

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE



### Superconductivity –

**Part 24: Critical current measurement – Retained critical current after double bending at room temperature of Ag-sheathed Bi-2223 superconducting wires**

### Supraconductivité –

**Partie 24: Mesurage du courant critique – Courant critique retenu après double flexion à température ambiante des fils supraconducteurs Bi-2223 avec gaine Ag**

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-24:2018



## THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2018 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, 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 either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office  
3, rue de Varembe  
CH-1211 Geneva 20  
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11  
[info@iec.ch](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://www.iec.ch)

### About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

### About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

#### IEC Catalogue - [webstore.iec.ch/catalogue](http://webstore.iec.ch/catalogue)

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

#### IEC publications search - [webstore.iec.ch/advsearchform](http://webstore.iec.ch/advsearchform)

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

#### IEC Just Published - [webstore.iec.ch/justpublished](http://webstore.iec.ch/justpublished)

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and also once a month by email.

#### Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 21 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

#### IEC Glossary - [std.iec.ch/glossary](http://std.iec.ch/glossary)

67 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

#### IEC Customer Service Centre - [webstore.iec.ch/csc](http://webstore.iec.ch/csc)

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: [sales@iec.ch](mailto:sales@iec.ch).

### A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

### A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

#### Catalogue IEC - [webstore.iec.ch/catalogue](http://webstore.iec.ch/catalogue)

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

#### Recherche de publications IEC - [webstore.iec.ch/advsearchform](http://webstore.iec.ch/advsearchform)

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

#### IEC Just Published - [webstore.iec.ch/justpublished](http://webstore.iec.ch/justpublished)

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et aussi une fois par mois par email.

#### Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 21 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

#### Glossaire IEC - [std.iec.ch/glossary](http://std.iec.ch/glossary)

67 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

#### Service Clients - [webstore.iec.ch/csc](http://webstore.iec.ch/csc)

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: [sales@iec.ch](mailto:sales@iec.ch).

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE



### Superconductivity –

**Part 24: Critical current measurement – Retained critical current after double bending at room temperature of Ag-sheathed Bi-2223 superconducting wires**

### Supraconductivité –

**Partie 24: Mesurage du courant critique – Courant critique retenu après double flexion à température ambiante des fils supraconducteurs Bi-2223 avec gaine Ag**

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

ICS 17.220; 29.050; 77.040.10

ISBN 978-2-8322-5801-9

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.**

**Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

## CONTENTS

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FOREWORD.....                                                                                                       | 4  |
| INTRODUCTION.....                                                                                                   | 6  |
| 1 Scope.....                                                                                                        | 7  |
| 2 Normative references .....                                                                                        | 7  |
| 3 Terms and definitions .....                                                                                       | 7  |
| 4 Principle .....                                                                                                   | 8  |
| 5 Apparatus.....                                                                                                    | 8  |
| 5.1 General.....                                                                                                    | 8  |
| 5.2 Bending mandrel.....                                                                                            | 8  |
| 5.3 Critical current measurement holder .....                                                                       | 8  |
| 5.4 Critical current measuring system .....                                                                         | 9  |
| 6 Specimen preparation and set up .....                                                                             | 9  |
| 6.1 Length of specimen.....                                                                                         | 9  |
| 6.2 Mounting of the specimen .....                                                                                  | 10 |
| 7 Measurement procedures .....                                                                                      | 10 |
| 7.1 Critical current measurement .....                                                                              | 10 |
| 7.2 Double bending.....                                                                                             | 10 |
| 7.3 Retained critical current after bending.....                                                                    | 11 |
| 8 Calculation of results .....                                                                                      | 11 |
| 8.1 Critical current criteria.....                                                                                  | 11 |
| 8.2 $n$ -value (optional) .....                                                                                     | 11 |
| 9 Test report.....                                                                                                  | 11 |
| 9.1 Identification of test specimen.....                                                                            | 11 |
| 9.2 Report of $I_C$ values and/or retained $I_C$ ratio .....                                                        | 12 |
| 9.3 Report of $I_C$ test conditions .....                                                                           | 12 |
| Annex A (informative) Additional information relating to Clauses 1 to 9.....                                        | 13 |
| A.1 General.....                                                                                                    | 13 |
| A.2 Measurement condition .....                                                                                     | 13 |
| A.3 Apparatus measurement holder material .....                                                                     | 13 |
| A.4 Specimen preparation .....                                                                                      | 16 |
| A.5 Measurement procedures.....                                                                                     | 16 |
| A.5.1 Critical current measurement.....                                                                             | 16 |
| A.5.2 Bending .....                                                                                                 | 18 |
| A.6 Calculation of results .....                                                                                    | 19 |
| A.6.1 Critical current criteria .....                                                                               | 19 |
| A.6.2 $n$ -value .....                                                                                              | 19 |
| A.7 Relative standard uncertainty.....                                                                              | 20 |
| Annex B (informative) Evaluation of combined standard uncertainty for the retained $I_C$ after double bending ..... | 22 |
| B.1 Practice of critical current measurement .....                                                                  | 22 |
| B.2 Model equation .....                                                                                            | 22 |
| B.3 Operation for the retained $I_C$ measurement .....                                                              | 23 |
| B.4 Combined standard uncertainty.....                                                                              | 23 |

|       |                                                                                                                                                                          |    |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| B.5   | Evaluation of standard uncertainty (SU) for each measurand .....                                                                                                         | 24 |
| B.5.1 | Voltage tap length ( $L$ ) .....                                                                                                                                         | 24 |
| B.5.2 | Voltage ( $U$ ) .....                                                                                                                                                    | 24 |
| B.5.3 | Current ( $I$ ) .....                                                                                                                                                    | 25 |
| B.6   | Evaluation of combined standard uncertainty .....                                                                                                                        | 26 |
|       | Bibliography .....                                                                                                                                                       | 29 |
|       | Figure 1 – Sample holder .....                                                                                                                                           | 9  |
|       | Figure 2 – Intrinsic $U$ - $I$ characteristic .....                                                                                                                      | 12 |
|       | Figure 3 – $U$ - $I$ characteristic with a current transfer component .....                                                                                              | 12 |
|       | Figure A.1 – Measurement configuration for a few hundred ampere class conductor .....                                                                                    | 15 |
|       | Figure A.2 – Clips .....                                                                                                                                                 | 15 |
|       | Figure A.3 – Additional strain caused by voltage tap wires and solders .....                                                                                             | 16 |
|       | Figure A.4 – Boiling temperature of liquid nitrogen versus atmospheric pressure .....                                                                                    | 17 |
|       | Figure A.5 – Critical current versus temperature for a typical Bi-2223 wire .....                                                                                        | 18 |
|       | Figure A.6 – Bending process .....                                                                                                                                       | 19 |
|       | Figure B.1 – $U$ - $I$ diagram .....                                                                                                                                     | 22 |
|       | Figure B.2 – Bending diameter dependence of the retained $I_c$ and $\langle X_{COV} \rangle$ , where the<br>calculated curve of $I_c/I_{c0}$ gives Equation (B.24) ..... | 28 |
|       | Table A.1 – Thermal expansion data of Bi-2223 superconductors and selected<br>materials .....                                                                            | 14 |
|       | Table A.2 – Average of the degree of retained critical current ( $I_c/I_{c0}$ ), their relative<br>standard uncertainty and coefficient of variance .....                | 21 |
|       | Table B.1 – Precondition for evaluating standard uncertainty .....                                                                                                       | 22 |
|       | Table B.2 – Partial sum (Equation (B.17) of standard uncertainty as related to the<br>current measurement) .....                                                         | 26 |
|       | Table B.3 – Budget table of standard uncertainty for each component .....                                                                                                | 27 |
|       | Table B.4 – Combined standard uncertainty .....                                                                                                                          | 27 |

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**SUPERCONDUCTIVITY –****Part 24: Critical current measurement –  
Retained critical current after double bending at room  
temperature of Ag-sheathed Bi-2223 superconducting wires****FOREWORD**

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

International Standard IEC 61788-24 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity:

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

|             |                  |
|-------------|------------------|
| FDIS        | Report on voting |
| 90/402/FDIS | 90/406/RVD       |

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

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

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

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

**IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.**

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-24:2018

## INTRODUCTION

In 1988, a new class of high critical temperature ( $T_c$ ) copper oxide superconductors, Bi-Sr-Ca-Cu-O, was discovered. After nearly three decades,  $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (Bi-2223) is now being utilized as a commercial high- $T_c$  superconducting wire.

Superconducting wires are often subjected to bending deformation during production and application, e.g. during wire processing, magnet construction, cable fabrication, etc. The wire is bent towards both the upper and lower directions as it passes through several pulleys. These production processes are carried out at room temperature. Critical current of the wire is likely influenced through such bending, and may be accompanied by irreversible degradation in case of large deformation. The easiest way to evaluate the influence of bending on critical current is to carry out comparative measurement with the wire in the straight form before and after bending to a specific diameter.

After a wire is made into a coil or a cable, critical current is often measured under bending conditions or a more complex deformation state. In these cases, change in critical current may include both reversible and irreversible contributions depending on the amount of deformation. Irreversible degradation usually originates from a fracture in the superconducting component. In order to evaluate only irreversible contributions, measuring the retained critical current after the wire is straightened back from its deformed shape is necessary.

The critical bending diameter below which wire performance degrades significantly is typically specified for use of commercial superconducting wire. Thus, it is important to standardize measurement methods for the retained critical current after double bending. This document can be applied to other similar bending tests such as single bending, cyclic bending, etc.

This document consists of two fundamental technologies of the critical current measurement and the double bending process.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-24:2018

## SUPERCONDUCTIVITY –

### Part 24: Critical current measurement – Retained critical current after double bending at room temperature of Ag-sheathed Bi-2223 superconducting wires

#### 1 Scope

This part of IEC 61788 describes a test method for determining the retained critical current after double bending at room temperature of short and straight Ag- and/or Ag alloy-sheathed Bi-2223 superconducting wires that have the shape of a flat or square tape containing mono- or multicores of oxides. The wires can be laminated with copper alloy, stainless steel or Ni alloy tapes.

The test method is intended for use with superconductors that have a critical current less than 300 A and an  $n$ -value larger than 5. The test to determine the retained critical current is carried out without an applied magnetic field, with the test specimen immersed in a liquid nitrogen open bath.

#### 2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050-815:2015, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 815: Superconductivity* (available at <http://www.electropedia.org/>)

#### 3 Terms and definitions

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

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

##### 3.1 double bending

bending in one direction to a certain diameter followed by the subsequent bending in the opposite direction to the same diameter

Note 1 to entry: Bending diameter is defined as the diameter of the bending mandrel.

Note 2 to entry: The definition of bending diameter is in principle the sum of the mandrel diameter and superconductor thickness. In the engineering process, however, the minimum diameter of the pulleys through which the wire is passed should also be considered.

### 3.2

#### **constant sweep rate method**

voltage-current data ( $U$ - $I$  data) acquisition method where a current is swept at a constant rate from zero to a value above critical current ( $I_c$ ) while continuously or frequently and periodically acquiring  $U$ - $I$  data

### 3.3

#### **ramp-and-hold method**

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

## 4 Principle

The principle of the double bending method is described as follows. Critical current at 77 K under self-field shall be measured in a straight configuration with no mechanical strain. After measurement the specimen shall be warmed up to room temperature.

Hereafter, the specimen shall be bent in one direction to the specified diameter and then returned to the straight configuration. Successively, the specimen shall be bent in the opposite direction to the same diameter and returned to the straight configuration again.

Critical current of the specimen at 77 K under self-field shall be measured after double bending and straightening. The time interval between critical current measurements before and after bending should be as short as possible.

Critical current is determined from voltage-current ( $U$ - $I$ ) characteristic measured in a liquid nitrogen open bath under a constant pressure. Critical current is determined as the current at a specific electric field strength criterion (electric field criterion) ( $E_c$ ), which corresponds to the voltage criterion ( $U_c$ ) for a specified voltage tap separation.

## 5 Apparatus

### 5.1 General

The apparatuses required for the present test methods include the following:

- mandrels with necessary bending diameters;
- critical current measuring system.

### 5.2 Bending mandrel

Bending diameter shall be defined as the diameter of the bending mandrel. Bendable length shall be longer than the distance between the voltage taps.

### 5.3 Critical current measurement holder

The measurement holder is constructed from an insulating material.

Critical current may inevitably depend on the measurement holder material due to specimen strain induced by the difference of thermal contraction between specimen and holder.

The structure of the measurement holder shall be one which does not induce a local excess strain. The specimen strain induced by the difference of thermal contraction between specimen and holder during cooling from room temperature to 77 K shall be minimized to within  $\pm 0,1$  %. This thermal strain can be evaluated in cases where the thermal expansion

coefficients of constituent materials are known. To minimize the thermal strain, the holder shall be constructed from material which has a thermal contraction similar to the specimen.

NOTE Recommended measurement holder materials are described in A.3.

## 5.4 Critical current measuring system

The apparatus to measure  $U$ - $I$  characteristics consists of a specimen probe, an open bath of liquid nitrogen and a  $U$ - $I$  measurement system.

The specimen probe, which consists of a specimen, a measurement holder and a specimen support structure, is inserted in the open bath filled with liquid nitrogen. The  $U$ - $I$  measurement system consists of a direct current source, a recorder and necessary preamplifiers, filters or voltmeters, or a combination thereof.

A computer-assisted data acquisition system is recommended.

## 6 Specimen preparation and set up

### 6.1 Length of specimen

The length ( $L$ ) of the specimen to be measured shall be determined as follows (see Figure 1):

$$L = 2 \times L_2 + 2 \times L_4 + L_1 + 2 \times L_3 > 5 \times W \quad (1)$$

$$L_1 \geq W, L_2 \geq W, L_3 \geq W \quad (2)$$

where

- $L_1$  is the distance between the voltage taps;
- $L_2$  is the length of the current contact;
- $L_3$  is the shortest distance from the current contact to the voltage tap;
- $L_4$  is the width of the voltage tap;
- $W$  is the width of the specimen to be measured.

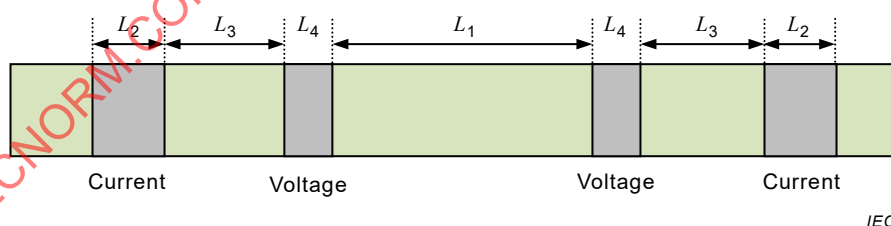


Figure 1 – Sample holder

For a specimen with a larger current-carrying capacity/width,  $L_2$  shall be longer than  $3W$ . In cases where the specimen is laminated with stainless steel or laminated with another highly resistive material,  $L_2$  shall be larger. For measurement which requires higher voltage sensitivity,  $L_1$  shall be larger. In cases where current transfer voltage cannot be ignored,  $L_3$  shall be larger.

In Table 2 of [1]<sup>1</sup>, five successful double bend test conditions are shown. Typically, specimen length  $L$  ranges from 90 mm to 150 mm,  $L_1$  from 18,25 mm to 50 mm,  $L_2$  from 10 mm to 20 mm,  $L_3$  from 12,5 mm to 20 mm, and  $L_4$  from 1,75 mm to 11 mm. When testing Bi-2223 wire with a stainless steel or nickel alloy laminate,  $L_2$  should be sufficiently large to avoid local heating.

## 6.2 Mounting of the specimen

The specimen shall be mounted on the flat surface of the holder and both ends shall be fastened to the current contact blocks without solder, as described in A.3. As long as the current pad areas of the wire are not located within the area to be bent, they can also be soldered, if desired.

Voltage taps shall be placed in the central section of the specimen, without any material which cannot be removed.

NOTE The recommended voltage tap method is described in A.3.

The voltage leads shall be twisted as close to the voltage taps as possible.

## 7 Measurement procedures

### 7.1 Critical current measurement

Critical current shall be measured under conditions that avoid any extra mechanical strain.

The specimen shall be slowly immersed in the liquid nitrogen bath. The specimen shall be cooled from room temperature to the temperature of the liquid nitrogen over a time period of at least a few tens of seconds.

When using the constant sweep rate method, ramp rate shall be set so that  $I_c$  and  $n$ -value are not ramp rate dependent.

When using the ramp-and-hold method, current sweep rate between current set points shall be set lower than the equivalent ramping from zero current to  $I_c$  in 3 s. Data acquisition at each set point shall begin as soon as the flow/creep voltage generated by the current ramp can be disregarded. Current drift during each current set point shall be less than 1 % of  $I_c$ .

$U$ - $I$  characteristics are measured and recorded at increasing current values.

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

After measurement, the specimen shall be warmed up to room temperature.

### 7.2 Double bending

At room temperature, one end of the specimen shall be affixed to a mandrel of a specific diameter and the specimen bent along the mandrel from the fixed end to the free end, as shown in A.5.2. The bending section shall include the entire length between the voltage taps.

Hereafter, the specimen shall be free of bending.

<sup>1</sup> Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

The specimen shall be turned over and reattached to the mandrel with the same diameter and bent along the mandrel from the fixed end to the free end of specimen.

Finally, the specimen shall be straightened.

### 7.3 Retained critical current after bending

Critical current shall be measured in a straight configuration with no mechanical strain other than straightening from the plastic deformation caused by the previous bending.

Critical current measurement shall be carried out using the same procedure as in 7.1.

Measurement shall be carried out in a liquid nitrogen open bath with a time interval between critical current measurements before and after bending treatment as short as possible. Since critical current is strongly dependent on temperature, attention shall be given to avoid variation in temperature before and after bending. A detailed discussion is provided in A.5.1.

## 8 Calculation of results

### 8.1 Critical current criteria

Critical current  $I_c$  shall be determined using electric field criterion  $E_c$ .

The value of  $I_c$  shall be determined under criteria of 100  $\mu\text{V/m}$  and/or 10  $\mu\text{V/m}$ .

$I_c$  shall be determined to be the current corresponding to the point on the  $U$ - $I$  curve where voltage  $U_c$  is measured relative to the baseline voltage (see Figure 2 and Figure 3):

$$U_c = L_1 E_c \quad (3)$$

where

$U_c$  is the voltage criterion in microvolts ( $\mu\text{V}$ );

$L_1$  is the voltage tap separation in metres (m);

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

where  $U_c$  and  $I_c$  are the corresponding voltage and current values at the intersecting point of the straight lines with the  $U$ - $I$  curve as shown in Figure 2.

A straight line shall be drawn from the baseline voltage to the average voltage near  $0,5 I_c$  (see Figure 3). The finite slope of this line shall be due to current transfer and/or local sample damage. Valid determination of  $I_c$  requires that the slope of the line be less than  $0,3 U_c/I_c$ , where  $U_c$  and  $I_c$  are determined under the criteria of 100  $\mu\text{V/m}$  and/or 10  $\mu\text{V/m}$ .

### 8.2 $n$ -value (optional)

$n$ -value shall be calculated as the slope of the plot of  $\log U$  versus  $\log I$  in the region between 100  $\mu\text{V/m}$  and 10  $\mu\text{V/m}$ .

## 9 Test report

### 9.1 Identification of test specimen

The test specimen shall be identified by the following:

- a) name of the manufacturer of the specimen;

- b) classification and/or symbol;
- c) lot number.

## 9.2 Report of $I_c$ values and/or retained $I_c$ ratio

$I_c$  values before and after bending and/or the retained  $I_c$  ratio, together with their corresponding criteria and  $n$ -values (optional), shall be reported.

## 9.3 Report of $I_c$ test conditions

The following test conditions shall be reported as needed:

- a) bending diameter ( $D$ );
- b) fixing method of the current and voltage taps (for example, clip, crimping using Cu block, solder (for currents) or another connecting method);
- c) length of specimen ( $L$ );
- d) distance between voltage taps ( $L_1$ );
- e) the shortest distance from a current contact to a voltage tap ( $L_3$ );
- f) length of the current contacts ( $L_2$ );
- g) sweep rate when using the constant sweep rate method;
- h) ramp pitch, ramping time and holding time when using the ramp-and-hold method.

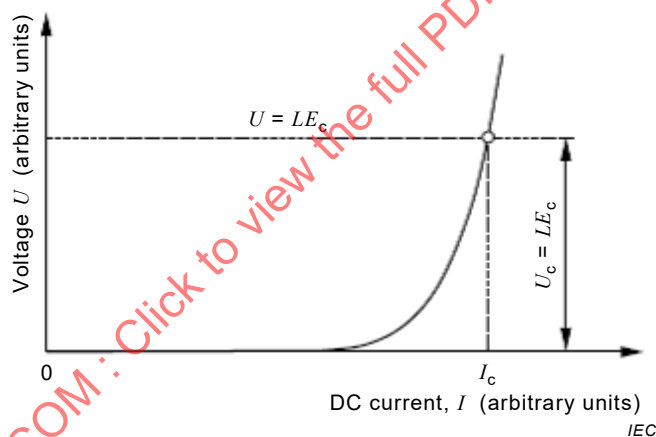


Figure 2 – Intrinsic  $U$ - $I$  characteristic

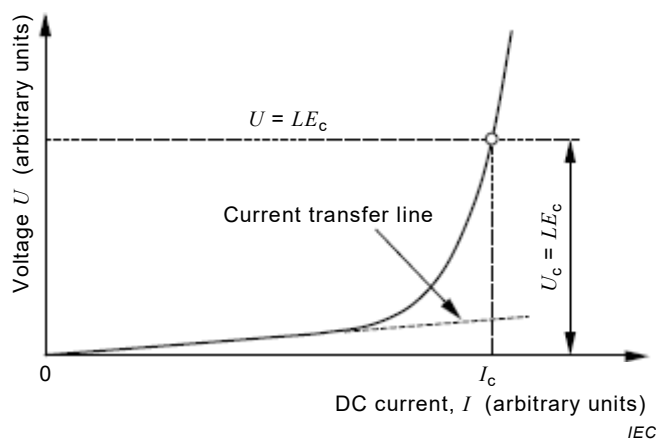


Figure 3 –  $U$ - $I$  characteristic with a current transfer component

## **Annex A** (informative)

### **Additional information relating to Clauses 1 to 9**

#### **A.1 General**

Many different variables have a significant effect on the critical current measurement value for Ag- and/or Ag alloy-sheathed Bi-2223 superconductor wires. However, significant portions of the test method covered in this document are common or similar to those for Bi-based oxide superconductors (IEC 61788-3 [2]). Only some of these variables are addressed in Annex A. For variables that are not mentioned here, refer to IEC 61788-3.

Special features of oxide superconductors can be classified into two groups. The first group is specific to oxide composite superconductors, including mechanical fragility, electromagnetic weak links, cryogen gas bubble formation, aging degradation, magnetic flux flow and creep, large anisotropy, hysteresis in critical current with magnetic field sweep, etc. The second group is related to the short length of the specimen used in the standard. Critical current measurement of such a specimen may easily pick up varying voltage signals due to thermal electromotive force, inductive voltage, thermal noise, current redistribution, specimen motion relative to the holder, etc. Current transfer voltages may be present due to the short distance from a current contact to the voltage tap.

Superconductors with critical currents above 300 A can be measured using this document with an anticipated reduction both in accuracy and precision and a more significant self-field effect.

Restrictions in this test method have been added in order to obtain the required precision in the final definitive phase of long conductor qualification.

#### **A.2 Measurement condition**

The minimum total length of the tape specimen is five times the tape width ( $W$ ) plus two times the voltage tap width ( $L_4$ ), which represents the sum of the following:

- the minimum voltage tap separation ( $L_1 \geq W$ );
- the length of the current contacts ( $L_2 \geq W$ );
- the shortest distance between the current and voltage contacts ( $L_3 \geq W$ ).

#### **A.3 Apparatus measurement holder material**

In this method, the specimen strain is kept to a minimum (less than 0,1 %). A thermal contraction of less than 0,1 % does not result in an appreciable deviation of  $I_c$  at 0 T, near 77 K. One significant source of strain is the mismatch of thermal contraction rates between the measurement holder and the specimen when cooled to liquid nitrogen temperature.

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

The recommended holder material is fibreglass epoxy composite, with the specimen lying in the plane of the fabric warp.

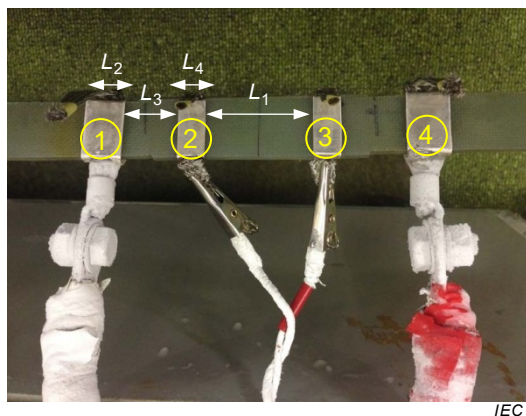
**Table A.1 – Thermal expansion data of Bi-2223 superconductors and selected materials**

| Material                          | $\Delta L/L_{293K-77K}$ [%] |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| Ag-sheathed Bi-2223 [3]           | 0,274                       |
| Ag,Au-sheathed Bi-2223 [3]        | 0,293                       |
| Copper alloy laminated Bi-2223    | 0,275                       |
| Stainless steel laminated Bi-2223 | 0,265                       |
| Nickel alloy laminated Bi-2223    | 0,227                       |
| Silver [4]                        | 0,370                       |
| Copper [5]                        | 0,302                       |
| GFRP G10, warp [6][7]             | 0,21                        |
| GFRP G10, normal [6][7]           | 0,64                        |

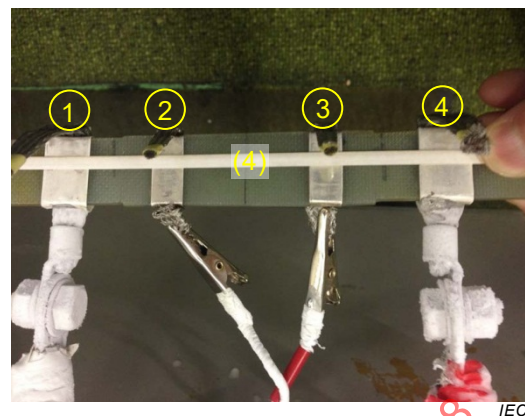
An example of a measurement holder is shown in Figure A.1.

As shown in Figure A.1 (a), the sample holder is constructed by four contact blocks made of silver tape (2) attached to the fibreglass epoxy base (1). The braided wires (3) are soldered to the silver tapes in the opposite surface as current and voltage taps.

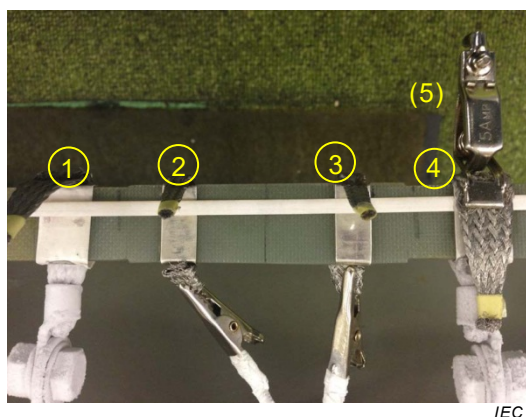
As shown in Figure A.1 (b), the tape specimen (4) is set on the sample holder by contacting the silver tapes and lapped by the braided wires. The lapped surface is then tightly gripped with the clips ((5) in Figure A.1 (c)). Examples of the clips are shown in Figure A.2.



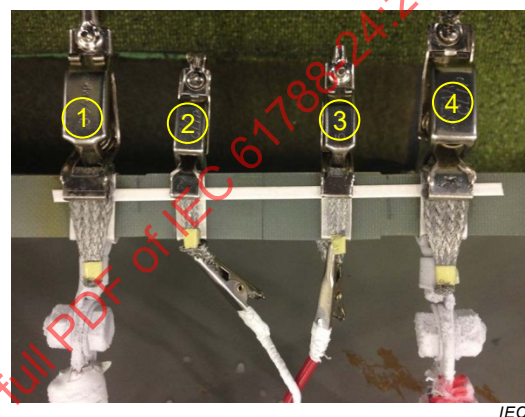
(a) Measurement holder



(b) Specimen laid on the holder



(c) Current contact ④ clipped on to the specimen



(d) All contacts clipped on to the specimen

**Key**

- ①④ current contacts
- ②③ voltage taps

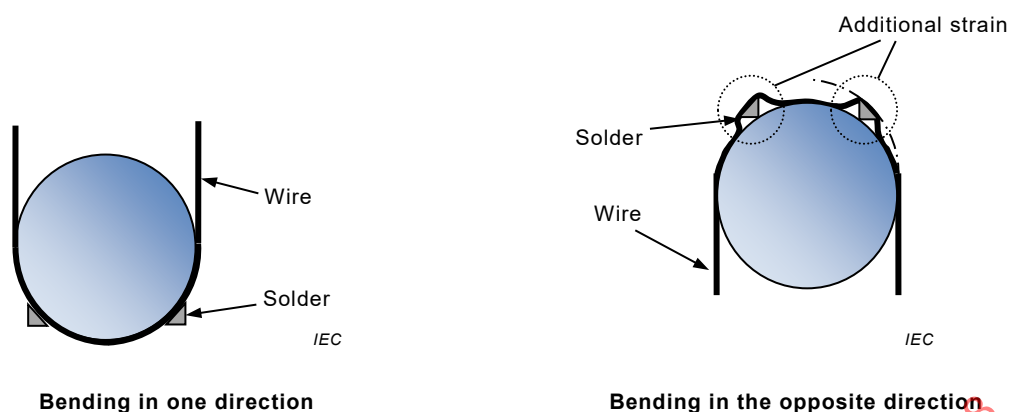
**Figure A.1 – Measurement configuration for a few hundred ampere class conductor**

IEC



IEC

**Figure A.2 – Clips**



**Figure A.3 – Additional strain caused by voltage tap wires and solders**

A critical current measurement standard (IEC 61788-3) exists for BSCCO wire. IEC 61788-3 uses soldering to affix the voltage taps. However, if IEC 61788-3 is used, additional strain is induced on the wire at the soldered position, when the wire is bent and the solder and voltage taps are caught between the wire and the bending mandrel. This document for critical current measurement is an exception in order to avoid additional strain-induced degradation of the wire.

#### **A.4 Specimen preparation**

The distance between the voltage taps is defined as the smallest distance between the voltage contacts, irrespective of size.

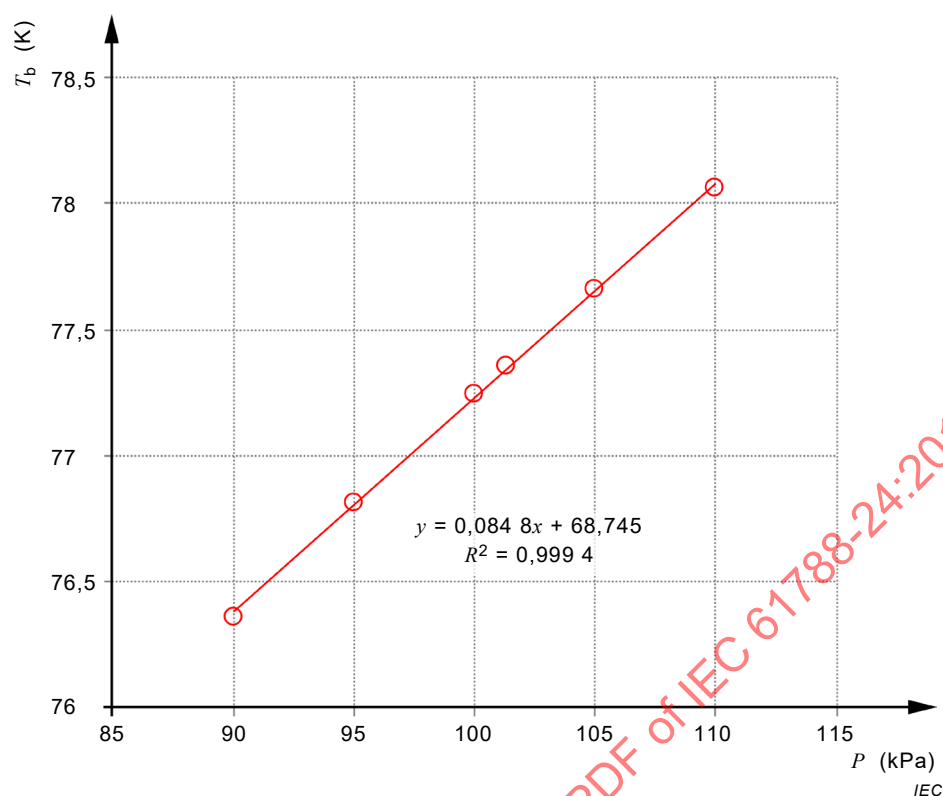
#### **A.5 Measurement procedures**

##### **A.5.1 Critical current measurement**

To reduce thermoelectric potential on the specimen voltage leads, copper voltage leads are used continuously from the cryogen bath until room temperature, where an isothermal environment for all room temperature joints or connections is provided. It should be noted that the joints or connections immersed in the cryogen bath are isothermal.

The rate of cooling may affect the results of critical current measurement due to differential cooling rates and differential thermal contraction causing excessive strain of the specimen.

Atmospheric pressure causes variation in the boiling temperature of liquid nitrogen filled in the open bath. Figure A.4 shows the correlation between boiling temperature ( $T_b$ ) and atmospheric pressure ( $P$ ).

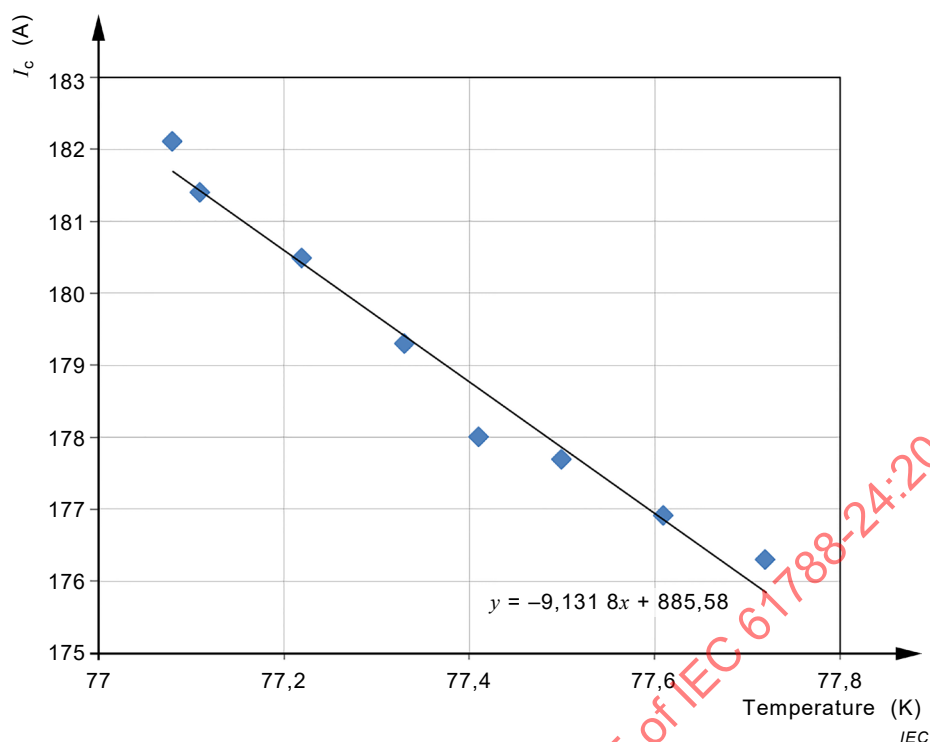


**Figure A.4 – Boiling temperature of liquid nitrogen versus atmospheric pressure**

The critical current of Bi-2223 wires depends on temperature as shown in Figure A.5.

In this document, the objective is to obtain the ratio of critical currents before and after the bending treatment. In order to avoid a significant temperature change from atmospheric pressure variation over time, the duration between two critical current measurements shall be as short as possible.

If system noise is significant compared to the prescribed value of voltage, i.e.  $U_c$ , increasing the time for the ramp progress from zero current to  $I_c$  to more than 150 s is desirable. In this case, care should be taken to sufficiently increase the heat capacity and/or to sufficiently cool the surface of the current contacts to suppress the influence of heat generation due to the longer time required for measurement. It should be noted that the ramp-and-hold method allows for averaging data which can be appropriately distributed along the  $U$ - $I$  characteristics.



**Figure A.5 – Critical current versus temperature for a typical Bi-2223 wire**

Ramping the specimen current can induce a positive or negative voltage on the voltage taps over time. This source of interference voltage during ramping can be identified by its proportional dependence on ramp rate. If this voltage is significant compared to  $U_c$ , then decreasing the ramp rate, decreasing the area of the loop formed by the voltage taps and the specimen in between, or using the ramp-and-hold method is recommended.

Faster current ramp rates can be used for the ramp-and-hold method if the measurement system proves to yield consistent results with a specific ramp rate equivalent to ramping from zero to  $I_c$  in 3 s. It is possible to obtain consistent results with ramp rates as high as 500 A/s on a conductor with critical current from 10 A to 200 A.

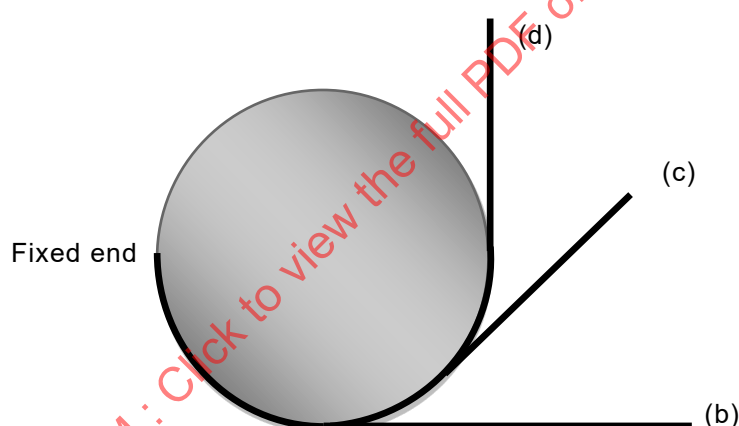
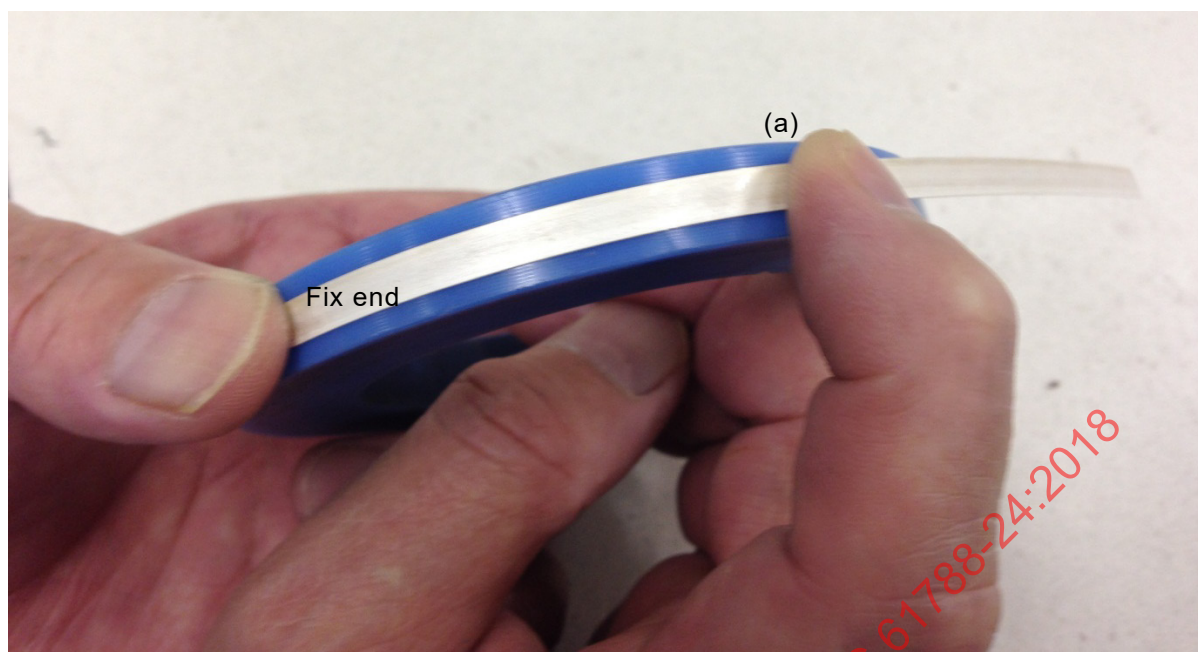
Baseline voltage may include thermoelectric, off-set, ground-loop and common-mode voltages. It is assumed that these voltages remain relatively constant for the time it takes to record each  $U-I$  characteristic. Small changes in thermoelectric and off-set voltages can be approximately negated by measuring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

### A.5.2 Bending

In these procedures, “double bending” refers to only one cycle of forward and backward bending. The tensile stress component applied during handling shall be minimized because it significantly affects critical current.

An example of the bending process is shown in Figure A.6. The specimen is bent along the mandrel from the fixed end to the free end ((a) → (b) → (c) → (d)).

A mandrel with an edge guide facilitates well-aligned bending and reduces measurement uncertainty.



IEC

Figure A.6 – Bending process

## A.6 Calculation of results

### A.6.1 Critical current criteria

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

### A.6.2 $n$ -value

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

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

where

$U$  is the specimen voltage in microvolts ( $\mu\text{V}$ );

$U_0$  is the reference voltage in microvolts ( $\mu\text{V}$ );

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

$I_0$  is the reference current in amperes (A).

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

A plot of  $\log U$  versus  $\log I$  is not always linear, even in the current range near the critical current criteria ( $E_c$ ) of 10  $\mu\text{V/m}$  and 100  $\mu\text{V/m}$ . Hence, the range of the criteria used to determine  $n$  should be reported.

## A.7 Relative standard uncertainty

To assess the quality of the measured data, the concept of uncertainty serves as a sound basis for an independent judgment [8]. In case of Bi-2223 tapes, substantial information has been gathered during the international round robin test (RRT) carried out recently by six research groups [1]. Commercial Bi-2223 superconducting wires laminated by copper alloy sheets were used as test samples. Their general structural feature is as follows. The thin superconductive filaments are embedded in the silver-alloy matrix. The copper alloy sheets with thickness of 50  $\mu\text{m}$  are laminated.

The RRT was carried out for three conditions with different bending diameters of 50 mm, 60 mm and 80 mm. The data obtained by five repeated tests for each bending diameter was reported by each group.

The average of the critical currents was calculated using the equation

$$\langle I_j \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_j(i) \quad (\text{A.2})$$

where  $N$  is the number of specimens tested and  $j = 1, 2$  and  $3$  according to bending diameters. Relative standard uncertainty (RSU) was evaluated from the equation

$$X_{\text{RSU}_j} = \frac{100}{\langle I_j \rangle} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_j(i) - \langle I_j \rangle)^2}{N(N-1)}}. \quad (\text{A.3})$$

Evaluation results are listed in Table A.1. Furthermore, RSU value related to the coefficient of variance (COV) is given by the equation

$$X_{\text{RSU}_j} = \frac{\langle X_{\text{COV}_j} \rangle}{\sqrt{N}} \quad (\text{A.4})$$

where

$X_{\text{RSU}}$  is the relative standard uncertainty;

$N$  is the number of specimens tested;

$\langle X_{\text{COV}} \rangle$  is the averaged coefficient of variation.

When  $X_{\text{RSU}}$  and  $N$  are known,  $\langle X_{\text{COV}} \rangle$  can be obtained according to Table A.2.

**Table A.2 – Average of the degree of retained critical current ( $I_c/I_{c0}$ ), their relative standard uncertainty and coefficient of variance**

| Bending diameter<br>(mm)                             | $N^a$ | $I_{c0}$ (before bending)       |                  |                                  | $I_c$ (after bending)        |                  |                                  | $I_c/I_{c0}$                 |                  |                                  |
|------------------------------------------------------|-------|---------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------|----------------------------------|
|                                                      |       | $\langle I_{c0} \rangle$<br>(A) | $X_{RSU}$<br>(%) | $\langle X_{COV} \rangle$<br>(%) | $\langle I_c \rangle$<br>(A) | $X_{RSU}$<br>(%) | $\langle X_{COV} \rangle$<br>(%) | $\langle I_c/I_{c0} \rangle$ | $X_{RSU}$<br>(%) | $\langle X_{COV} \rangle$<br>(%) |
| 80                                                   | 25    | 207                             | 0,19             | 0,97                             | 206                          | 0,23             | 1,13                             | 0,997                        | 0,0764           | 0,382                            |
| 60                                                   | 25    | 206                             | 0,18             | 0,90                             | 204                          | 0,21             | 1,05                             | 0,992                        | 0,102            | 0,513                            |
| 50                                                   | 25    | 207                             | 0,19             | 0,97                             | 195                          | 0,38             | 1,92                             | 0,943                        | 0,311            | 1,55                             |
| <sup>a</sup> $N$ is the total number of experiments. |       |                                 |                  |                                  |                              |                  |                                  |                              |                  |                                  |

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-24:2018

## Annex B (informative)

### Evaluation of combined standard uncertainty for the retained $I_c$ after double bending

#### B.1 Practice of critical current measurement

Figure B.1 shows a typical voltage versus current diagram. When a voltage tap distance of  $L = 50$  mm is selected, voltage satisfies  $5 \mu\text{V}$  for the electric field criterion of  $E_c = 100 \mu\text{V/m}$ . The corresponding current was  $I_c = 207$  A and  $200$  A for the tapes before and after double bending treatment. Table B.1 shows the precondition for evaluating standard uncertainty.

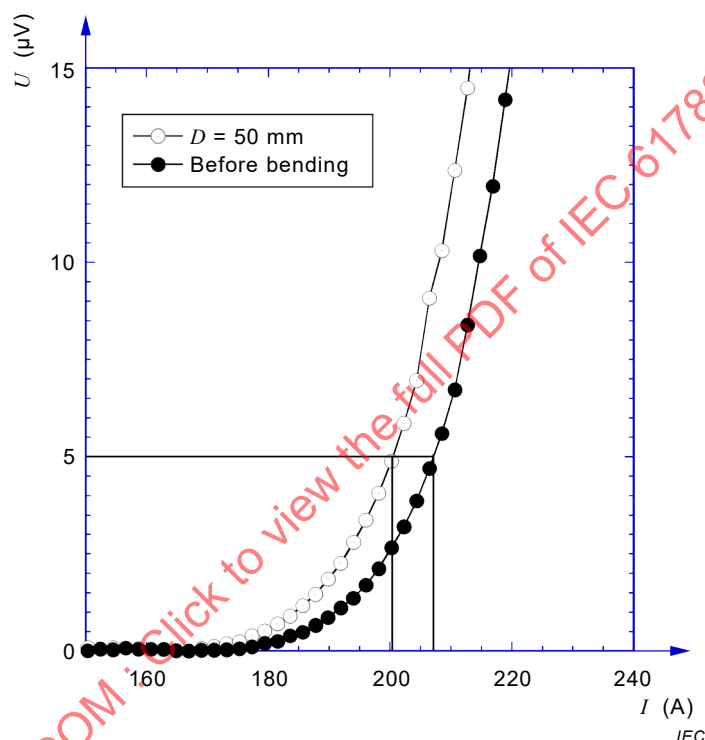


Figure B.1 –  $U$ - $I$  diagram

Table B.1 – Precondition for evaluating standard uncertainty

| $j$                                                                                                                                                | $L_j$<br>[mm] | $U_j$<br>[ $\mu\text{V}$ ] | $I_j$<br>[A] | $n_j$ | $D_j$<br>[mm]   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------------|--------------|-------|-----------------|
| 1                                                                                                                                                  | 50            | 5                          | 207          | 20    | 97 <sup>a</sup> |
| 2                                                                                                                                                  | 50            | 5                          | 200          | 19    | 50              |
| <sup>a</sup> The critical current of the tape with bending diameter of 97 mm is not influenced by the double bending treatment as discussed below. |               |                            |              |       |                 |

#### B.2 Model equation

When an electric field is generated in the superconducting medium due to viscous flow of magnetic flux, the correlation between voltage and current is expressed by the following non-linear function:

$$U = U_c \left( \frac{I}{I_c} \right)^n \quad (\text{B.1})$$

where  $I_c$  is critical current. Constant  $U_c$  is correlated to the electric field as

$$U_c = LE_c \quad (\text{B.2})$$

where  $L$  is the voltage tap distance and  $E_c$  is the electric field. Combining Equations (B.1) and (B.2), the following mathematical expression for experimental determination of critical current is obtained:

$$I_c = (LE_c)^{\frac{1}{n}} U^{-\frac{1}{n}} I \quad (\text{B.3})$$

### B.3 Operation for the retained $I_c$ measurement

The first  $I_c$  measurement is carried out for the original tape. Critical current ( $I_{c1}$ ) is determined from the four measurands  $L_1$ ,  $U_1$ ,  $I_1$  and  $n_1$  as

$$I_{c1} = (L_1 E_c)^{\frac{1}{n_1}} U_1^{-\frac{1}{n_1}} I_1. \quad (\text{B.4})$$

The second  $I_c$  measurement is repeated for the bent tape, which was subjected to double bending treatment with a diameter of  $D$ . Critical current  $I_{c2}$  is given by the equation

$$I_{c2} = (L_2 E_c)^{\frac{1}{n_2}} U_2^{-\frac{1}{n_2}} I_2. \quad (\text{B.5})$$

Then according to the definition, the following quotient is calculated to evaluate the degree of retained critical current:

$$f = \frac{I_{c2}}{I_{c1}} = \frac{(L_2 E_c)^{\frac{1}{n_2}} U_2^{-\frac{1}{n_2}} I_2}{(L_1 E_c)^{\frac{1}{n_1}} U_1^{-\frac{1}{n_1}} I_1}. \quad (\text{B.6})$$

Equation (B.6) is the mathematical expression to determine the degree of retained critical current due to the double bending treatment. Here eight measurands appear in Equation (B.6), each of which is accompanied by standard uncertainty.

### B.4 Combined standard uncertainty

Combined standard uncertainty for Equation (B.6) is given as

$$u_c^2 = \sum_{j=1}^2 \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial L_j} \right)^2 u_{1j}^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial U_j} \right)^2 u_{2j}^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial I_j} \right)^2 u_{3j}^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial n_j} \right)^2 u_{4j}^2 \right] \quad (\text{B.7})$$

where  $j = 1$  and  $2$  indicates measurement before and after double bending treatment. Sensitivity coefficient in Equation (B.7) is given as:

$$c_{1j} = \frac{\partial f}{\partial L_j} = \frac{(-1)^{j-1}}{n_j L_j} f \quad (\text{B.8})$$

$$c_{2j} = \frac{\partial f}{\partial U_j} = -\frac{(-1)^j}{n_j U_j} f \quad (\text{B.9})$$

$$c_{3j} = \frac{\partial f}{\partial I_j} = \frac{(-1)^{j-1}}{I_j} f \quad (\text{B.10})$$

$$c_{4j} = \frac{\partial f}{\partial n_j} = \left( \frac{1}{U_j} - \frac{1}{L_{1j} E_c} \right) \cdot \frac{(-1)^{j-1}}{n_j^2} f \quad (\text{B.11})$$

The fourth term  $c_{4j}$  is not considered in this evaluation, because it is very small and its contribution to the results is negligible.

## B.5 Evaluation of standard uncertainty (SU) for each measurand

### B.5.1 Voltage tap length ( $L$ )

Distance was measured by using a slide calliper with a minimum scale of 50  $\mu\text{m}$ . Standard uncertainty is given as

$$u_{111} = u_{121} = \frac{0,025}{\sqrt{3}} = 1,44 \times 10^{-2} \quad [\text{mm}]. \quad (\text{B.12})$$

The voltage tap is not a point contact, but an area contact with the tape. When its width along the tape axis is  $w_V$ , standard uncertainty is given as:

$$u_{112} = u_{122} = \frac{2 \times 1}{\sqrt{3}} = 1,15 \quad [\text{mm}] \quad (\text{B.13})$$

where  $w_V = 2 \text{ mm}$  is assumed. Combined standard uncertainty is given by the equation

$$u_{11} = u_{12} = \sqrt{u_{111}^2 + u_{112}^2} = \sqrt{u_{121}^2 + u_{122}^2} = 1,15 \quad [\text{mm}]. \quad (\text{B.14})$$

Two sensitivity coefficients  $c_{11}$  and  $c_{12}$  are  $0,943 \times 10^{-3} \text{ 1/mm}$  where  $D = 50 \text{ mm}$ ,  $L_1 = 50 \text{ mm}$  and  $n = 20$ , as calculated by Equation (B.8) and  $\langle I_c / I_{c0} \rangle$  shown in Table A.2.

### B.5.2 Voltage ( $U$ )

SU is evaluated for a voltage of 5  $\mu\text{V}$  as a precondition. When the recommended scanning time from zero to  $I_c$  is 10 s in the case of constant sweep rate according to the International Standard [2], the changing rate of voltage at approximate critical current is given by

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dU}{dI} \frac{dI}{dt} = \frac{nU_c}{I_c} \frac{I_c}{10} = \frac{nU}{10} = \frac{20 \times 5}{10} = 10 \text{ } [\mu\text{V/s}]. \quad (\text{B.15})$$

Since the voltage was measured using a digital voltmeter (Keithley 1801<sup>2</sup>) in the full scale range of 20  $\mu\text{V}$  with a sampling rate of 60 ms, standard uncertainty can be given as

$$u_{2j} = \frac{10 \times \frac{0,06}{2}}{\sqrt{3}} = 0,173 \text{ } [\mu\text{V}] \quad (\text{B.16})$$

Two sensitivity coefficients  $c_{21}$  and  $c_{22}$  are  $0,943 \times 10^{-2} \text{ } [1/\mu\text{V}]$  where  $D = 50 \text{ mm}$ ,  $U = 5 \mu\text{V}$  and  $n = 20$ , as calculated by Equation (B.8) and  $\langle I_c/I_{c0} \rangle$  shown in Table A.2.

### B.5.3 Current ( $I$ )

Three factors influencing current measurement originate from the voltage measurement, the temperature of the liquid nitrogen bath and the diameter of the bending tool. Their combined SU is expressed as

$$c_{3j}^2 u_{3j}^2 = \left( \frac{\partial f}{\partial U} \right)^2 u_{3j1}^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial T} \right)^2 u_{3j2}^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial D} \right)^2 u_{3j3}^2. \quad (\text{B.17})$$

SU is evaluated at  $f = 0,942$ . Current measurement was carried out using a shunt resistor with  $R_s = 1 \text{ m}\Omega$ . A voltage of 207 mV was measured using a digital voltmeter in the full scale range of 1 000 mV with a 20 ms sampling time.

$$\frac{dU}{dt} = \frac{207}{10} = 20,7 \text{ } [\text{mV/s}]. \quad (\text{B.18})$$

Accordingly, SU is given as

$$u_{311} = \frac{20,7 \times \frac{0,02}{2}}{\sqrt{3}} = 1,19 \times 10^{-1} \text{ } [\text{mV}] \quad (\text{B.19})$$

and  $u_{321} = 1,19 \times 10^{-1} \text{ mV}$ .

$$c_{3j1} = \frac{\partial f}{\partial U} = \frac{\partial f}{\partial I} \frac{\partial I}{\partial U} = \frac{(-1)^{j-1}}{I_j} f \frac{1}{R_s} = 1 \text{ } [1/\text{mV}] \quad (\text{B.20})$$

Critical current is highly temperature dependent. According to preliminary measurement as shown in Figure A.5, typical temperature dependence of commercial BSCCO tape is expressed by the equation

$$I_c = [1 - \gamma(T - T_{bo})] I_{co} \quad (\text{B.21})$$

<sup>2</sup> This is an example of a suitable product available commercially. This information is given for the convenience of users of this document and does not constitute an endorsement by IEC of this product.

where  $T_{bo} = 77,355$  K is the boiling point at a standard atmospheric pressure of  $P_o = 101,32$  kPa and  $\gamma$  is a constant. In this case, when  $I_{co} = 207$  A, then  $\gamma = 4,41 \times 10^{-2}$  1/K.

$$c_{312} = c_{322} = \frac{\partial f}{\partial T} = -\gamma = -0,0441 \quad [1/K] \quad (B.22)$$

Recommended maximum temperature difference of the liquid nitrogen bath between two critical current measurements before and after the double bending treatment is  $\Delta T = 0,2$  K. Standard uncertainty is given as

$$u_{312} = u_{322} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,0577 \quad [K] \quad (B.23)$$

According to the preliminary measurement, bending diameter dependence of the critical current is given as

$$I_c = [1 - 2,4 \times 10^{-15} (D_o - D)^8] I_{cDo} \quad (B.24)$$

where  $I_{cDo}$  is the critical current at the diameter  $D_o$ , which was evaluated as 97 mm. Equation (B.24) was obtained from the curve fitting with the experimental data as shown in Figure B.2. The sensitivity coefficient is given as

$$c_{323} = \frac{\partial f}{\partial D} = 1,92 \times 10^{-14} (D_o - D)^7 \quad (B.25)$$

Here  $c_{313} = 0$  because  $D$  is presumed to be  $D_o$  before bending treatment. The value of  $c_{323}$  is  $9,72 \times 10^{-3}$  1/mm for  $D = 50$  mm,  $1,82 \times 10^{-3}$  1/mm for  $D = 60$  mm, and  $7,88 \times 10^{-6}$  1/mm for  $D = 80$  mm, respectively. The total error of bending treatment is thought to be equivalent to the inaccuracy of the bending diameter. When  $\Delta D = 4,0$  mm, SU is given as

$$u_{313} = u_{323} = \frac{2,0}{\sqrt{3}} = 1,154 \quad [mm]. \quad (B.26)$$

**Table B.2 – Partial sum (Equation (B.17) of standard uncertainty as related to the current measurement)**

| $j$ | $c_{3j} u_{3j}$ |             |             |
|-----|-----------------|-------------|-------------|
|     | $D = 50$ mm     | $D = 60$ mm | $D = 80$ mm |
| 1   | 0,0026          | 0,0026      | 0,0026      |
| 2   | 0,0115          | 0,00335     | 0,0026      |

## B.6 Evaluation of combined standard uncertainty

Table B.3 shows the sensitivity coefficient ( $c_{ij}$ ), type-B standard uncertainty ( $u_{ij}$ ) and their product for all components related to the combined standard uncertainty. Table B.3 indicates that the major contribution is derived from the terms of bending diameter and measuring temperature.

Combined standard uncertainty is obtained from Equation (B.7) from the results listed in Table B.4. Relative standard uncertainty (RSU) is defined as  $u_c$  divided by the average of the critical currents before and after bending treatment.

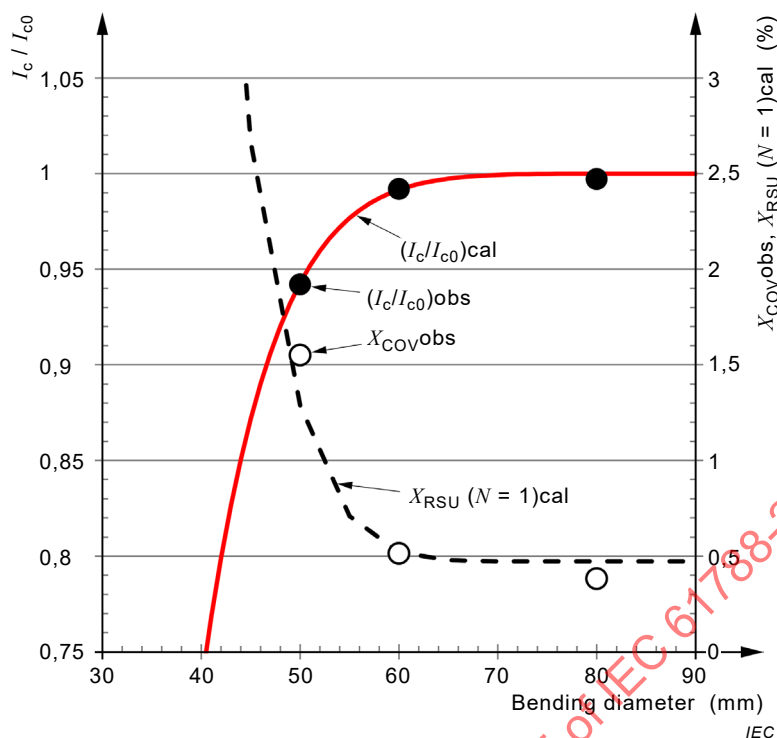
**Table B.3 – Budget table of standard uncertainty for each component**

| Component |                      | <i>i</i> | <i>J</i> | $C_{ij}$                   | $u_{ij}$ | $c_{ij}u_{ij}$         |
|-----------|----------------------|----------|----------|----------------------------|----------|------------------------|
| <i>L</i>  |                      | 1        | 1        | $9,43 \times 10^{-4}$ 1/mm | 1,15 mm  | $1,09 \times 10^{-3}$  |
|           |                      |          | 2        | $9,43 \times 10^{-4}$ 1/mm | 1,15 mm  | $1,09 \times 10^{-3}$  |
| <i>U</i>  |                      | 2        | 1        | $9,43 \times 10^{-3}$ 1/μV | 0,173 μV | $1,63 \times 10^{-3}$  |
|           |                      |          | 2        | $9,43 \times 10^{-3}$ 1/μV | 0,173 μV | $1,63 \times 10^{-3}$  |
| <i>I</i>  | <i>R<sub>S</sub></i> | 3(1)     | 1        | $4,55 \times 10^{-3}$ 1/mΩ | 0,119 mV | $5,44 \times 10^{-4}$  |
|           |                      |          | 2        | $4,83 \times 10^{-3}$ 1/mΩ | 0,119 mV | $-5,77 \times 10^{-4}$ |
|           | <i>T</i>             | 3(2)     | 1        | -0,044 1/K                 | 0,0577 K | $-2,55 \times 10^{-3}$ |
|           |                      |          | 2        | -0,044 1/K                 | 0,0577 K | $-2,55 \times 10^{-3}$ |
|           | <i>D</i>             | 3(3)     | 1        | 0                          | -        |                        |
|           |                      |          | 2        | -0,00972 1/mm              | 1,15 mm  | -0,0112                |

Here the listed evaluation is for a bending diameter of 50 mm.

**Table B.4 – Combined standard uncertainty**

| <i>D</i> [mm] | 50    | 60     | 80     |
|---------------|-------|--------|--------|
| $u_C$ [A]     | 0,012 | 0,0051 | 0,0047 |
| $X_{RSU}$ [%] | 1,28  | 0,52   | 0,47   |



**Key**

cal      calculation  
obs      observation

**Figure B.2 – Bending diameter dependence of the retained  $I_c$  and  $\langle X_{COV} \rangle$ , where the calculated curve of  $I_c/I_{c0}$  gives Equation (B.24)**

$X_{RSU}$  listed in Table B.4 is logically the same as  $\langle X_{COV} \rangle$  shown in Figure B.2 and listed in Table A.2. Both data sets are in the same order. The rate of increase of  $X_{RSU}$  and  $\langle X_{COV} \rangle$  becomes greater as the bending diameter decreases. However,  $\langle X_{COV} \rangle$  is confirmed to be small, occupying 1 % to 2 % in the 95 % retained  $I_c$  range.

## Bibliography

- [1] YAMADA, Y., NISHIJIMA, G., OSAMURA, K., SHIN, H-S., GOLDACKER, W., BRESCHI, M. and RIBANI, P. International round robin test of the retained critical current after double bending at room temperature of Ag-sheathed Bi-2223 superconducting wires. *Supercond. Sci. and Technol.* 29 (2016), 025010
- [2] IEC 61788-3, *Superconductivity – Part 3: Critical current measurement – DC critical current of Ag- and/or Ag alloy-sheathed Bi-2212 and Bi-2223 oxide superconductors*
- [3] NAITO, T., FUJISHIRO, H. and Yamada, Y. Thermal Conductivity and Thermal Dilatation of Commercial BSCCO Tapes. *IEEE Trans. Appl. Super.* 19 (2009) 3034-3036
- [4] *Properties of Materials at Low Temperature (Phase 1)*, edited by V.J. Johnson, Pergamon Press, 1961
- [5] HAHN, T.A. Thermal expansion of copper from 20 to 800 K – Standard reference material 736. *J. Appl. Phys.* 41 (1970) 5096-5101
- [6] CLARK, A.F., FUJII, G., and RANNEY, M.A. The thermal expansion of several materials for superconducting magnets. *IEEE Trans. Magn.* 17 (1981) 2316-2319
- [7] CLARK A.F. Chapter 3, in *Materials at Low Temperature* (1983) ASM International, Materials Park, Ohio, pp. 96-97
- [8] ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

---

## SOMMAIRE

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| AVANT-PROPOS .....                                                                                                      | 32 |
| INTRODUCTION.....                                                                                                       | 34 |
| 1 Domaine d'application .....                                                                                           | 35 |
| 2 Références normatives .....                                                                                           | 35 |
| 3 Termes et définitions .....                                                                                           | 35 |
| 4 Principe .....                                                                                                        | 36 |
| 5 Appareillage .....                                                                                                    | 36 |
| 5.1 Généralités .....                                                                                                   | 36 |
| 5.2 Mandrin de flexion .....                                                                                            | 36 |
| 5.3 Support de mesure du courant critique.....                                                                          | 36 |
| 5.4 Système de mesure du courant critique .....                                                                         | 37 |
| 6 Préparation et configuration de l'éprouvette.....                                                                     | 37 |
| 6.1 Longueur de l'éprouvette .....                                                                                      | 37 |
| 6.2 Montage de l'éprouvette.....                                                                                        | 38 |
| 7 Modes opératoires de mesure.....                                                                                      | 38 |
| 7.1 Mesurage du courant critique.....                                                                                   | 38 |
| 7.2 Double flexion.....                                                                                                 | 39 |
| 7.3 Courant critique retenu après flexion .....                                                                         | 39 |
| 8 Calcul des résultats .....                                                                                            | 39 |
| 8.1 Critères du courant critique.....                                                                                   | 39 |
| 8.2 Valeur $n$ (facultative).....                                                                                       | 40 |
| 9 Rapport d'essai .....                                                                                                 | 40 |
| 9.1 Identification de l'éprouvette d'essai .....                                                                        | 40 |
| 9.2 Consignation des valeurs $I_C$ et/ou du rapport $I_C$ retenu .....                                                  | 40 |
| 9.3 Consignation des conditions d'essai $I_C$ .....                                                                     | 40 |
| Annexe A (informative) Informations complémentaires relatives aux Articles 1 à 9.....                                   | 42 |
| A.1 Généralités .....                                                                                                   | 42 |
| A.2 Condition de mesure .....                                                                                           | 42 |
| A.3 Matériau du support de mesure de l'appareillage .....                                                               | 42 |
| A.4 Préparation de l'éprouvette .....                                                                                   | 45 |
| A.5 Modes opératoires de mesure.....                                                                                    | 45 |
| A.5.1 Mesurage du courant critique.....                                                                                 | 45 |
| A.5.2 Flexion .....                                                                                                     | 47 |
| A.6 Calcul des résultats .....                                                                                          | 48 |
| A.6.1 Critères du courant critique.....                                                                                 | 48 |
| A.6.2 valeur $n$ .....                                                                                                  | 48 |
| A.7 Incertitude type relative.....                                                                                      | 49 |
| Annexe B (informative) Évaluation de l'incertitude type composée pour le courant $I_C$ retenu après double flexion..... | 51 |
| B.1 Méthode pratique de mesure du courant critique.....                                                                 | 51 |
| B.2 Équation modèle.....                                                                                                | 52 |
| B.3 Opération de mesure du courant $I_C$ retenu .....                                                                   | 52 |
| B.4 Incertitude type composée .....                                                                                     | 52 |

|       |                                                                                                                                                                                        |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| B.5   | Évaluation de l'incertitude type (SU – <i>standard uncertainty</i> ) pour chaque mesurande.....                                                                                        | 53 |
| B.5.1 | Longueur des prises de réglage de tension ( $L$ ) .....                                                                                                                                | 53 |
| B.5.2 | Tension ( $U$ ) .....                                                                                                                                                                  | 54 |
| B.5.3 | Courant ( $I$ ).....                                                                                                                                                                   | 54 |
| B.6   | Évaluation de l'incertitude type composée .....                                                                                                                                        | 56 |
|       | Bibliographie.....                                                                                                                                                                     | 58 |
|       | Figure 1 – Porte-échantillon.....                                                                                                                                                      | 37 |
|       | Figure 2 – Caractéristique $U$ - $I$ intrinsèque.....                                                                                                                                  | 40 |
|       | Figure 3 – Caractéristique $U$ - $I$ avec une composante de transfert du courant.....                                                                                                  | 41 |
|       | Figure A.1 – Configuration de mesure pour un conducteur de classe de quelques centaines d'ampères.....                                                                                 | 44 |
|       | Figure A.2 – Attaches .....                                                                                                                                                            | 44 |
|       | Figure A.3 – Déformation supplémentaire provoquée par les fils et les brasures des prises de réglage de tension .....                                                                  | 45 |
|       | Figure A.4 – Température d'ébullition de l'azote liquide par rapport à la pression atmosphérique .....                                                                                 | 46 |
|       | Figure A.5 – Courant critique par rapport à la température pour un fil Bi-2223 typique .....                                                                                           | 47 |
|       | Figure A.6 – Processus de flexion.....                                                                                                                                                 | 48 |
|       | Figure B.1 – Diagramme $U$ - $I$ .....                                                                                                                                                 | 51 |
|       | Figure B.2 – Dépendance du courant retenu $I_C$ par rapport au diamètre de flexion et $\langle X_{COV} \rangle$ , où la courbe calculée de $I_C/I_{C0}$ donne l'Equation (B.24). ..... | 57 |
|       | Tableau A.1 – Données de dilatation thermique des supraconducteurs Bi-2223 et matériaux sélectionnés .....                                                                             | 43 |
|       | Tableau A.2 – Moyenne du degré de courant critique retenu ( $I_C/I_{C0}$ ), incertitude type relative et coefficient de variance.....                                                  | 50 |
|       | Tableau B.1 – Condition préalable d'évaluation de l'incertitude type .....                                                                                                             | 51 |
|       | Tableau B.2 – Somme partielle (Équation (B.17) de l'incertitude type associée au mesurage du courant).....                                                                             | 56 |
|       | Tableau B.3 – Bilan de l'incertitude type pour chaque composante .....                                                                                                                 | 56 |
|       | Tableau B.4 – Incertitude type composée .....                                                                                                                                          | 56 |

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

## SUPRACONDUCTIVITÉ –

**Partie 24: Mesurage du courant critique –  
Courant critique retenu après double flexion à température  
ambiante des fils supraconducteurs Bi-2223 avec gaine Ag**

## AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. À cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). 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 l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC 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 l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 61788-24 a été établie par le Comité d'études 90 de l'IEC: Supraconductivité.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

| FDIS        | Rapport de vote |
|-------------|-----------------|
| 90/402/FDIS | 90/406/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 internationale.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

**IMPORTANT – Le logo "*colour inside*" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.**

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-24:2018

## INTRODUCTION

La découverte d'une nouvelle classe de supraconducteurs en oxyde de cuivre, Bi-Sr-Ca-Cu-O, à haute température critique ( $T_c$ ) date de 1988. Au terme de près de trois décennies, le supraconducteur  $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (Bi-2223) est utilisé désormais comme un fil supraconducteur à haute  $T_c$  disponible dans le commerce.

Les fils supraconducteurs sont souvent soumis à une déformation par flexion lors de leur fabrication et de leur application, par exemple, lors de la fabrication des fils, la construction d'aimants, la fabrication de câbles, etc. Le fil est courbé à son sommet et à sa base lorsqu'il passe par plusieurs poulies. Ces procédés de fabrication sont effectués à température ambiante. Ce type de flexion influe vraisemblablement sur le courant critique du fil qui peut être accompagné d'une dégradation irréversible en cas de déformation importante. La méthode d'évaluation la plus facile de l'influence de la flexion sur le courant critique consiste à effectuer un mesurage comparatif avec le fil dressé avant et après flexion selon un diamètre spécifique.

Après intégration du fil dans une bobine ou un câble, la mesure du courant critique s'effectue souvent dans des conditions de flexion ou dans un état de déformation plus complexe. Dans ces cas, la variation du courant critique peut inclure des contributions tant réversibles qu'irréversibles selon le degré de déformation. Une dégradation irréversible provient généralement d'une rupture du composant supraconducteur. La mesure du courant critique retenu après un nouveau dressage du fil déformé s'avère nécessaire pour évaluer les seules contributions irréversibles.

Le diamètre de flexion critique au-dessous duquel les performances du fil se dégradent de manière considérable est typiquement spécifié pour l'utilisation d'un fil supraconducteur disponible dans le commerce. Ainsi, la normalisation des méthodes de mesure applicables au courant critique retenu est importante après une double flexion. Le présent document peut être appliqué à d'autres essais de flexion similaires tels qu'une flexion simple, une flexion cyclique, etc.

Le présent document comporte deux technologies fondamentales du mesurage du courant critique et du processus de double flexion.

## SUPRACONDUCTIVITÉ –

### Partie 24: Mesurage du courant critique – Courant critique retenu après double flexion à température ambiante des fils supraconducteurs Bi-2223 avec gaine Ag

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61788 décrit une méthode d'essai permettant de déterminer le courant critique retenu après double flexion à température ambiante de fils supraconducteurs rectilignes courts Bi-2223 avec gaine Ag et/ou en alliage d'Ag, ayant la forme d'une bande plate ou carrée et contenant des noyaux simples ou plusieurs noyaux d'oxydes. Les fils peuvent être stratifiés avec des bandes en alliage de cuivre, en acier inoxydable ou en alliage de Ni.

La méthode d'essai est destinée à être utilisée avec des supraconducteurs ayant un courant critique inférieur à 300 A et une valeur  $n$  supérieure à 5. L'essai de détermination du courant critique retenu est effectué sans champ magnétique appliqué, avec l'éprouvette en immersion dans un bain ouvert d'azote liquide.

#### 2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60050-815:2015, *Vocabulaire Electrotechnique International – Partie 815: Supraconductivité* (disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>)

#### 3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'IEC 60050-815, ainsi que les suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

##### 3.1

##### **double flexion**

flexion dans une direction selon un certain diamètre, suivie d'une autre flexion dans la direction opposée selon le même diamètre

Note 1 à l'article: Le diamètre de flexion est défini comme le diamètre du mandrin de flexion.

Note 2 à l'article: Le diamètre de flexion est défini en principe comme la somme du diamètre du mandrin et de l'épaisseur du supraconducteur. En ingénierie toutefois, il convient également de tenir compte du diamètre minimum des poulies par lesquelles passe le fil.

### 3.2

#### **méthode à vitesse de balayage constante**

méthode d'acquisition des données de tension-courant (données  $U-I$ ) selon laquelle un courant balaye à vitesse constante l'étendue entre 0 et une valeur supérieure au courant critique ( $I_c$ ) tout en acquérant de manière continue ou fréquemment et de façon périodique des données  $U-I$

### 3.3

#### **méthode de variation et de maintien**

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

## 4 Principe

Le principe de la méthode à double flexion est décrit comme suit. Le courant critique à 77 K en champ propre doit être mesuré dans une configuration rectiligne sans contrainte mécanique. Après mesurage, l'éprouvette doit être chauffée jusqu'à la température ambiante.

Elle doit ensuite être courbée dans une direction selon le diamètre spécifié, puis redressée pour redevenir rectiligne. Successivement, l'éprouvette doit être courbée dans la direction opposée selon le même diamètre, puis redressée pour redevenir rectiligne.

Le courant critique de l'éprouvette à 77 K en champ propre doit être mesuré après double flexion et dressage. Il convient que l'intervalle de temps entre les mesurages du courant critique avant et après flexion soit le plus court possible.

Le courant critique est déterminé à partir de la caractéristique tension-courant ( $U-I$ ) mesurée dans un bain ouvert d'azote liquide à pression constante. Le courant critique est déterminé comme le courant effectif à un critère spécifique d'intensité de champ électrique (critère de champ électrique) ( $E_c$ ), qui correspond au critère de tension ( $U_c$ ) pour une séparation spécifiée des prises de réglage de tension.

## 5 Appareillage

### 5.1 Généralités

Les appareillages exigés pour les méthodes d'essai actuelles incluent les équipements suivants:

- mandrins avec diamètres de flexion nécessaires;
- système de mesure du courant critique.

### 5.2 Mandrin de flexion

Le diamètre de flexion doit être défini comme le diamètre du mandrin de flexion. La longueur de flexion potentielle doit être supérieure à la distance entre les prises de réglage de tension.

### 5.3 Support de mesure du courant critique

Le support de mesure est constitué d'un matériau isolant.

Le courant critique peut dépendre inévitablement du matériau du support de mesure en raison de la déformation de l'éprouvette provoquée par la différence de contraction thermique entre l'éprouvette et le support.

La structure du support de mesure ne doit pas provoquer de déformation excessive locale. La déformation de l'éprouvette provoquée par la différence de contraction thermique entre l'éprouvette et le support lors du refroidissement de la température ambiante à 77 K doit être réduite le plus possible pour correspondre à  $\pm 0,1 \%$ . Cette déformation thermique peut être évaluée dans les cas où les coefficients de dilatation thermique des matériaux constitutifs sont connus. Pour réduire le plus possible la déformation thermique, le support doit être constitué d'un matériau dont la contraction thermique est similaire à celle de l'éprouvette.

NOTE Les matériaux constitutifs recommandés du support de mesure sont décrits en A.3.

## 5.4 Système de mesure du courant critique

L'appareillage de mesure des caractéristiques  $U-I$  se compose d'une sonde pour éprouvette, d'un bain ouvert d'azote liquide et d'un système de mesure  $U-I$ .

La sonde pour éprouvette, qui se compose d'une éprouvette, d'un support de mesure et d'une structure d'appui, est insérée dans le bain ouvert rempli d'azote liquide. Le système de mesure  $U-I$  se compose d'une source de courant continu, d'un enregistreur et des préamplificateurs, filtres ou voltmètres nécessaires, ou d'une combinaison de ces éléments.

Un système d'acquisition de données informatisé est recommandé.

## 6 Préparation et configuration de l'éprouvette

### 6.1 Longueur de l'éprouvette

La longueur ( $L$ ) de l'éprouvette à mesurer doit être déterminée comme suit (voir Figure 1):

$$L = 2 \times L_2 + 2 \times L_4 + L_1 + 2 \times L_3 > 5 \times W \quad (1)$$

$$L_1 \geq W, L_2 \geq W, L_3 \geq W \quad (2)$$

où

$L_1$  est la distance entre les prises de réglage de tension;

$L_2$  est la longueur du contact de courant;

$L_3$  est la distance la plus courte entre le contact de courant et la prise de réglage de tension;

$L_4$  est la largeur de la prise de réglage de tension;

$W$  est la largeur de l'éprouvette à mesurer.

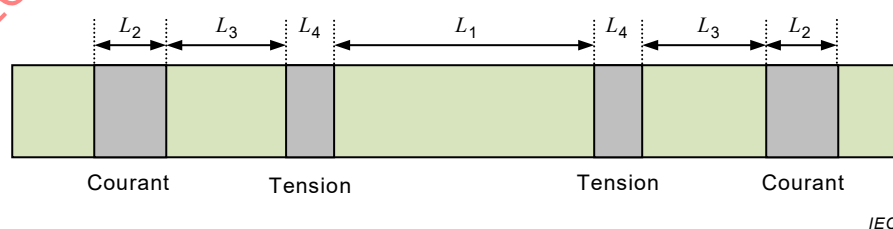


Figure 1 – Porte-échantillon

Pour une éprouvette présentant un rapport courant permanent admissible/largeur plus grand, la longueur  $L_2$  doit être supérieure à  $3W$ . Dans les cas où l'éprouvette est stratifiée avec de l'acier inoxydable ou un autre matériau hautement résistif, la longueur  $L_2$  doit être plus grande. Pour un mesurage qui exige une sensibilité en tension plus élevée, la distance  $L_1$  doit être plus grande. Dans les cas où la tension de transfert du courant ne peut être ignorée, la distance  $L_3$  doit être plus grande.

Le Tableau 2 mentionné en [1]<sup>1</sup> présente cinq conditions d'essai de double flexion satisfaisant. Généralement, la longueur de l'éprouvette  $L$  varie entre 90 mm et 150 mm,  $L_1$  entre 18,25 mm et 50 mm,  $L_2$  entre 10 mm et 20 mm,  $L_3$  entre 12,5 mm et 20 mm, et  $L_4$  entre 1,75 mm et 11 mm. Pour l'essai d'un fil Bi-2223 stratifié en acier inoxydable ou en alliage de nickel, il convient que la longueur  $L_2$  soit suffisamment grande pour éviter un échauffement local.

## 6.2 Montage de l'éprouvette

L'éprouvette doit être montée sur la surface plane du porte-éprouvette et ses deux extrémités doivent être fixées aux blocs de contact du courant sans brasure, tel que décrit en A.3. Tant que les surfaces d'injection du courant circulant dans le fil ne sont pas situées dans la zone à soumettre à flexion, elles peuvent également être brasées si cela est souhaité.

Les prises de réglage de tension doivent être placées dans la section centrale de l'éprouvette, libre de tout matériau qui ne peut être retiré.

NOTE La méthode à prises de réglage de tension recommandée est décrite en A.3.

Les conducteurs de tension doivent être torsadés le plus près possible des prises de réglage de tension.

## 7 Modes opératoires de mesure

### 7.1 Mesurage du courant critique

Le courant critique doit être mesuré dans des conditions qui évitent toute contrainte mécanique supplémentaire.

L'éprouvette doit être immergée lentement dans le bain d'azote liquide. Elle doit être refroidie de la température ambiante à la température de l'azote liquide pendant au moins quelques dizaines de secondes.

Lors de l'application de la méthode à vitesse de balayage constante, le taux de variation doit être réglé de sorte que  $I_c$  et la valeur  $n$  ne dépendent pas de lui.

Lors de l'application de la méthode de variation et de maintien, la vitesse de balayage du courant entre ses points de consigne doit être inférieure à la variation équivalente entre un courant nul et  $I_c$  en 3 s. L'acquisition des données à chaque point de consigne doit commencer dès que la tension de débit/fluage produite par la variation de courant peut être ignorée. La dérive du courant pour chaque point de consigne qui lui est associé doit être inférieure à 1 % de  $I_c$ .

Les caractéristiques  $U-I$  sont mesurées et enregistrées à des valeurs de courant croissantes.

La tension de référence de la caractéristique  $U-I$  doit être déterminée comme la tension enregistrée à un courant nul pour la méthode de variation et de maintien ou la tension moyenne à environ  $0,1 I_c$  pour la méthode à vitesse de balayage constante.

Après mesurage, l'éprouvette doit être chauffée jusqu'à la température ambiante.

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

## 7.2 Double flexion

À la température ambiante, une extrémité de l'éprouvette doit être fixée à un mandrin d'un diamètre spécifique et l'éprouvette doit être courbée le long du mandrin de l'extrémité fixe à l'extrémité libre, tel que représenté en A.5.2. La section de flexion doit inclure toute la longueur comprise entre les prises de réglage de tension.

Ultérieurement, l'éprouvette doit être libre de toute flexion.

L'éprouvette doit être retournée et fixée à nouveau sur le mandrin avec le même diamètre, puis courbée le long du mandrin entre son extrémité fixe et son extrémité libre.

Enfin, l'éprouvette doit être dressée.

## 7.3 Courant critique retenu après flexion

Le courant critique doit être mesuré dans une configuration rectiligne sans aucune contrainte mécanique autre que le dressage auquel est soumise l'éprouvette par suite de la déformation plastique provoquée par la flexion précédente.

Le mesurage du courant critique doit être effectué selon le même mode opératoire que celui décrit en 7.1.

Le mesurage doit être effectué dans un bain ouvert d'azote liquide et dans un intervalle de temps le plus court possible entre les mesurages du courant critique avant et après le traitement de flexion. Étant donné que le courant critique dépend fortement de la température, toute variation de température doit être évitée avant et après la flexion. Une analyse détaillée est fournie en A.5.1.

## 8 Calcul des résultats

### 8.1 Critères du courant critique

Le courant critique  $I_c$  doit être déterminé en utilisant le critère de champ électrique  $E_c$ .

La valeur de  $I_c$  doit être déterminée en appliquant les critères de 100  $\mu\text{V/m}$  et/ou 10  $\mu\text{V/m}$ .

La valeur de  $I_c$  doit être déterminée comme le courant correspondant au point sur la courbe  $U-I$  où la tension  $U_c$  est mesurée par rapport à la tension de référence (voir Figure 2 et Figure 3):

$$U_c = L_1 E_c \quad (3)$$

où

$U_c$  est le critère de tension en microvolts ( $\mu\text{V}$ );

$L_1$  est la séparation des prises de réglage de tension en mètres (m);

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

où  $U_c$  et  $I_c$  sont les valeurs correspondantes de tension et de courant au point d'intersection des droites avec la courbe  $U-I$  tel que représenté à la Figure 2.

Une droite doit être tracée entre la tension de référence et la tension moyenne proche de  $0,5 I_c$  (voir Figure 3). La pente finie de cette droite doit avoir pour origine le transfert de courant et/ou un dommage local de l'échantillon. La détermination valide de  $I_c$  exige que la pente de la droite soit inférieure à  $0,3 U_c/I_c$ , où  $U_c$  et  $I_c$  sont déterminées en appliquant les critères de 100  $\mu\text{V/m}$  et/ou 10  $\mu\text{V/m}$ .

## 8.2 Valeur $n$ (facultative)

La valeur  $n$  doit être calculée comme la pente du tracé de  $\log U$  par rapport à  $\log I$  dans la région comprise entre  $100 \mu\text{V/m}$  et  $10 \mu\text{V/m}$ .

## 9 Rapport d'essai

### 9.1 Identification de l'éprouvette d'essai

L'éprouvette d'essai doit être identifiée par les informations suivantes:

- nom du fabricant de l'éprouvette;
- classification et/ou symbole;
- numéro de lot.

### 9.2 Consignation des valeurs $I_c$ et/ou du rapport $I_c$ retenu

Les valeurs de  $I_c$  avant et après flexion et/ou le rapport  $I_c$  retenu, ainsi que leurs critères et valeurs  $n$  (facultatives) correspondants, doivent être consignés dans le rapport d'essai.

### 9.3 Consignation des conditions d'essai $I_c$

Les conditions d'essai suivantes doivent être consignées dans le rapport d'essai si nécessaire:

- diamètre de flexion ( $D$ );
- méthode de fixation des prises de réglage de courant et de tension (par exemple, attache, sertissage à l'aide d'un bloc de Cu, brasure (pour les courants) ou une autre méthode de connexion);
- longueur de l'éprouvette ( $L$ );
- distance entre les prises de réglage de tension ( $L_1$ );
- distance la plus courte entre un contact de courant et une prise de réglage de tension ( $L_3$ );
- longueur des contacts de courant ( $L_2$ );
- vitesse de balayage lors de l'application de la méthode à vitesse de balayage constante;
- pas de variation, temps de variation et temps de maintien lors de l'application de la méthode de variation et de maintien.

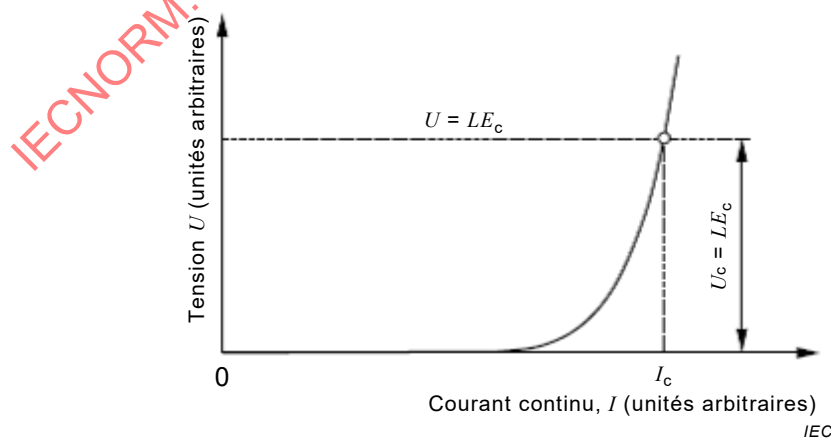


Figure 2 – Caractéristique  $U-I$  intrinsèque

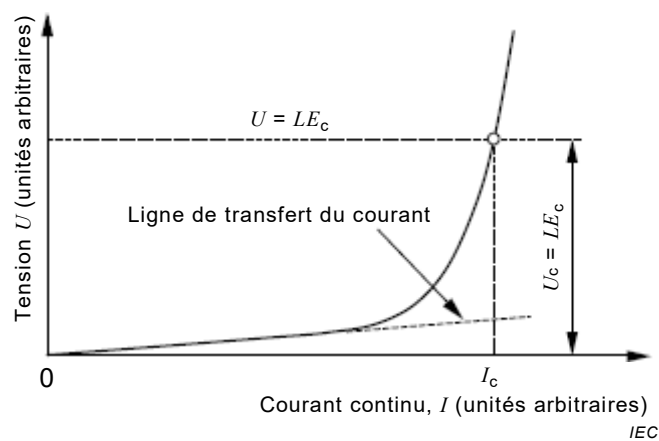


Figure 3 – Caractéristique  $U$ - $I$  avec une composante de transfert du courant

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-24:2018

## **Annexe A** (informative)

### **Informations complémentaires relatives aux Articles 1 à 9**

#### **A.1 Généralités**

De nombreuses variables différentes ont un effet significatif sur la valeur de mesure du courant critique pour les fils supraconducteurs Bi-2223 avec gaine Ag et/ou en alliage d'Ag. Toutefois, des parties importantes de la méthode d'essai traitée dans le présent document sont communes ou analogues à celles de la méthode applicable aux oxydes supraconducteurs Bi (IEC 61788-3 [2]). L'Annexe A traite uniquement de certaines de ces variables. Pour les variables non mentionnées ici, se reporter à l'IEC 61788-3.

Les caractéristiques particulières des oxydes supraconducteurs peuvent être classées en deux groupes. Le premier groupe est spécifique aux oxydes supraconducteurs composites, y compris la fragilité mécanique, les liaisons électromagnétiques faibles, la formation de bulles de gaz cryogénique, la dégradation par vieillissement, le débit et le fluage de flux magnétique, une anisotropie importante, l'hystérésis du courant critique avec balayage de champ magnétique, etc. Le second groupe est associé à la courte longueur de l'éprouvette utilisée dans la norme. Le mesurage du courant critique de ce type d'éprouvette peut facilement détecter des signaux de tension variables dus à une force électromotrice thermique, une tension inductive, un bruit thermique, une redistribution du courant, un déplacement de l'éprouvette par rapport au porte-éprouvette, etc. Des tensions dues au transfert du courant peuvent avoir pour origine la courte distance entre un contact de courant et la prise de réglage de tension.

La mesure des supraconducteurs avec des courants critiques supérieurs à 300 A peut être effectuée en utilisant le présent document avec une exactitude et une précision réduites anticipées, et un effet en champ propre plus important.

Les restrictions spécifiées dans cette méthode d'essai ont été ajoutées afin d'obtenir la précision exigée dans la phase définitive finale de qualification des conducteurs longs.

#### **A.2 Condition de mesure**

La longueur totale minimale de l'éprouvette de bande est égale à cinq fois la largeur de la bande ( $W$ ) plus deux fois la largeur de la prise de réglage de tension ( $L_4$ ), qui représente la somme suivante:

- la séparation minimale des prises de réglage de tension ( $L_1 \geq W$ );
- la longueur des contacts de courant ( $L_2 \geq W$ );
- la plus courte distance entre les contacts de courant et de tension ( $L_3 \geq W$ ).

#### **A.3 Matériau du support de mesure de l'appareillage**

Dans cette méthode, la déformation de l'éprouvette est maintenue à un niveau minimum (moins de 0,1 %). Une contraction thermique de moins de 0,1 % ne produit pas un écart notable de  $I_c$  à 0 T, proche de 77 K. Une source de déformation importante est le déséquilibre des taux de contraction thermique entre le support de mesure et l'éprouvette lorsqu'elle est refroidie à la température de l'azote liquide.

Sur la base des contractions thermiques types présentées dans le Tableau A.1, les matériaux suivants sont recommandés pour le support de mesure. Pour d'autres matériaux constitutifs du support, il convient d'effectuer une étude de qualification préparée avec attention avant de réaliser les essais individuels de série.

Le matériau constitutif recommandé du support est un composite époxyde en fibre de verre, avec l'éprouvette reposant sur le plan de chaîne de la fibre.

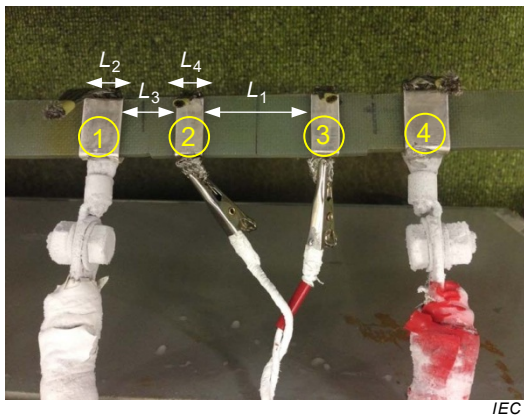
**Tableau A.1 – Données de dilatation thermique des supraconducteurs Bi-2223 et matériaux sélectionnés**

| Matériau                               | $\Delta L/L_{293K-77K} [\%]$ |
|----------------------------------------|------------------------------|
| Bi-2223 avec gaine Ag [3]              | 0,274                        |
| Bi-2223 avec gaine Ag, Au [3]          | 0,293                        |
| Stratifié en alliage de cuivre Bi-2223 | 0,275                        |
| Stratifié en acier inoxydable Bi-2223  | 0,265                        |
| Stratifié en alliage de nickel Bi-2223 | 0,227                        |
| Argent [4]                             | 0,370                        |
| Cuivre [5]                             | 0,302                        |
| GFRP G10, chaîne [6][7]                | 0,21                         |
| GFRP G10, normal [6][7]                | 0,64                         |

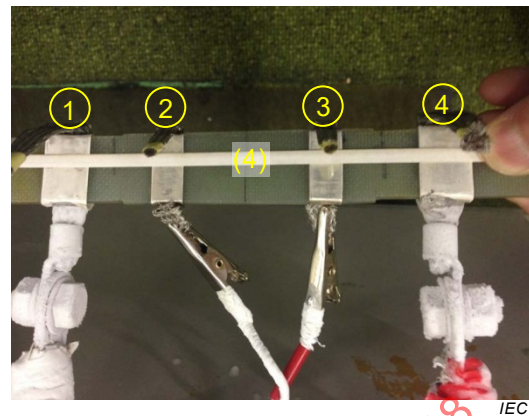
Un exemple de support de mesure est représenté à la Figure A.1.

Comme représenté à la Figure A.1 (a), le porte-échantillon est constitué de quatre blocs de contact à bande en argent (2) fixés au socle époxyde en fibre de verre (1). Les fils tressés (3) sont brasés sur la surface opposée des bandes en argent en tant que prises de réglage de courant et de tension.

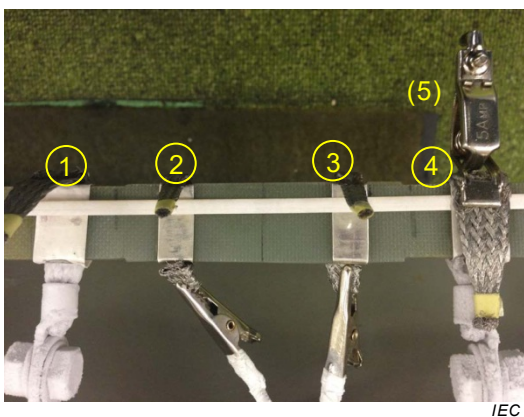
Comme représenté à la Figure A.1 (b), l'éprouvette de bande (4) est disposée sur le porte-échantillon par contact avec les bandes en argent, et recouverte par les fils tressés. La surface recouverte est ensuite serrée fermement au moyen des attaches ((5) en Figure A.1 (c)). Des exemples d'attaches sont représentés à la Figure A.2.



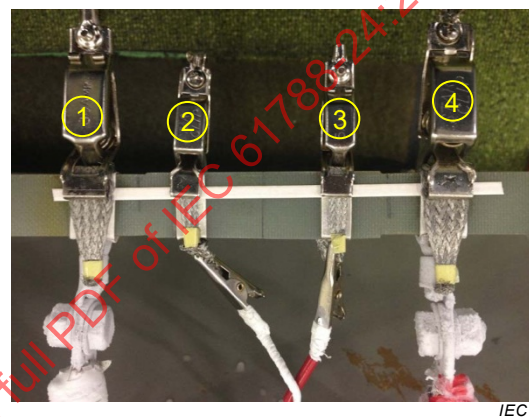
(a) Support de mesure



(b) Éprouvette posée sur le porte-éprouvette



(c) Contact de courant ④ fixé sur l'éprouvette au moyen d'une attache



(d) Tous les contacts fixés sur l'éprouvette au moyen d'attaches

#### Légende

- ①④ contacts de courant
- ②③ prises de réglage de tension

**Figure A.1 – Configuration de mesure pour un conducteur de classe de quelques centaines d'ampères**

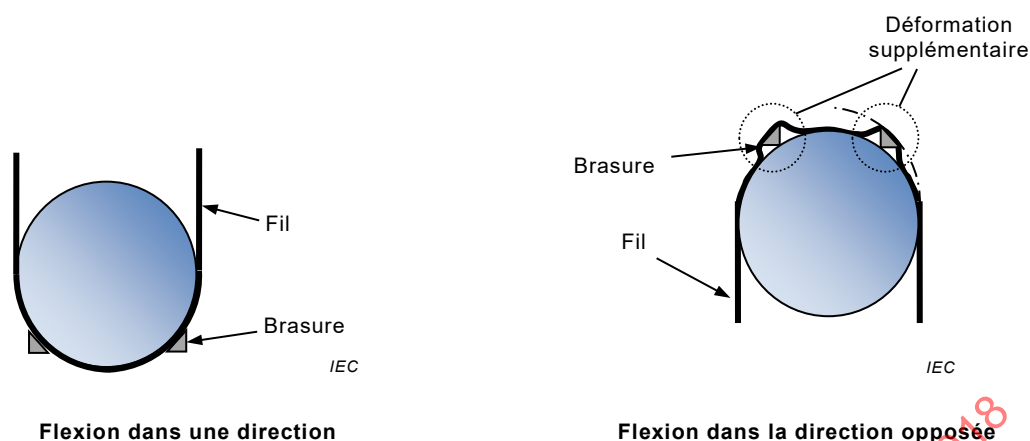


IEC



IEC

**Figure A.2 – Attaches**



**Figure A.3 – Déformation supplémentaire provoquée par les fils et les brasures des prises de réglage de tension**

Il existe une norme de mesure du courant critique (IEC 61788-3) pour un fil BSCCO. L'IEC 61788-3 utilise le brasage pour fixer les prises de réglage de tension. Toutefois, l'utilisation de l'IEC 61788-3 implique une déformation supplémentaire sur le fil à la position brasée, lorsque le fil est courbé et la brasure et les prises de réglage de tension sont retenues entre le fil et le mandrin de flexion. Le présent document dédié au mesurage du courant critique constitue une exception permettant d'éviter toute dégradation supplémentaire du fil provoquée par une déformation.

#### A.4 Préparation de l'éprouvette

La distance entre les prises de réglage de tension est définie comme la plus petite distance entre les contacts de tension, indépendamment de la taille.

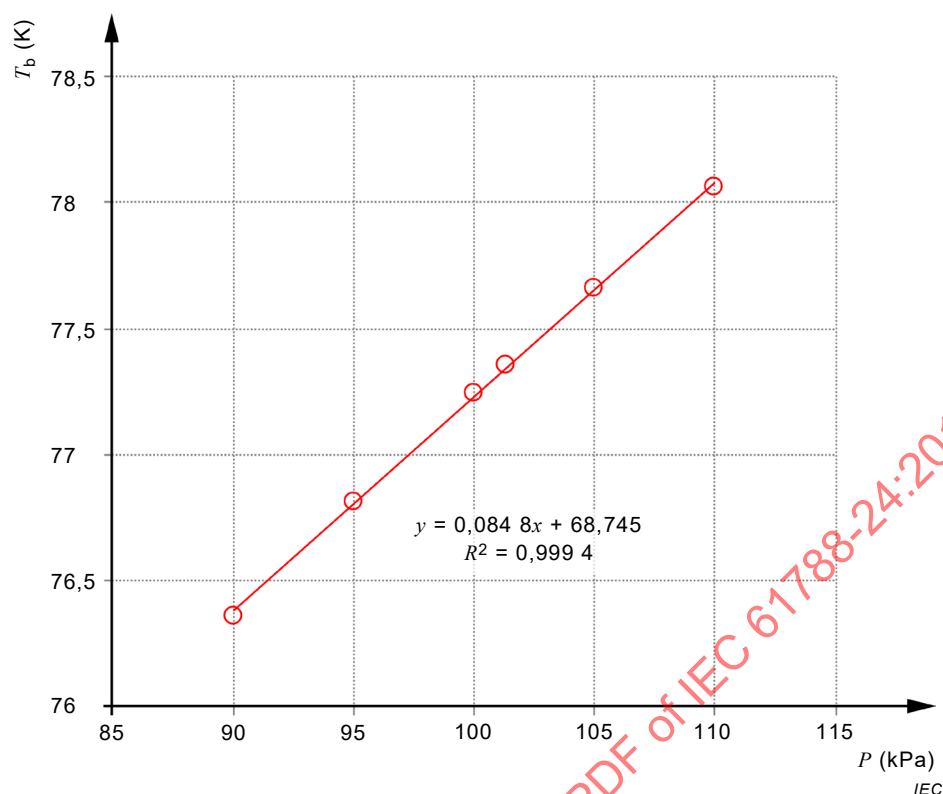
#### A.5 Modes opératoires de mesure

##### A.5.1 Mesurage du courant critique

Pour réduire le potentiel thermoélectrique sur les conducteurs de tension de l'éprouvette, des conducteurs de tension en cuivre issus du bain cryogénique sont utilisés de façon permanente jusqu'à la température ambiante, dans le cas d'un environnement isotherme pour tous les raccords ou connexions à température ambiante. Il convient de noter que les raccords ou connexions immergés dans le bain cryogénique sont isothermes.

La vitesse de refroidissement peut affecter les résultats de mesure du courant critique en raison de vitesses de refroidissement différentes et d'une contraction thermique différente, provoquant une déformation excessive de l'éprouvette.

La pression atmosphérique entraîne la variation de la température d'ébullition de l'azote liquide dans le bain ouvert. La Figure A.4 représente la corrélation entre la température d'ébullition ( $T_b$ ) et la pression atmosphérique ( $P$ ).

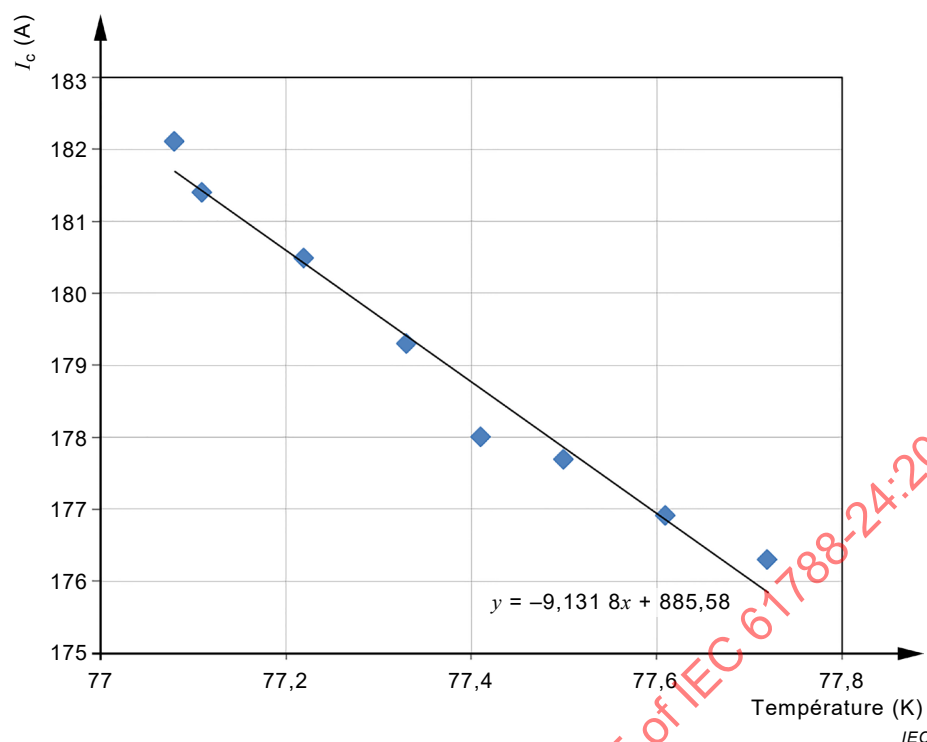


**Figure A.4 – Température d'ébullition de l'azote liquide par rapport à la pression atmosphérique**

Le courant critique des fils Bi-2223 dépend de la température comme cela est représenté à la Figure A.5.

L'objectif du présent document est d'obtenir le rapport des courants critiques avant et après le traitement de flexion. Pour éviter une variation significative de la température du fait de la variation de la pression atmosphérique dans le temps, la durée entre deux mesurages du courant critique doit être la plus courte possible.

Lorsque le bruit de système est important par comparaison avec la valeur de tension spécifiée, c'est-à-dire  $U_c$ , il est souhaitable d'augmenter la durée de variation du courant nul de  $I_c$  à plus de 150 s. Dans ce cas, il convient de veiller à augmenter suffisamment la capacité thermique et/ou à refroidir suffisamment la surface des contacts de courant afin d'éliminer toute influence de la production thermique due à la nécessité d'un temps de mesure plus long. Il convient de noter que la méthode de variation et de maintien permet de calculer la moyenne des données qui peuvent être réparties de façon appropriée le long de la courbe de caractéristiques  $U-I$ .



**Figure A.5 – Courant critique par rapport à la température pour un fil Bi-2223 typique**

La variation du courant d'essai peut induire une tension positive ou négative sur les prises de réglage de tension dans la durée. Cette source de tension perturbatrice lors du processus de variation peut être identifiée par sa dépendance proportionnelle au taux de variation. Si cette tension est significative par comparaison avec  $U_c$ , il est alors recommandé de réduire le taux de variation, de réduire la surface formée par les prises de réglage de tension et l'éprouvette insérée entre elles, ou d'utiliser la méthode de variation et de maintien.

Des taux de variation du courant plus élevés peuvent être utilisés pour l'application de la méthode de variation et de maintien s'il s'avère que le système de mesure produit des résultats cohérents avec un taux de variation spécifique partant d'un courant nul pour atteindre une valeur  $I_c$  dans un délai de 3 s. Il est possible d'obtenir des résultats cohérents avec des taux de variation aussi élevés que 500 A/s dans le cas d'un conducteur avec un courant critique compris entre 10 A et 200 A.

La tension de référence peut inclure des tensions thermoélectriques, de décalage, de boucle de terre et en mode commun. Par hypothèse, ces tensions restent relativement constantes pendant la durée d'enregistrement nécessaire de chaque caractéristique  $U-I$ . La mesure de la tension de référence avant et après le mesurage de la courbe  $U-I$  et l'hypothèse d'une variation linéaire dans la durée permettent de quasiment annuler les faibles variations des tensions thermoélectriques et des tensions de décalage. Lorsque la variation de la tension de référence est importante par comparaison avec la valeur de  $U_c$ , il convient alors de corriger la configuration expérimentale.

### A.5.2 Flexion

Dans ces procédures, le terme «double flexion» fait référence à un seul cycle de flexion avant et arrière. La composante de contrainte en traction appliquée au cours du traitement doit être réduite le plus possible étant donné qu'elle affecte le courant critique de manière significative.

Un exemple de processus de flexion est représenté à la Figure A.6. L'éprouvette est courbée le long du mandrin de l'extrémité fixe à l'extrémité libre ((a) → (b) → (c) → (d)).