4,2 K pour des champs magnétiques inférieurs à 2 T;
 - Ti-5Al-2,5Sn avec ou sans couche isolante, avec la condition que ce matériau est supraconducteur à des températures inférieures à 3,7 K pour des champs magnétiques inférieurs à 2 T.
- Autre matériau pour le mandrin de mesure:
 - alliage de cuivre non ferromagnétique recouvert d'une couche isolante;
 - époxyde céramique en dispersion;
 - céramique d'alumine.

The groove on the reaction mandrel is preferably V-shaped. Mandrels with a rectangular groove or without groove can be used with caution. When reaction mandrels are used without grooves, the specimen should be co-wound with a spacer to form a uniform pitch that will fit closely with the pitch of the measurement mandrel.

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

A.3.3 Measurement mandrel material

In this method, the specimen strain is controlled to be minimum (less than 0,03 %). A 0,03 % thermal contraction may result in I_c deviation of around 2 % at 12 T and near 4,2 K. One significant source of strain is the mismatch in thermal contraction rates between the measurement mandrel and the specimen when cooled to liquid helium temperature. Although depending on volume fractions of the components in the cross-section, a typical thermal contraction of a Nb₃Sn composite superconductor is 0,25 % to 0,30 % from room temperature to 4,2 K.

If the thermal contraction of the measurement mandrel is less than that of the specimen, the specimen will be under tension when cooled. The tension will be reduced by the residual clearance between the specimen and the mandrel. In this case, it is noted that the winding looseness can be partially recovered during cooling. On the other hand, if the thermal contraction of the measurement mandrel is more than that of the specimen, the specimen clearance will increase in addition to the residual clearance of the winding. Therefore, the thermal contraction of the measurement mandrel material should be chosen to minimize the external strain of the specimen and to eliminate the residual clearance of the specimen following cooldown.

Based on the typical thermal contractions shown in Table A.1, the following materials are suggested for the measurement mandrel material. For alternate mandrel materials, a carefully prepared qualification study should precede the routine tests.

- Recommended measurement mandrel 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.
- Alternate measurement mandrel material:
 - non-ferromagnetic stainless steel, such as SUS 316L, with or without an insulating layer;
 - Ti-6Al-4V with or without an insulating layer, with the limitation that this material is superconductive at 4,2 K with magnetic fields below 2 T;
 - Ti-5Al-2,5Sn with or without an insulating layer, with the limitation that this material is superconductive at temperatures below 3,7 K with magnetic fields below 2 T.
- Other measurement mandrel material:
 - non-ferromagnetic copper alloy covered with an insulating layer;
 - ceramic dispersed epoxy;
 - alumina ceramic.

De manière plus spécifique, on recommande un type NEMA (U.S. national electrical manufacturers association) standard G10 en époxyde et fibre de verre découpé dans une souche de plaque. La deuxième série de mesurages VAMAS a été effectuée sur ce type de mandrin dans la mesure où un tube G10 convenablement usiné à partir d'une souche de plaque a une contraction thermique qui ne varie pas de manière significative avec sa géométrie et qui est proche de celle d'un fil spécimen Nb_3Sn .

Les mandrins en acier inoxydable peuvent exiger une conception attentive du mandrin en ce qui concerne l'épaisseur de la paroi et des techniques sophistiquées pour l'enroulage serré du spécimen et sa fixation.

Les mandrins de Ti-6Al-4V produisent en général des courants critiques dans un état de tension légère. Dans le cas d'une distance d'isolement résiduelle plus importante de l'enroulement, les matériaux ayant une contraction thermique inférieure à celle du spécimen, tels que les alliages Ti peuvent être utilisés pour réduire la distance d'isolement résiduelle suivant le refroidissement.

Si le mandrin de réaction et le mandrin de mesure peuvent être constitués du même matériau, alors le même mandrin peut être utilisé à la fois pour la réaction et la mesure. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de transférer le spécimen du mandrin de réaction sur un mandrin de mesure après réaction. Cependant, il est recommandé de prendre des mesures pour que le spécimen ne soit pas fixé au mandrin après traitement thermique de réaction. Cette opération exige un soin extrême comme cela est indiqué en A.4.3. Le matériau et la construction du mandrin et les détails de la préparation du spécimen dans cette méthode à un mandrin sont spécifiés à l'Annexe D.

Le courant de fuite à travers un mandrin conducteur sans couche isolante peut être estimé en effectuant des mesurages dans des conditions d'essai avec et sans spécimen sur le mandrin. Le mesurage de la chute de tension de contact de courant à contact de courant sans spécimen et dans des conditions d'essai peut être utilisé pour estimer la résistance de la ligne de fuite, y compris la résistance de contact. Ensuite, on peut utiliser le mesurage de la chute de tension de contact de courant à contact de courant avec un spécimen et dans des conditions d'essai pour estimer 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 [5]. 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. Cela 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.3.4 Construction du mandrin de mesure

Il convient que la différence de diamètre entre mandrin de réaction et mandrin de mesure soit inférieure à 0,5 %. Une différence de 0,5 % de diamètre introduit une déformation d'échantillon de 0,01 % au plus. Voir également le troisième alinéa de A.4.3.

Si on choisit un tube en composite de fibre de verre et résine époxyde, laminé avec parois fines, il est recommandé que l'épaisseur de paroi du tube soit inférieure à 25 % du rayon du tube pour satisfaire aux critères mentionnés en 6.3.

Il convient que le sillon du mandrin de mesure soit en forme de V. Les mandrins à sillon rectangulaire ou sans sillon peuvent être utilisés, avec une technique de fixation du spécimen utilisant un adhésif à basse température ou une résine époxyde (voir A.4.4).

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

More specifically, a NEMA (US national electrical manufacturers association) standard fibreglass epoxy, G10 tube cut from a plate stock, is recommended. The second VAMAS measurements were carried out on this type of mandrel, since a G10 tube appropriately machined from a plate stock has a thermal contraction that does not vary significantly with its geometry and is close to that of a Nb₃Sn specimen wire.

Stainless steel mandrels may require careful mandrel design considering wall thickness and skillful techniques for specimen tightening and bonding.

Mandrels of Ti-6Al-4V usually produce critical currents in a slight tensional state. In the case of rather large residual clearance of winding, materials such as Ti alloys having smaller thermal contraction than that of the specimen may be used to minimize the residual clearance following cool down.

If the reaction mandrel and the measurement mandrel can be of the same material, then the same mandrel can be used for both reaction and measurement. In this case, it is not necessary to transfer the specimen from a reaction mandrel to a measurement mandrel after reaction. However, steps should be taken to ensure that the specimen is not bonded to the mandrel after reaction heat treatment. This operation requires the extreme care mentioned in A.4.3. The material and construction of the mandrel and detail of specimen preparation in this one-mandrel method are specified in Annex D.

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, 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 [5]. 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.

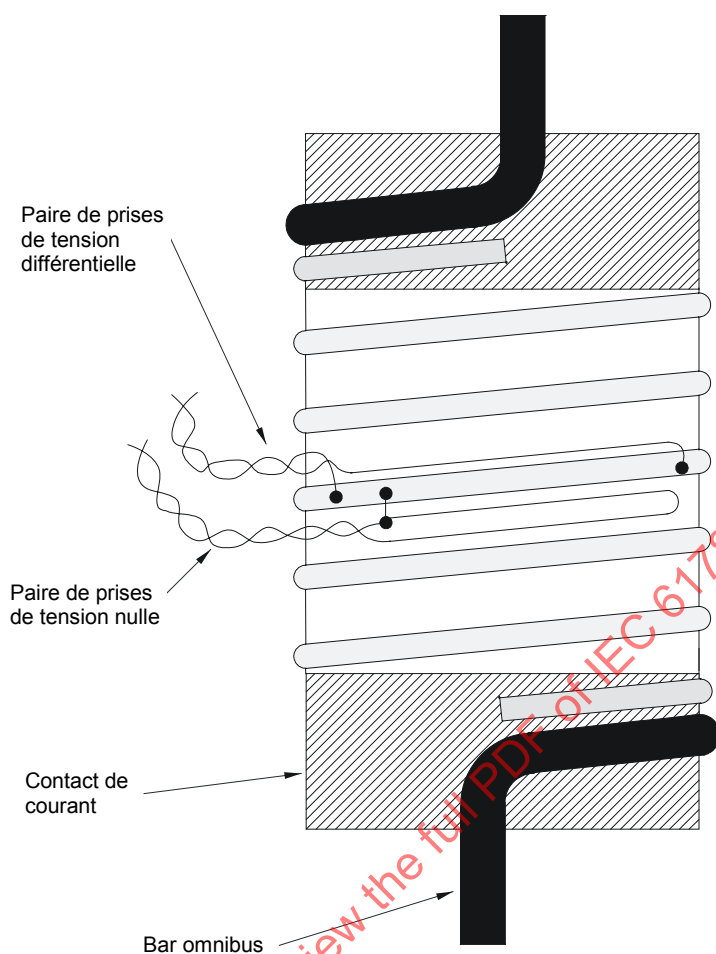
A.3.4 Measurement mandrel construction

The difference in diameter between the reaction and measurement mandrels should be less than 0,5 %. A 0,5 % difference in diameter introduces a sample strain of at most 0,01%. Also see third paragraph of A.4.3.

If a thin walled rolled fibreglass epoxy composite tube is chosen, the wall thickness of the tube should be less than 25 % of tube radius to satisfy the criteria mentioned in 6.3.

The groove on the measurement mandrel should be V-shaped. Mandrels with a rectangular groove or without groove may be used, together with a specimen bonding technique using a low temperature adhesive or epoxy (see A.4.4).

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



IEC 1803/06

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

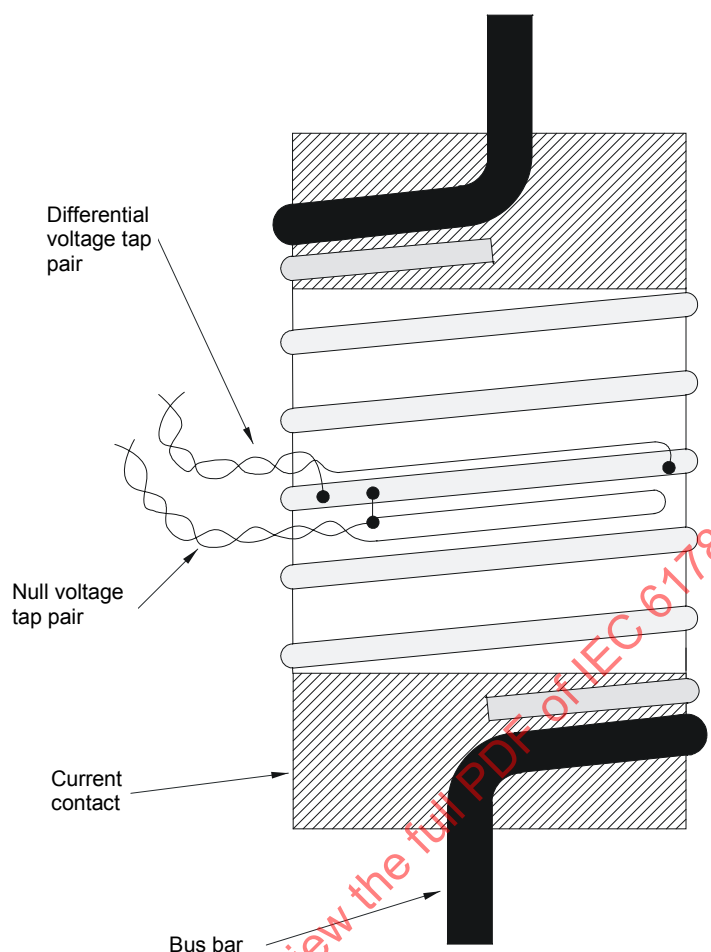
Généralement, un fil supraconducteur à forte capacité est utilisé pour conduire le courant vers le contact de courant, afin de réduire la charge calorifique près des extrémités du spécimen.

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 Montage du spécimen pour le traitement thermique de réaction

La surface 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 précision de 5 % est suffisante pour la détermination de I_c ; cependant, une précision de 1 % est nécessaire pour déterminer la densité de courant critique J_c .



NOTE The null voltage tap pair is used for 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

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 partly 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 mounting for reaction heat treatment

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 precision of 5 % is sufficient for the determination of I_c ; however, a precision of 1 % is needed when a critical current density J_c determination is desired.

Il convient que les matériaux de revêtement tels que la plaque de chrome sur le spécimen soient traités de manière appropriée et soigneuse avant et après le traitement thermique final.

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

Une méthode alternative pour fixer le spécimen sur le mandrin consiste à utiliser des vis à la place des trous, une à chaque extrémité du mandrin.

Il est permis que les extrémités d'un fil spécimen obtenu avec le procédé par étain interne soient scellées selon les recommandations du fabricant afin d'éviter de perdre de l'étain lorsqu'on élève la température du conducteur au-delà du point de fusion de l'étain au début du traitement thermique de réaction. Les extrémités doivent être étendues jusqu'à un point situé à l'extérieur de la région chauffée du four. Sinon, elles peuvent être scellées par soudage par un opérateur spécialement formé.

Généralement, un spécimen est nettoyé en l'essuyant avec un solvant organique comme l'éthanol ou l'acétone.

A.4.2 Traitement thermique de réaction

En l'absence de spécification du fabricant pour les variations de température avec durée et emplacement dans la partie utile du four, on recommande $\pm 5^\circ\text{C}$.

Sauf spécification contraire, il est recommandé de faire réagir le spécimen soit sous vide sous environ 10^{-3} Pa (10^{-5} Torr) soit en atmosphère de gaz inerte très pure à environ 10^5 Pa (760 Torr).

A.4.3 Montage du spécimen pour le mesurage

Une attention particulière doit être accordée au transfert du spécimen du sillon hélicoïdal du mandrin de réaction au sillon hélicoïdal du mandrin de mesurage de manière à ne pas endommager le spécimen par déformation de flexion.

En cas de fixation par diffusion du spécimen sur le mandrin de réaction, une très forte augmentation du risque d'endommagement du spécimen est possible pendant son transfert. C'est pourquoi il convient de vérifier si le spécimen est adapté à la fixation par diffusion sur le mandrin avant d'essayer de le transférer du mandrin de réaction. S'il y a une quantité significative de soudure pouvant endommager le spécimen, il est recommandé de le mettre au rebut.

Le spécimen peut être dévissé du mandrin de réaction en le serrant légèrement et en faisant tourner le mandrin à l'intérieur de celui-ci. Cela provoque un détachement du diamètre de l'enroulement du mandrin, réduisant ainsi toute friction. Il est très important que la déformation introduite pendant cette opération soit maintenue à un niveau inférieur à environ 0,1 %. Cela signifie que si ΔD correspond à l'accroissement du diamètre de l'enroulement, D , et d est le diamètre du fil

$$\Delta D < 0,001 (D^2/d) \quad (\text{A.1})$$

Par exemple, si $d = 1$ mm et $D = 40$ mm, il faut que ΔD soit inférieur à environ 1,6 mm. Un opérateur bien formé peut effectuer cette opération manuellement. Après retrait du spécimen, il est immédiatement vissé de la même façon sur le mandrin de mesurage.

L'opération consistant à transférer le spécimen du mandrin de réaction au mandrin de mesurage peut être accomplie de façon simultanée afin de diminuer d'éventuels dommages au spécimen. Cela peut être réalisé en fixant les deux mandrins bout à bout avec deux sillons hélicoïdaux en phase l'un avec l'autre.

Coating materials, such as the chrome plate on the specimen, should be treated appropriately and carefully before and after the final heat treatment.

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

An alternative method for fixing the specimen to the mandrel may be to use screws, instead of holes, one at each end of the mandrel.

The ends of an internal tin processed wire specimen may be sealed following the recommendation of the manufacturer to prevent loss of tin when the conductor temperature is raised above the melting point of tin at the start of the reaction heat treatment. The ends shall be extended to a point outside the heated region of the furnace. Otherwise, they can be weld-sealed by a specially trained operator.

Typically, a specimen is cleaned by wiping with an organic solvent such as ethanol and acetone.

A.4.2 Reaction heat treatment

In the absence of the manufacturer's specification, temperature variations with time and location in the specimen area of furnace are recommended to be both within ± 5 °C.

It is recommended to perform the specimen reaction in either a vacuum atmosphere below approximately 10^{-3} Pa (10^{-5} Torr), or a high-purity inert gas atmosphere at approximately 10^5 Pa (760 Torr), unless otherwise specified.

A.4.3 Specimen mounting for measurement

Extreme care shall be taken in transferring the specimen from the helical groove of the reaction mandrel to the helical groove of the measurement mandrel so as not to damage the specimen due to bending strain.

When diffusion bonding occurs between the specimen and the reaction mandrel, the chance of damaging the specimen during the specimen transfer is greatly increased. Therefore, before attempting to transfer the specimen from the reaction mandrel, it should be checked for diffusion bonding to the mandrel. If there is a significant amount of bonding that might result in specimen damage, the specimen should be discarded.

The specimen can be unscrewed from the reaction mandrel by lightly restraining it and rotating the mandrel within it. This causes the diameter of the winding to expand away from the mandrel, thus reducing any friction. It is extremely important that the strain introduced during this operation is kept below about 0,1 %. This means that if ΔD is the increase in the winding diameter, D , and d is the wire diameter

$$\Delta D < 0,001 (D^2/d) \quad (\text{A.1})$$

For example, if $d = 1$ mm and $D = 40$ mm, ΔD must be less than about 1,6 mm. A careful, skilled operator can perform this operation by hand. Having removed the specimen, it is immediately screwed onto the measurement mandrel in the same way.

The act of transferring the specimen from the reaction mandrel to the measurement mandrel can be performed simultaneously to reduce possible specimen damage. This can be accomplished by clamping the two mandrels together end-to-end with the two helical grooves in phase with each other.

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

A.4.4 Fixation du spécimen

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

Un enroulement serré peut assurer un support approprié au spécimen en fonction de la contraction thermique différentielle entre le spécimen et le mandrin de mesure. Cependant, il est recommandé d'utiliser un adhésif à basse température comme de la graisse silicone au vide ou de la résine époxyde pour fixer solidement le spécimen au mandrin.

Bien qu'un adhésif à basse température puisse permettre de réduire la probabilité d'une trempe, un surplus d'adhésif peut provoquer une transition vers l'état normal en empêchant la circulation calorifique entre le spécimen et le bain d'hélium.

Pour obtenir une fixation solide du spécimen, il est nécessaire que la surface du mandrin de mesure 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 les matériaux de mandrin de mesure.

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

A.5 Procédure de mesure

La structure de support du spécimen est nécessaire pour maintenir le spécimen au centre de l'aimant de fond dans le cryostat d'hélium liquide et pour 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.

La vitesse de refroidissement du spécimen peut affecter le courant critique mesuré. Si de la graisse est utilisée comme matériau de fixation, il n'y a pratiquement pas de résistance mécanique sauf en cas de refroidissement à une température inférieure à la température de congélation du matériau. C'est pourquoi la résistance de la fixation entre le spécimen et son mandrin se modifie pendant le processus de refroidissement lorsque la contraction thermique différentielle entre le spécimen et le mandrin se produit également. Il n'est pas exclu d'obtenir différents états mécaniques pour un spécimen refroidi à des vitesses différentes.

Un circuit de protection à basculement ou un shunt résistif peut être utilisé si cela est nécessaire pour protéger le spécimen des dommages causés par le courant du spécimen au cas où le spécimen entrerait dans l'état normal.

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.

A.4.4 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.

A tight winding can provide adequate specimen support depending on the differential thermal contraction between the specimen and the measurement mandrel. However, it is recommended to use a low temperature adhesive such as silicone vacuum grease or epoxy to secure the specimen to the 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.

A.5 Measurement procedure

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 and provide an isothermal environment for all room temperature joints or connections. It should be noted that the joints or connections immersed in liquid helium are isothermal.

The specimen cooling rate may affect the measured critical current. The grease bonding material, if used, has virtually no mechanical strength until it is cooled below its freezing temperature. Consequently, the strength of the bond between the specimen and its mandrel changes during the cooling process, when differential thermal contraction between the specimen and the mandrel is also occurring. This may result in different mechanical states for specimen cooled at different rates.

A quench protection circuit, or a resistive shunt can be used if it is necessary to protect the specimen from damage caused by the specimen current in the event that the specimen enters the normal state.

Dans la méthode à vitesse de balayage constante, la limitation du temps à 10 s pour la variation du courant zéro à I_c est due à 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 basculement du spécimen, et lorsque le champ environnant a été récemment modifié [6]. Ces tensions inductives variables peuvent se révéler être des tensions de transfert du courant et limiter la validité des mesures données en 9.1. Cet effet sur les mesures peut être diminué en élevant d'abord le cycle du courant à I_c et en revenant à zéro après tout changement dans le champ magnétique appliqué ou après basculement du spécimen.

Dans la méthode de variation et maintien, comparée à la méthode à vitesse de balayage constante, une vitesse de variation plus rapide est autorisée entre chaque signal de consigne dans ce cas. Cependant, une courte pause est nécessaire entre 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 basculement du spécimen, et lorsque le champ environnant a été récemment modifié. 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 basculement du spécimen.

Si le bruit du système est important en comparaison de la valeur prescrite de la tension, il est souhaitable d'augmenter le temps de variation de 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 au mesurage. 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 $U-I$.

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 elles ou 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 fixation et la stabilité du spécimen ou 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 de transition vers l'état normal du spécimen. Des modifications peuvent également permettre d'améliorer la fixation et 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 la tension de base est importante en comparaison de U_c , il convient d'apporter des corrections à la configuration expérimentale.

In the constant sweep rate method, the time limitation of 10 s for the ramp from zero current to I_c is 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 [6]. These variable inductive voltages can appear to be current transfer voltages and can limit the validity of the measurement in 9.1. 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.

In the ramp-and-hold method, compared to the constant sweep rate method, 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. 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 to I_c to be 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 ramp-and-hold method allows for averaging data which can be appropriately distributed along the U - I characteristic.

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 ramp-and-hold 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 bonding and support, or use the ramp-and-hold 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 bonding and 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.

Des variations de tensions de boucle 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 limite de transfert de courant. 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 la 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 Justesse et précision de la méthode d'essai

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. produisent des erreurs détectables et systématiques, mais il est peu vraisemblable que cette dépendance soit importante en comparaison de la précision 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 C pour de plus amples informations sur l'effet de champ induit.

Il n'est pas exclu qu'un circuit de basculement de protection, 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.

Une méthode facultative permettant d'estimer la précision du mesurage du courant critique par un laboratoire consiste à obtenir puis à mesurer le matériau de référence standard.

NOTE Le matériau Cu/Nb-Ti de référence standard, SRM-1457 est disponible auprès de

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

Telephone: +1-(301) 975-6776

Fax: +1-(301) 948-3730

srminfo@nist.gov

<http://www.nist.gov/srm>

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 matériau ainsi désigné.

Il y a des difficultés techniques supplémentaires dans les mesures de courant critique sur les fils Nb₃Sn en raison de la très haute sensibilité à la déformation mécanique, en comparaison avec les fils Nb-Ti. Il est recommandé d'évaluer la précision et l'exactitude globale d'une méthode propre à un laboratoire par un essai dans plusieurs laboratoires.

A.7 Calcul des résultats

A.7.1 Critères de courant critique

Pour certaines applications, la surface de section non-Cu est prise comme critère de résistivité. Pour les fils stabilisés de manière externe, cette surface est généralement déterminée par un mesurage du rapport Cu/non-Cu en utilisant la méthode de pesage, d'attaque et de pesage. Sinon, elle peut être déterminée en utilisant une méthode d'analyse graphique.

Variation 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 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 Precision and accuracy of the test method

The size and complex dependence of the self-field effect on current, coil diameter, pitch, etc. may result in a detectable systematic error, but is not expected to be significant compared to the target precision 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 C 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.

An optional method for assessing the precision of a laboratory's critical current measurement system is to obtain and measure the standard reference material.

NOTE The Cu/Nb-Ti standard reference material SRM-1457 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: +1-(301) 975-6776

Fax: +1-(301) 948-3730

srminfo@nist.gov

<http://www.nist.gov/srm>

This information is given for the convenience of users of this document and does not constitute an endorsement by IEC of this material.

There are additional technical difficulties in the critical current measurements on Nb₃Sn wires due to the high sensitivity to mechanical strain, as compared to that of Nb-Ti wires. It is recommended to evaluate the overall precision and accuracy of an individual laboratory method by interlaboratory test.

A.7 Calculation of results

A.7.1 Critical current criteria

For some applications, the non-Cu cross-sectional area is used in the resistivity criterion. For the externally-stabilized wires, this area is usually determined by a measurement of the Cu to non-Cu ratio using the weighing, etching and weighing method. Otherwise, it can be determined by using a graphical analyzing method.

En cas d'adoption du critère de $10^{-14} \Omega\text{m}$, 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 $U-I$ par l'équation empirique à loi en puissance:

$$U = U_0(I/I_0)^n \quad (\text{A.2})$$

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 unités) reflètent la forme générale de la courbe $U-I$.

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 $E_c = 10 \mu\text{V/m}$, et il est donc nécessaire de mentionner la portée des critères utilisés pour déterminer n . En règle générale, cette portée est $10 \mu\text{V/m}$ à $100 \mu\text{V/m}$ ou $10^{-14} \Omega\text{m}$ à $10^{-13} \Omega\text{m}$.

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

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

- bruit de tension;
- ondulation du courant;
- refroidissement du spécimen (quantité d'adhésif utilisé);
- ondulation et uniformité du champ magnétique;
- champ induit du courant du spécimen;
- gradient thermique du spécimen.

When the criteria 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 *U-I* characteristic can usually be approximated by the empirical power-law equation:

$$U = U_0(I/I_0)^n \quad (\text{A.2})$$

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 *U-I* curve.

A plot of $\log U$ versus $\log I$ is not always linear, even in the current range near the critical current criterion $E_c = 10 \mu\text{V/m}$, 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.

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);
- magnetic field ripple and uniformity;
- the self-field of the specimen current;
- a thermal gradient on the specimen.

Tableau A.1 – Données concernant la contraction thermique des supraconducteurs Nb₃Sn et matériaux choisis (voir NOTE)

Contraction thermique %								
Matériau	Température							
	K							
	273	200	150	100	50	20	10	4
Nb ₃ Sn ^a	0	-0,055	-0,08	-0,115	-0,135	-0,15	-0,15	
Nb ₃ Sn ^b	0	-0,05	-0,08	-0,11	-0,13	-0,15	-0,15	
Fil composite Nb ₃ Sn ^a	0	-0,12	-0,17	-0,23	-0,26	-0,27	-0,27	
Cuivre recuit OFHC ^c	0	-0,118	-0,18	-0,252	-0,288	-0,295	-0,295	
G10, déformé ^d	0	-0,09	-0,13	-0,175	-0,205	-0,215	-0,220	-0,225
G10, normal ^d	0	-0,28	-0,428	-0,54	-0,62	-0,64	-0,65	-0,655
Acier inoxydable AISI SUS316 ^c	0	-0,111	-0,173	-0,23	-0,262	-0,265	-0,265	-0,265
Acier inoxydable AISI SUS304 ^c	0	-0,11	-0,172	-0,23	-0,261	-0,264	-0,264	-0,264
Alliage Ti-6Al-4V ^c	0	-0,062	-0,10	-0,132	-0,15	-0,152		
Alliage Ti-5Al-2,5Sn ^c	0	-0,061	-0,096	-0,128	-0,147	-0,152	-0,152	-0,153
Alliage Cu-5Sn ^c	0	-0,118	-0,182	-0,252	-0,291	-0,297	-0,297	-0,297
Alliage Cu-13,5Sn ^a	0	-0,12	-0,22	-0,28	-0,32	-0,33	-0,33	

NOTE Les valeurs de référence sont zéro à 273 K.

^a A.G. A.G. Rupp, *Filamentary A15 Superconductors*, edited by M. Suenaga and A.F. Clark, Plenum Press, NY (1980) 155.

^b J.W. Ekin, *et al.* Technical report, NBSIR 86-3044, NBS (1986).

^c *Handbook on Materials for Superconducting Machinery*, NBS (1974, 1976).

^d A.F. Clark, *et al.* IEEE Trans. on Magnetism, MAG-17 (1981) 2316.

Table A.1 – Thermal contraction data of Nb₃Sn superconductor and selected materials
(see NOTE)

Thermal contraction %								
Material	Temperature K							
	273	200	150	100	50	20	10	4
Nb ₃ Sn ^a	0	-0,055	-0,08	-0,115	-0,135	-0,15	-0,15	
Nb ₃ Sn ^b	0	-0,05	-0,08	-0,11	-0,13	-0,15	-0,15	
Nb ₃ Sn composite wire ^a	0	-0,12	-0,17	-0,23	-0,26	-0,27	-0,27	
OFHC copper annealed ^c	0	-0,118	-0,18	-0,252	-0,288	-0,295	-0,295	
G10, warp ^d	0	-0,09	-0,13	-0,175	-0,205	-0,215	-0,220	-0,225
G10, normal ^d	0	-0,28	-0,428	-0,54	-0,62	-0,64	-0,65	-0,655
Stainless steel AISI SUS316 ^c	0	-0,111	-0,173	-0,23	-0,262	-0,265	-0,265	-0,265
Stainless steel AISI SUS304 ^c	0	-0,11	-0,172	-0,23	-0,261	-0,264	-0,264	-0,264
Ti-6Al-4V alloy ^c	0	-0,062	-0,10	-0,132	-0,15	-0,152		
Ti-5Al-2,5Sn alloy ^c	0	-0,061	-0,096	-0,128	-0,147	-0,152	-0,152	-0,153
Cu-5Sn alloy ^c	0	-0,118	-0,182	-0,252	-0,291	-0,297	-0,297	-0,297
Cu-13,5Sn alloy ^a	0	-0,12	-0,22	-0,28	-0,32	-0,33	-0,33	

NOTE The values are referred to zero at 273 K.

^a A.G. Rupp, *Filamentary A15 Superconductors*, edited by M. Suenaga and A.F. Clark, Plenum Press, NY (1980) 155.

^b J.W. Ekin, *et al.* Technical report, NBSIR 86-3044, NBS (1986).

^c *Handbook on Materials for Superconducting Machinery*, NBS (1974, 1976).

^d A.F. Clark, *et al.* IEEE Trans. on Magnetics, MAG-17 (1981) 2316.

Annexe B (informative)

Effet de déformation des conducteurs Nb₃Sn

Les supraconducteurs Nb₃Sn sont extrêmement fragiles et leurs propriétés électriques peuvent être modifiées de manière irréversible par des contraintes mécaniques relativement faibles. La sensibilité à la contrainte mécanique du courant critique I_c des supraconducteurs composites Nb₃Sn est parfaitement connue. La Figure B.1 présente la variabilité typique de I_c avec la déformation uniaxiale pour un composite en Nb₃Sn. Outre la déformation uniaxiale, le I_c des composites en Nb₃Sn est également sensible à la flexion, aux torsades et aux déformations transversales.

Un supraconducteur composite Nb₃Sn multifilamentaire typique contient des filaments Nb₃Sn noyés dans une matrice en bronze entourée d'une barrière de diffusion et d'un stabilisateur Cu. Les filaments ont des propriétés de contraction thermique différentes de celles des autres composants composites. Ainsi, il y a prédéformation lorsque le supraconducteur composite subit un traitement thermique et est refroidi.

La prédéformation ou «déformation intrinsèque» d'un supraconducteur composite Nb₃Sn dans sa condition «naturelle» à 4,2 K dépend de la quantité et de la distribution des composants non supraconducteurs, en particulier Cu et matériau de barrière, dans la section. Dans ce contexte, «naturelle» signifie qu'aucune déformation externe n'est appliquée au conducteur d'essai. Les mesurages du courant critique effectués lorsque le conducteur est dans sa condition «naturelle» fournissent un mesurage utile des performances intrinsèques du conducteur.

Il est souhaitable de réduire la contraction différentielle entre le mandrin de mesurage et le conducteur (et de réduire ainsi la déformation extrinsèque) pour obtenir des données I_c proches de celles du conducteur dans sa condition «naturelle». Dans la mesure où les supraconducteurs Nb₃Sn sont très sensibles aux déformations, des résultats variables sont obtenus en fonction de la contraction du mandrin et de la façon dont le conducteur est monté.

En pratique, les conducteurs sont utilisés dans différents types d'enroulements où le niveau de support varie de manière considérable et où les contraintes liées à la force magnétique peuvent être présentes ou non. Par exemple, les conditions dans un aimant dipolaire sont très différentes de celles d'un aimant solénoïdal. C'est pourquoi il faut qu'un concepteur d'aimant ait accès aux données sur la variabilité avec la déformation de I_c de façon à prévoir de manière précise les performances d'un l'aimant spécifique.

Le I_c d'un conducteur dans les conditions de fonctionnement à l'intérieur d'un enroulement et les performances d'un aimant peuvent être estimés en utilisant les éléments suivants: données obtenues d'un conducteur sur le type de mandrin de mesurage utilisé dans cette méthode, estimation de la prédéformation dans le conducteur et données concernant la variabilité avec la déformation de I_c . La prédéformation peut être déterminée soit par mesurage soit par calcul en utilisant la géométrie et les propriétés des composants du conducteur composite. La variabilité avec la déformation est à déterminer dans une installation d'essai en mesure de fournir I_c par rapport aux mesurages de déformation.