

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61788-2

Première édition
First edition
1999-03

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 61788-2:1999

Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications 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.

Validité de la présente publication

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 la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- «Site web» de la CEI*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement
(Catalogue en ligne)*
- **Bulletin de la CEI**
Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (IEV).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. 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.

Validity of this publication

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 the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

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 to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates
(On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

* See web site address on title page.

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC

61788-2

Première édition
First edition
1999-03

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 1999 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 photo-copie 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
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

U

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	6
Articles	
1 Domaine d'application	8
2 Références normatives.....	8
3 Terminologie	10
4 Prescriptions	10
5 Appareillage.....	12
6 Préparation du spécimen.....	14
7 Procédure de mesure	16
8 Justesse et précision de la méthode d'essai	18
9 Calcul des résultats.....	20
10 Compte rendu d'essai.....	22
Annexe A (informative) Informations supplémentaires relatives aux articles 1 à 9.....	26
Annexe B (informative) Effet de déformation des conducteurs Nb ₃ Sn	50
Annexe C (informative) Effet du champ induit.....	54
Figures	
1 Caractéristique V-I intrinsèque	24
2 Caractéristique V-I avec une composante de transfert de courant	24
A.1 Instrumentation du spécimen avec une paire de prises de tension nulle	48
B.1 Variabilité du courant critique avec la déformation uniaxiale (de tension) pour un fil composite Nb ₃ Sn typique représentée avec différents champs magnétiques.....	52

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
INTRODUCTION	7
Clause	
1 Scope	9
2 Normative references	9
3 Terminology	11
4 Requirements	11
5 Apparatus	13
6 Specimen preparation	15
7 Measurement procedure	17
8 Precision and accuracy of the test method	19
9 Calculation of results	21
10 Test report	23
Annex A (informative) Additional information relating to clauses 1 to 9	27
Annex B (informative) Strain effect of Nb ₃ Sn conductors	51
Annex C (informative) Self-field effect	55
Figures	
1 Intrinsic V-I characteristic	25
2 V-I characteristic with a current transfer component	25
A.1 Instrumentation of specimen with a null voltage tap pair	49
B.1 Uniaxial (tensile) strain dependence of critical current for a typical Nb ₃ Sn composite wire shown at various magnetic fields	53

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SUPRACONDUCTIVITÉ –

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

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) 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. 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 intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale 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.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
90/55/FDIS	90/57/RVD

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

Les annexes A, B et C sont données uniquement à titre d'information.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SUPERCONDUCTIVITY –

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

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the 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, the IEC publishes International Standards. 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. The 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 the 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 National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The 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.

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

FDIS	Report on voting
90/55/FDIS	90/57/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.

Annexes A, B and C are for information only.

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) et sur les travaux prénormalifs 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.

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) 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.

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 standards 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 comme le procédé «jelly roll» modifié. Cette méthode est également supposée adaptable à d'autres fils supraconducteurs composites après des modifications appropriées.

2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente Norme internationale. Pour les références datées, les amendements ultérieurs ou les révisions de ces publications ne s'appliquent pas. Toutefois, les parties prenantes aux accords fondés sur la présente Norme internationale sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Pour les références non datées, la dernière édition du document normatif en référence s'applique. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 60050-815:—, *Supraconductivité* ¹⁾

CEI 61788-1:1998, *Supraconductivité – Partie 1: Mesure du courant critique – Courant critique continu des supraconducteurs en composite Cu/Nb-Ti*

¹⁾ A publier.

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 measured 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 that 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, such as the modified jelly-roll process. This method is also expected to apply to other superconducting composite wires after some appropriate modifications.

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. For dated references, subsequent amendments to, or revisions of, any of these publications do not apply. However, parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. For undated references, the latest edition of the normative document referred to applies. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 60050-815:—, *Superconductivity* ¹⁾

IEC 61788-1:1998, *Superconductivity – Part 1: Critical current measurement – DC critical current of Cu/Nb-Ti composite superconductors*

¹⁾ To be published.

3 Terminologie

Pour les besoins de la présente partie de la CEI 61788, les définitions de la CEI 60050-815 s'appliquent, ainsi que la définition suivante:

Le courant critique (I_c) est défini comme le courant pour lequel un critère de champ électrique (E_c) ou un critère de résistivité (ρ_c) spécifique est atteint dans le spécimen considéré pour une valeur donnée du champ magnétique statique appliqué à une température spécifiée dans un bain d'hélium liquide et à pression constante. Pour E_c ou ρ_c , il existe un critère de tension correspondant V_c pour une longueur d'échantillon spécifiée

4 Prescriptions

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

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 mesurage du même diamètre sur lequel l'angle hélicoïdal est conservé.

Le spécimen doit être fixé sur le mandrin de mesurage 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 mesurage.

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 spécifications préventives spécifiques sont données ci-après.

Ces types de mesurages sont susceptibles de présenter des risques. La présence de courants continus élevés et de tensions très basses ne représente pas nécessairement un risque direct pour l'utilisateur, mais des courts-circuits accidentels des fils avec d'autres conducteurs, tels que des outils ou des lignes de transfert, peuvent dégager une énergie importante et produire des arcs ou des brûlures électriques. Il est impératif d'isoler les fils de courant et de les protéger des courts-circuits. L'énergie accumulée dans les aimants supraconducteurs généralement utilisés pour fournir le champ magnétique de fond est également susceptible de produire des courants élevés et/ou des impulsions de tension ou de placer de grandes quantités d'énergie thermique dans les systèmes cryogéniques, ce qui produit une évaporation rapide ou même des conditions explosives. L'utilisation de liquides cryogéniques est indispensable au refroidissement des supraconducteurs pour permettre la transition vers l'état de supraconduction. Le contact direct de la peau avec des conduits de transfert de liquides froids, des Dewars de stockage ou des composants d'appareillage peut provoquer une congélation immédiate, de même que le contact direct avec un cryogène répandu. Il est impératif d'observer des règles de sécurité lors de la manipulation des liquides cryogéniques.

3 Terminology

For the purpose of this part of IEC 61788, the definitions given in IEC 60050-815 and the following apply:

The critical current (I_c) is defined as the current at which a specific electric field strength (electric field) criterion (E_c) or resistivity criterion (ρ_c) is reached in the specimen at a certain value of a static applied magnetic field at a specific temperature in a liquid helium bath at a constant pressure. For either E_c or ρ_c , there is a corresponding voltage criterion V_c for a specified sample length

4 Requirements

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

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.

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.

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. 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.

5 Appareillage

5.1 Matériau du mandrin de réaction

Le mandrin de réaction doit être constitué d'un matériau résistant à la chaleur traité en surface ou non. Des matériaux appropriés pour les mandrins de réaction sont recommandés à l'annexe A. Il est permis d'utiliser n'importe lequel d'entre eux.

5.2 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.

5.3 Matériaux du mandrin de mesurage

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

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

La déformation totale produite dans le spécimen à la température de mesurage 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 pour mandrins de mesurage appropriés sont recommandés à l'annexe A. 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 8.5).

5.4 Construction du mandrin de mesurage

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

Le diamètre du mandrin de mesurage, 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 mesurage 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.

5 Apparatus

5.1 Reaction mandrel material

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

5.2 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.

5.3 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 annex A. 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 8.5).

5.4 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 Préparation du spécimen

6.1 Montage du spécimen pour le traitement thermique de réaction

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

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.

La déformation en flexion maximale, provoquée par le montage du spécimen, ne doit pas être supérieure à 5 %.

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.

6.2 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.

6.3 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 40 mm ou 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.

6 Specimen preparation

6.1 Specimen mounting for reaction heat treatment

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

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 maximum bending strain, induced during the mounting of the specimen, shall not exceed 5 %.

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.

6.2 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.

6.3 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 40 mm, or 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.

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.

6.4 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 6.3).

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 répétitivité du courant critique spécifié.

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

7 Procédure de mesure

Pour effectuer les essais, le spécimen et le mandrin doivent être montés sur un cryostat d'essai composé d'un Dewar d'hélium liquide, d'un aimant et de sa structure de support et d'une structure de support du spécimen.

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.

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, la vitesse de balayage du courant doit être inférieure à $2 I_c/\text{min}$.

Avec la méthode de variation et de maintien de courant, la vitesse de balayage du courant entre les signaux de consigne du courant doit être inférieure à $10 I_c/\text{min}$. 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 $V-I$ du spécimen d'essai dans les conditions de l'essai, ainsi que l'augmentation monotone du courant.

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.

6.4 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 measurement process (see 6.3).

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.

7 Measurement procedure

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

The specimen shall be immersed in liquid helium for the data acquisition phase. The specimen may be cooled slowly in helium vapour, 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 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 current sweep rate shall be lower than 2 I_c /min.

When using the step and hold current method, the current sweep rate between current set points shall be lower than 10 I_c /min. 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 $V-I$ characteristic of the test specimen under test conditions and monotonically increasing current.

Une caractéristique $V-I$ 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 $V-I$ 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.

8 Justesse et précision de la méthode d'essai

8.1 Courant critique

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

La source de courant doit délivrer un courant continu dont les variations périodiques et aléatoires maximales sont inférieures à $\pm 2\%$ 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.

Un enregistreur et les préamplificateurs, filtres ou voltmètres ou une combinaison de ces appareils doit être utilisée pour enregistrer la caractéristique $V-I$. L'enregistrement produit doit permettre de déterminer V_c avec une justesse de 10 % et le courant correspondant avec une précision de 1 % et une justesse de 1 %.

8.2 Température

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. 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.

8.3 Champ magnétique

Un système magnétique doit fournir le champ magnétique avec une précision de 1 % et une justesse de 0,5 % sur la longueur du spécimen entre les prises de tension.

Le champ magnétique doit avoir une uniformité supérieure à $\pm 1\%$ sur la longueur du spécimen entre les prises de tension.

Les variations périodiques et aléatoires maximales du champ magnétique doivent être inférieures à $\pm 1\%$.

A valid V - 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 V - I characteristic shall be taken as the recorded voltage at zero current for the step and hold current method, or the average voltage at approximately 0,1 I_c for the constant sweep rate method.

8 Precision and accuracy of the test method

8.1 Critical current

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

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

A four-terminal standard resistor, with an accuracy of at least 0,5 %, shall be used to determine the specimen current.

A recorder and necessary preamplifiers, filters or voltmeters, or a combination thereof, shall be used to record the V - I characteristic. The resulting record shall allow the determination of V_c to a precision of 10 %, the corresponding current to an accuracy of 1 % and with a precision of 1 %.

8.2 Temperature

A cryostat shall provide the necessary environment for measuring I_c and the specimen shall be measured while immersed in liquid helium. The 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.

8.3 Magnetic field

A magnetic system shall provide the magnetic field to an accuracy of 1 % and a precision of 0,5 % over the length of the specimen between the voltage taps.

The magnetic field shall have a uniformity better than ± 1 % over the length of the specimen between the voltage taps.

The maximum periodic and random deviation of the magnetic field shall be less than ± 1 %.

8.4 Structure de support du spécimen et du mandrin

La structure de support doit assurer un support approprié du spécimen et permettre son orientation par rapport au champ magnétique. Le support du spécimen est approprié s'il permet d'obtenir des déterminations supplémentaires du courant critique avec une justesse de 1 %.

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

8.5 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 circuit doit être inférieur à 0,2 % du courant total en I_c .

9 Calcul des résultats

9.1 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).

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

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

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

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

où

V_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:

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

où V_c , I_c et ρ_c représentent respectivement la tension, le courant et la résistivité correspondants mesurés au point d'intersection d'une ligne droite et de la courbe $V-I$ comme le montre la figure 1, et S représente la superficie de section hors-tout exprimée en mètres carrés (m^2).

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

8.4 Specimen and mandrel 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 %.

The test configuration of the specimen shall be an inductive coil.

8.5 Specimen protection

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

9 Calculation of results

9.1 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).

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

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 V - I curve where the voltage is V_c measured relative to the baseline voltage (see figures 1 and 2):

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

where

V_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:

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

where V_c , I_c and ρ_c are the corresponding voltage, current and resistivity to the intersecting point of a straight line with the V - I curve as shown in figure 1, 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 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 V_c/I_c , where V_c and I_c are determined at criterion of 10 $\mu\text{V/m}$ or $10^{-14} \Omega\text{m}$.

9.2 Valeur n (calcul facultatif, se reporter à A.8.2)

La valeur n doit être calculée comme étant la pente du tracé de $\log V$ 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 9.1 avec deux critères différents.

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

10 Compte rendu d'essai

10.1 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 conducteurs, 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 ou procédé de diffusion interne de l'étain).

10.2 Compte rendu des valeurs I_c

Les valeurs I_c et les critères correspondants doivent être mentionnés.

10.3 Compte rendu des conditions d'essai

Les conditions d'essai suivantes doivent être mentionnées :

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

9.2 n -value (optional calculation, refer to A.8.2)

The n -value shall be calculated as the slope of the plot of $\log V$ versus $\log I$ in the region where the I_c is determined, or shall be calculated using two I_c values as determined in 9.1 at two different criteria.

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

10 Test report

10.1 Identification of test specimen

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

- a) name of the manufacturer of the specimen;
- b) classification and/or symbol;
- c) lot number;
- d) raw materials and their chemical composition;
- e) shape and area of the cross-section of the wire, number of cores, 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;
- f) manufacturing process technique (bronze or internal tin diffusion process).

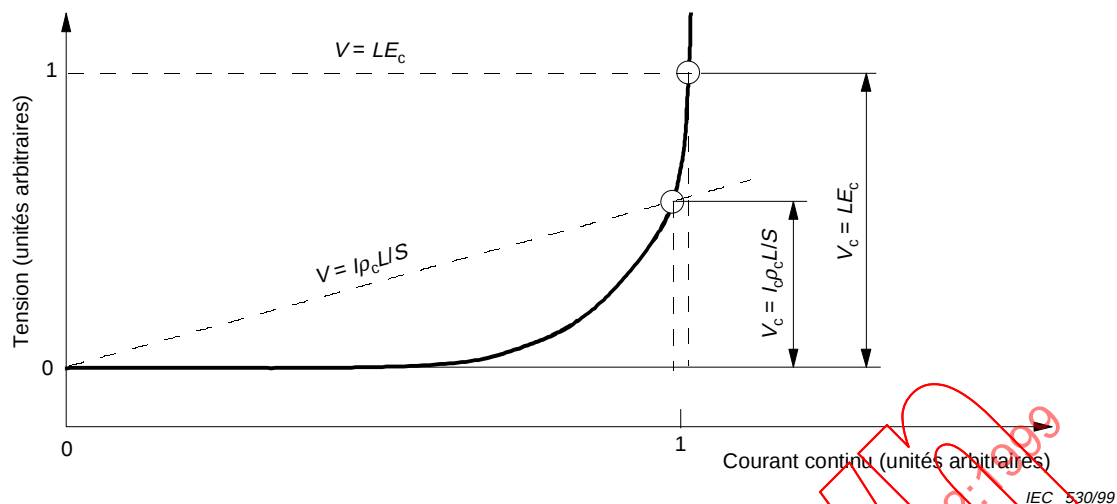
10.2 Report of I_c values

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

10.3 Report of test conditions

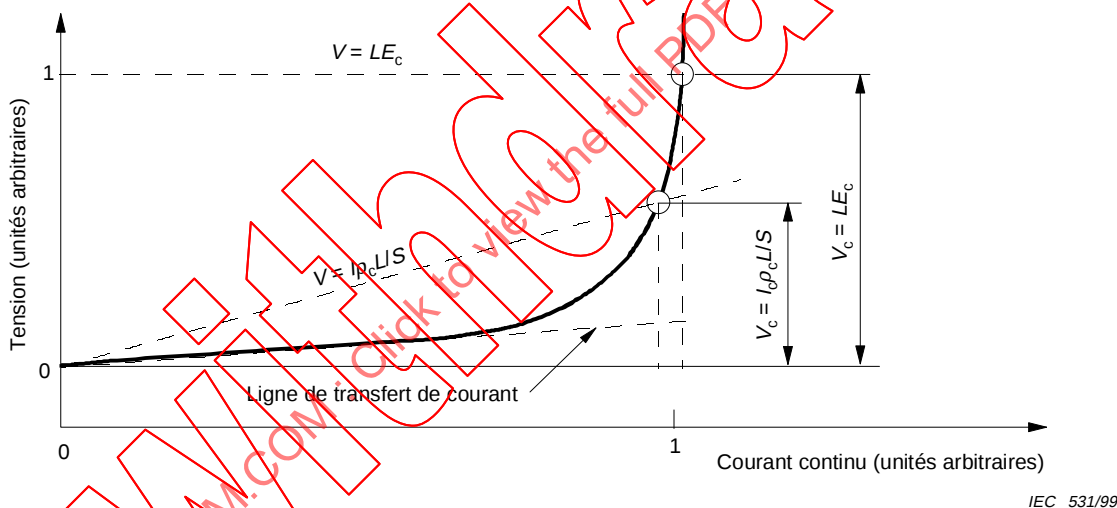
The following test conditions shall be reported:

- 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) Lorentz force direction;
- m) reaction heat treatment conditions.



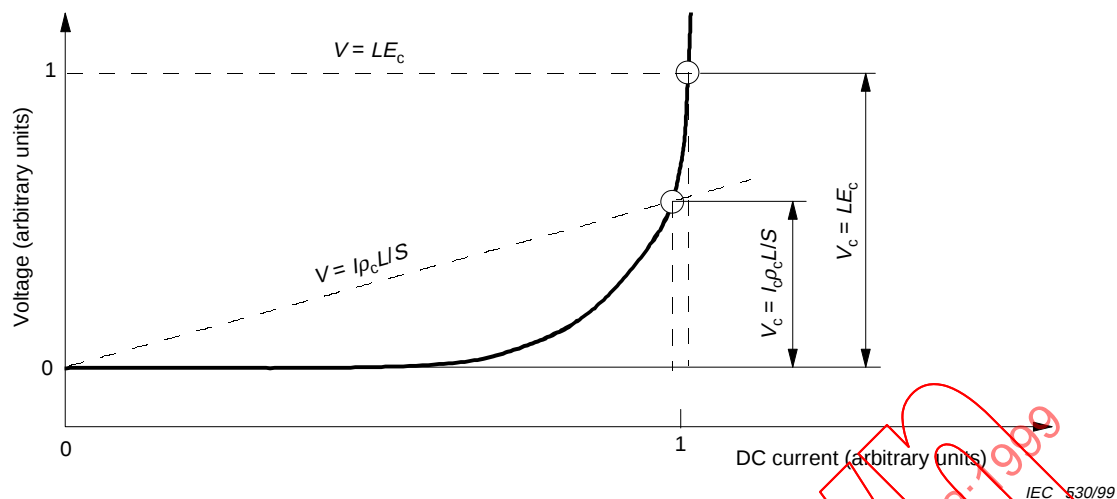
NOTE – La figure montre l'application du champ électrique et des critères de résistivité dans la détermination du courant critique.

Figure 1 – Caractéristique $V-I$ intrinsèque



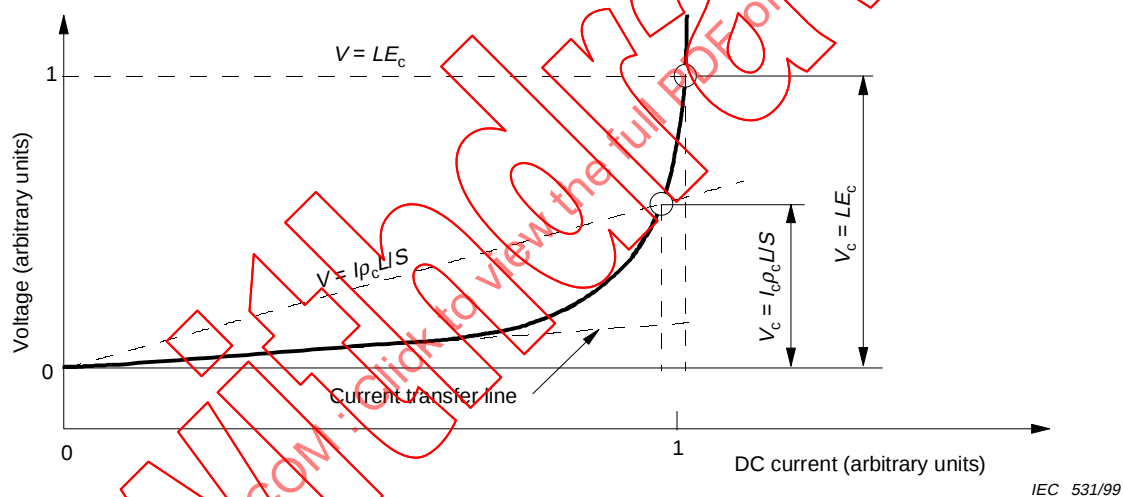
NOTE – La figure montre l'application du champ électrique et des critères de résistivité dans la détermination du courant critique sur une caractéristique $V-I$ avec une composante de transfert de courant représentée sous la forme d'une région linéaire traversée par un courant bas.

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



NOTE – The figure shows the application of the electric field and resistivity criteria to determine the critical current.

Figure 1 – Intrinsic V-I characteristic



NOTE – The figure shows the application of the electric field and resistivity criteria to determine the critical current on a V-I characteristic with a current transfer component exhibited as a linear region at low current.

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

Annexe A (informative)

Informations supplémentaires relatives aux articles 1 à 9

A.1 Domaine d'application

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 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 (V-I) observées soient instables avec des champs magnétiques bas.

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 Terminologie

Les spécifications qui définissent les termes de la présente norme sont des définitions pratiques d'ingénierie du contexte de mesurage, par opposition aux définitions de la norme terminologique qui sont formelles et scientifiques.

A.3 Prescriptions

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

Dans la présente méthode d'essai, on prépare à la fois un mandrin de réaction et un mandrin de mesurage. 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 mesurage. 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.

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).

Annex A (informative)

Additional information relating to clauses 1 to 9

A.1 Scope

There are a large number of variables that have a significant effect on the measured value of critical current which need to be brought to the attention of the user. Some of these 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 (*V-I*) characteristics may not be stable at low magnetic fields.

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 Terminology

The statements defining terms in this standard are practical/engineering definitions in the context of measurement as opposed to the formal/scientific definitions in the terminology standard.

A.3 Requirements

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

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.

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).

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 les 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 Nb₃Sn 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. Les mandrins de mesurage Ti-6Al-4V, en particulier, 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 ¹⁾ et dans les comparaisons entre laboratoires ²⁾.

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. 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.

1) H. Kirchmayr, M.B. Siddall et D.B. Smathers, *Cryogenics*, Volume 35, VAMAS Supplement, 1995, pp. S93-S94.

2) K. Itoh, Y. Tanaka et K. Osamura, in Proc. of the 6th ICEC/ICMC, Kitakyushu, Japan, Elsevier Science, 1996, pp. 1787-1790.

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 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 ¹⁾ and interlaboratory comparisons ²⁾.

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. 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.

1) H. Kirchmayr, M.B. Siddall and D.B. Smathers, *Cryogenics*, Volume 35, VAMAS Supplement, 1995, pp. S93-S94.

2) K. Itoh, Y. Tanaka and K. Osamura, in Proc. of the 6th ICEC/ICMC, Kitakyushu, Japan, Elsevier Science, 1996, pp. 1787–1790.

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 mesurage 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 mesurage 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.

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.4 Appareillage

A.4.1 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;
 - oxyde d'aluminium;
 - 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.

A.4.2 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.

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 mesurage.

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

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 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.4 Apparatus

A.4.1 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.

A.4.2 Reaction mandrel construction

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

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.4.3 Matériaux du mandrin de mesurage

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 mesurage 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 Nb₃Sn est de 0,25 % à 0,30 % de la température ambiante à 4,2 K.

Si la contraction thermique du mandrin de mesurage 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 mesurage 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 la contraction thermique du matériau du mandrin de mesurage doit être 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 mesurage. 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 mesurage:
 - 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 mesurage:
 - 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 mesurage:
 - alliage de cuivre non ferromagnétique recouvert d'une couche isolante;
 - époxyde céramique en dispersion;
 - céramique d'oxyde d'aluminium.

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 Nb₃Sn.

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.

A.4.3 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 % – 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 shall 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, 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.

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.

Les mandrins de Ti-6Al-4V produisent en général des courants critiques dans un état de tension légère. Dans le cas de 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.5.3.

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.

A.4.4 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.5.3.

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 5.3.

Il est recommandé que le sillon du mandrin de mesure soit en forme de V. Il est permis d'utiliser les mandrins à sillon rectangulaire ou sans sillon avec une technique de fixation du spécimen utilisant un adhésif à basse température ou une résine époxyde (voir A.5.4).

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

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.

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.5.3.

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.

A.4.4 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.5.3.

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 5.3.

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.5.4).

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.

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.5 Préparation du spécimen

A.5.1 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 .

Il convient que les matériaux de revêtement tels que la plaque de chrome sur le spécimen soient traités de manière appropriée et soignée 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.5.2 Traitement thermique de réaction

En l'absence de spécification du fabricant pour les variations de température avec durée et emplacement dans le 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.5.3 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.

A.5 Specimen preparation

A.5.1 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.

Coating materials, such as 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.5.2 Reaction heat treatment

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

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

A.5.3 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.

Le spécimen peut être dévissé du mandrin de réaction en le serrant légèrement et en faisant pivoter 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

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

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 mesure.

L'opération consistant à transférer le spécimen du mandrin de réaction au mandrin de mesure 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.

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.5.4 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.

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.

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.5.4 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.6 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.

Une méthode d'acquisition des données $V-I$, appelée méthode à vitesse de balayage constante, consiste à faire osciller le courant à vitesse constante de zéro jusqu'à un courant supérieur à I_c . Avec cette méthode, il convient d'utiliser une vitesse de balayage du courant inférieure à $2 I_c/\text{min}$. Cette restriction est due à des considérations relatives à la tension inductive et au chauffage des spécimens.

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

Si le bruit du système est important en comparaison de la valeur recommandée de la tension, il est souhaitable de faire baisser la vitesse du balayage jusqu'à une valeur inférieure à $0,4 I_c/\text{min}$ 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 $V-I$.

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 V_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.

A.6 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.

One method of $V-I$ data acquisition, called constant sweep rate method, is to sweep the current at a constant rate from zero to a current above I_c . For this method, the current sweep rate should be less than $2 I_c/\text{min}$. This limitation is due to considerations of inductive voltage and specimen heating.

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

If the system noise is significant compared to the prescribed value of voltage, it is desirable to decrease the sweep rate to less than $0,4 I_c/\text{min}$ in order to allow more time for data averaging. In this case, care should be taken to increase the heat capacity and/or cooling surface of the current contacts enough to suppress the influence of heat generation due to the longer time required for the measurement. It should be noted that the step and hold current method allows for averaging data which can be appropriately distributed along the $V-I$ 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 V_c , then decrease the ramp rate, decrease the area of the loop formed by the voltage taps and the specimen between them, or else use the step and hold current method.

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 V_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 $V-I$ 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 de l'enregistrement de chaque caractéristique $V-I$. 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 $V-I$ et en supposant que la variation est linéaire dans le temps. Si la variation de tension est importante en comparaison de V_c , il convient d'apporter des corrections à la configuration expérimentale.

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.7 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 effets 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.

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

Standard Reference Materials Program
Room 204, Building 202
National Institute of Standards and Technology
Gaithersburg, MD 20899, U.S.A.
Téléphone 1-301-975-6776
FAX 1-301-948-3730

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 V_c , then check the direction of the Lorentz force, improve the specimen bonding and support, or use the step and hold current method.

If the $V-I$ 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 $V-I$ characteristic. Small changes in thermoelectric and off-set voltages can be approximately removed by measuring the baseline voltage before and after the $V-I$ curve measurement and assuming a linear change with time. If the change in the baseline voltage is significant compared to V_c , then corrective action to the experimental configuration should be taken.

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.7 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 effect, 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.

The Cu/Nb-Ti standard reference material SRM-1457 is available from

Standard Reference Materials Program
Room 204, Building 202
National Institute of Standards and Technology
Gaithersburg, MD 20899, U.S.A.
Phone 1-301-975-6776
FAX 1-301-948-3730

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.8 Calcul des résultats

A.8.1 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.

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.8.2 Valeur n (calcul facultatif)

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

$$V = V_0(I/I_0)^n \quad (\text{A.2})$$

où

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

V_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.

Le tracé de $\log V$ 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 % et 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.

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

A.8 Calculation of results

A.8.1 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.

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.8.2 n -value (optional calculation)

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

$$V = V_0 (I/I_0)^n \quad (\text{A.2})$$

where

V is the specimen voltage in microvolts (μV);

V_0 is a reference voltage in microvolts (μV);

I is the specimen current in amperes (A);

I_0 is a reference current in amperes (A).

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

A plot of $\log V$ 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. 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.

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	

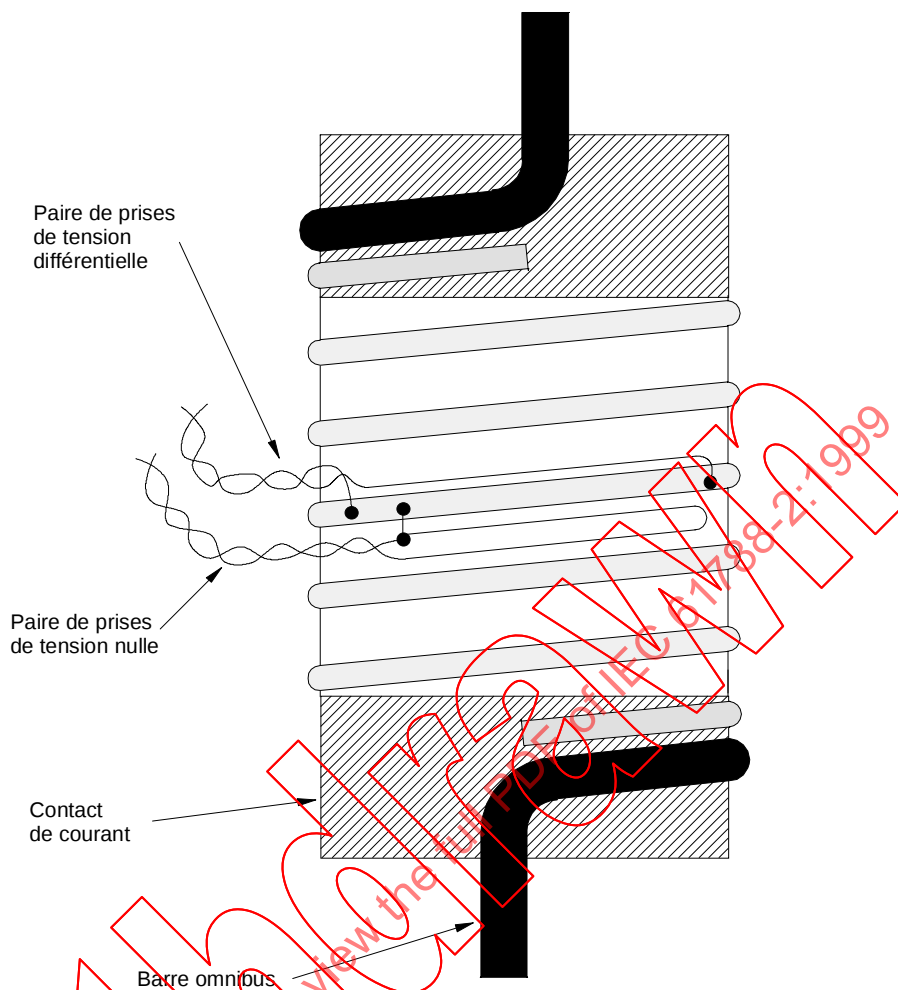
NOTE – The values are referred to zero at 273 K.

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).

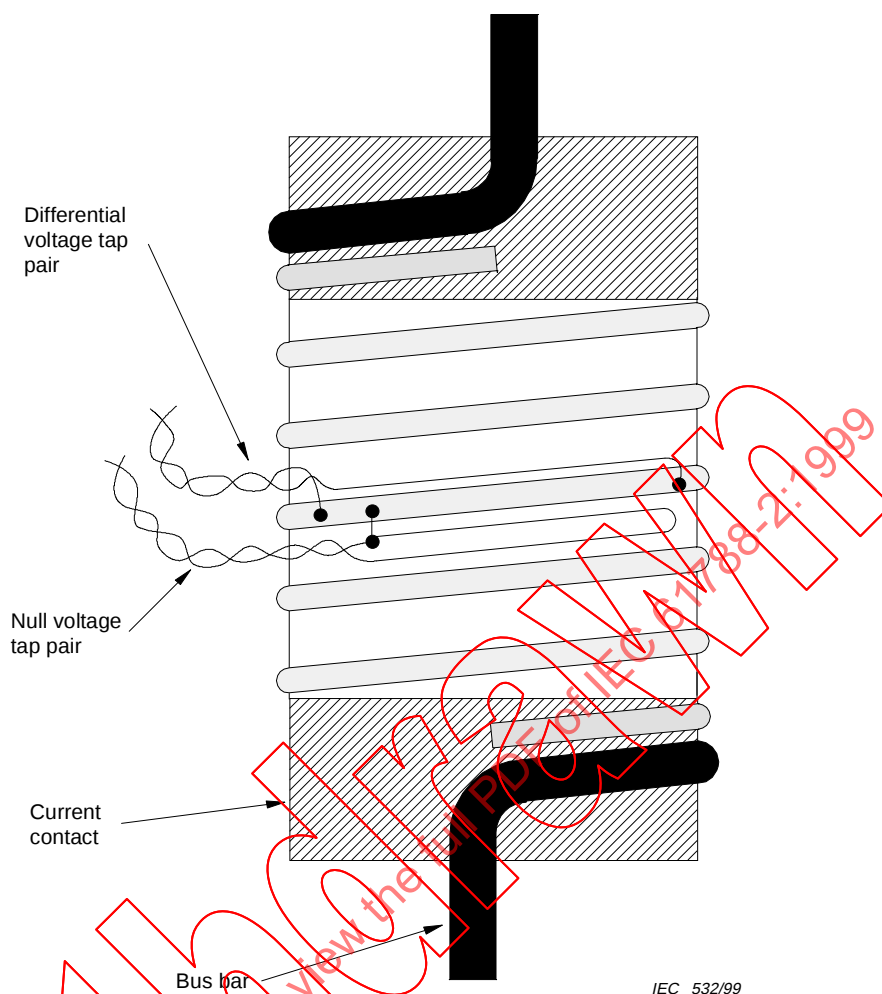
d) A.F. Clark, *et al.* IEEE Trans. on Magnetics, MAG-17 (1981) 2316.



IEC 532/99

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



IEC 532/99

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

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 de 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.