

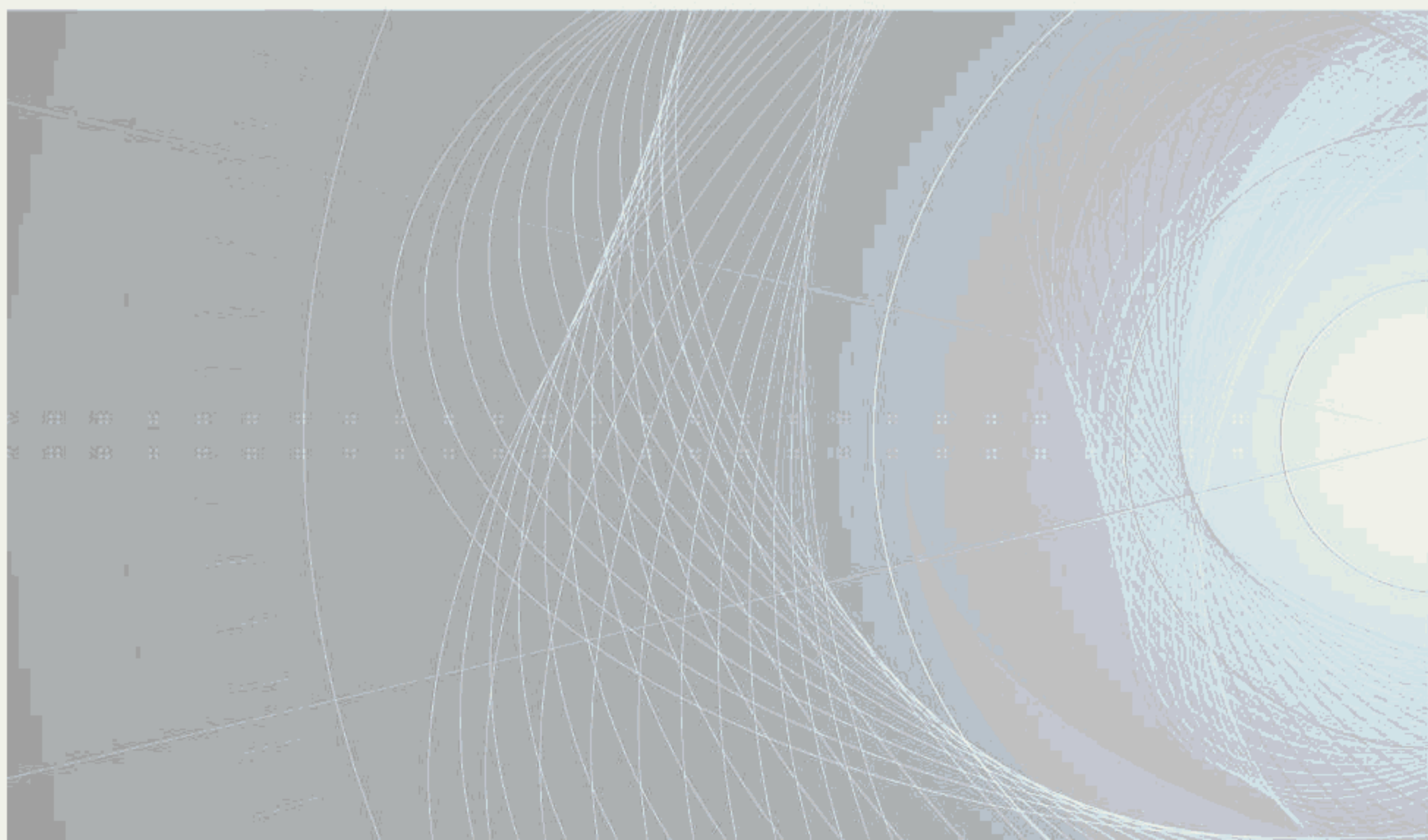
# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE

---

**Superconductivity –  
Part 26: Critical current measurement – DC critical current of RE-Ba-Cu-O  
composite superconductors**

**Supraconductivité –  
Partie 26: Mesurage du courant critique – Courant critique continu des  
composites supraconducteurs de RE-Ba-Cu-O**







**THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED**  
**Copyright © 2020 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 Varembé  
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 corrigendum or an amendment might have been published.

#### **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 once a month by email.

#### **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).

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

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 000 terminological entries 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.

#### **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.

#### **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 une fois par mois par email.

#### **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).

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

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 000 articles terminologiques 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.





IEC 61788-26

Edition 1.0 2020-06

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE

---

**Superconductivity –  
Part 26: Critical current measurement – DC critical current of RE-Ba-Cu-O  
composite superconductors**

**Supraconductivité –  
Partie 26: Mesurage du courant critique – Courant critique continu des  
composites supraconducteurs de RE-Ba-Cu-O**

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

ICS 17.220.20; 19.080; 29.050

ISBN 978-2-8322-8436-0

---

**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 Critical current measuring system .....	8
6 Specimen preparation and setup .....	8
6.1 Length .....	8
6.2 Mounting of the specimen .....	9
7 Critical current measurement .....	9
8 Calculation of results .....	9
8.1 Critical current criteria.....	9
8.2 $n$ -value (optional) .....	11
9 Uncertainty of measurement .....	11
10 Test report .....	11
10.1 Identification of test specimen .....	11
10.2 Reporting of $I_c$ values .....	11
10.3 Reporting of $I_c$ test conditions .....	11
Annex A (informative) Additional information relating to measurement, apparatus, and calculation .....	12
A.1 General information .....	12
A.2 Measurement condition .....	12
A.3 Apparatus .....	13
A.3.1 Measurement holder material .....	13
A.3.2 Measurement holder construction .....	13
A.4 Specimen preparation .....	14
A.5 Measurement procedure .....	14
A.5.1 Voltage leads .....	14
A.5.2 Cooling process .....	14
A.5.3 Temperature of liquid nitrogen bath .....	14
A.5.4 System noise and other contributions to the measured voltage .....	15
A.6 Calculation of $n$ -value .....	16
Annex B (informative) Evaluation of combined standard uncertainty for REBCO $I_c$ measurement [8] .....	17
B.1 Practical critical current measurement .....	17
B.2 Model equation .....	18
B.3 $I_c$ measurement results .....	19
B.4 Combined standard uncertainty [11] .....	21
B.5 Type B uncertainty evaluation .....	22
B.5.1 General .....	22
B.5.2 Uncertainty of $L_1$ measurement .....	22
B.5.3 Uncertainty of voltage measurement .....	22

B.5.4	Uncertainty of current measurement .....	23
B.5.5	Uncertainty of temperature measurement .....	23
B.5.6	Uncertainty coming from intrinsic non-uniformity of $I_c$ .....	24
B.5.7	Comparison between types A and B combined standard uncertainties .....	25
B.6	Influence of current ramp rate on the total uncertainty .....	26
Bibliography .....		27
Figure 1	– Schematic view of measurement setup .....	9
Figure 2	– Intrinsic $U-I$ characteristic .....	10
Figure 3	– $U-I$ curve with a current transfer component .....	10
Figure A.1	– Illustration of a measurement configuration for a short specimen of a few hundred amperes class REBCO conductor .....	13
Figure A.2	– Temperature dependence of $I_c$ for commercial REBCO superconductors (data from [9]) .....	14
Figure A.3	– Pressure dependence of boiling temperature of liquid nitrogen .....	15
Figure B.1	– Typical circuit to measure $I_c$ .....	17
Figure B.2	– Typical voltage–current ( $U-I$ ) characteristic of a superconductor .....	18
Figure B.3	– Ramp time dependence of total RSU of $I_c$ for conductors B, C, and D .....	26
Table A.1	– Thermal contraction data of superconductor and sample -holder materials [1] .....	13
Table B.1	– Conductors distributed in the international RRT .....	19
Table B.2	– $I_c$ data for conductor A .....	19
Table B.3	– $I_c$ data for conductor B .....	20
Table B.4	– $I_c$ data for conductor C .....	20
Table B.5	– $I_c$ data for conductor D .....	20
Table B.6	– Statistics for each conductor .....	21
Table B.7	– ANOVA results for each conductor .....	21
Table B.8	– Atmospheric pressure from 1 January 2014 to 31 December 2014 .....	24
Table B.9	– Intrinsic $I_c$ non-uniformity evaluated by RTR-SHPM .....	24
Table B.10	– Budget table of SUs of $I_c$ measurements for conductor C .....	25
Table B.11	– Comparison of the relative standard uncertainties for conductors B, C, and D .....	25

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

## SUPERCONDUCTIVITY –

**Part 26: Critical current measurement –  
DC critical current of RE-Ba-Cu-O composite superconductors**

## FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC 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 61788-26 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity.

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

FDIS	Report on voting
90/455/FDIS	90/458/RVD

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

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

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

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

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



## INTRODUCTION

In 1986, superconductivity in some perovskite type materials containing copper oxides at temperatures far above the critical temperatures of metallic superconductors was discovered.

In 1987, it was discovered that Y-Ba-Cu-O (YBCO) has a critical temperature ( $T_c$ ) of 93 K. After a quarter century, the RE-Ba-Cu-O (REBCO, RE = rare earth) superconductors became commercially available.

In 2013, VAMAS-TWA 16 started working on the critical current measurement methods in REBCO superconductors. In 2014, an international round robin test (RRT) on the critical current measurement method for REBCO superconductors was conducted that was led by VAMAS-TWA 16. 10 institutions/universities/industries from five countries participated. The pre-standardization work of VAMAS was taken as a base for this document, on the DC critical current test method of REBCO composite superconductors.

The test method covered in this document is intended to give an appropriate and accepted technical base to engineers working in the field of superconductivity technology.

## SUPERCONDUCTIVITY –

### Part 26: Critical current measurement – DC critical current of RE-Ba-Cu-O composite superconductors

#### 1 Scope

This part of IEC 61788 specifies a test method for determining the DC critical current of short RE (rare earth)-Ba-Cu-O (REBCO) composite superconductor specimens that have a shape of straight flat tape. This document applies to test specimens shorter than 300 mm and having a rectangular cross section with an area of 0,03 mm<sup>2</sup> to 7,2 mm<sup>2</sup>, which corresponds to tapes with width ranging from 1,0 mm to 12,0 mm and thickness from 0,03 mm to 0,6 mm.

This method is intended for use with superconductor specimens that have critical current less than 300 A and  $n$ -values larger than 5 under standard test conditions: the test specimen is immersed in liquid nitrogen bath at ambient pressure without external magnetic field during the testing. Deviations from this test method that are allowed for routine tests and other specific restrictions are given in this document.

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

#### 3 Terms and definitions

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

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

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

##### 3.1

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

$U$ - $I$  data acquisition method where a current is swept at a constant rate from zero to a current above  $I_c$ , and where the  $U$ - $I$  data are acquired continuously or frequently

##### 3.2

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

$U$ - $I$  data acquisition method where a current is swept in stages from zero to a current above  $I_c$ , where the current is held for an appropriate amount of time at each stage, and where the  $U$ - $I$  data are acquired continuously or frequently

## 4 Principle

The critical current of a composite superconductor specimen shall be determined from a voltage–current ( $U$ - $I$ ) characteristic measured in a liquid nitrogen bath at ambient pressure. To get a  $U$ - $I$  characteristic, a direct current is applied to the superconductor specimen and the voltage generated along the specimen is measured. The current is increased from zero and the  $U$ - $I$  characteristic is recorded. The critical current shall be determined as the current at which a specific electric field strength criterion (electric field criterion) ( $E_c$ ) is reached. For any selected  $E_c$ , there shall be a corresponding voltage criterion ( $U_c$ ) for a specified voltage tap separation.

## 5 Apparatus

### 5.1 General

The apparatus required for the present test method includes the critical current measuring system. Additional information relating to the apparatus is given in Annex A.

### 5.2 Critical current measuring system

The apparatus to measure the  $U$ - $I$  characteristic should consist of a specimen probe, an open bath and a  $U$ - $I$  measurement system.

The specimen probe, which consists of a specimen and a measurement holder, is inserted in the open bath filled with liquid nitrogen. The  $U$ - $I$  measurement system consists of a DC current source and necessary data acquisition system, preamplifiers, filters or voltmeters, or a combination thereof. Suitable measurement holder materials are recommended in A.3.1.

A computer assisted data acquisition system is recommended.

## 6 Specimen preparation and setup

### 6.1 Length

An example of a schematic view of measurement setup is shown in Figure 1.

The length ( $L$ ) of specimen to be measured shall be defined as follows:

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

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

where

$L_1$  is the distance between the voltage taps;

$L_2$  is the length of the current contact;

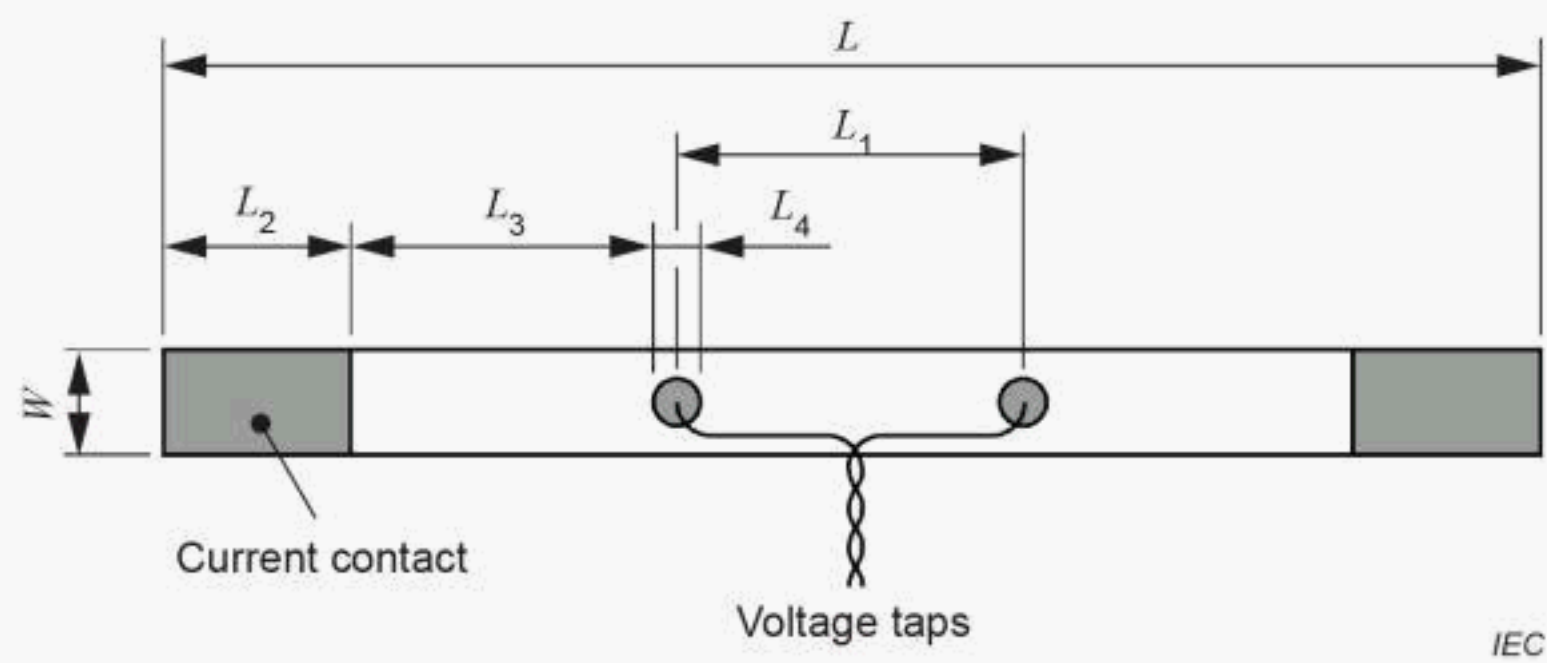
$L_3$  is the shortest distance from a current contact to the neighbouring voltage tap;

$L_4$  is the width of a voltage tap.

$W$  is the width of a specimen to be measured.

The larger the current-carrying capacity of the specimen, the larger shall be  $L_2$ .  $L_2$  shall be increased for a specimen that has a stainless steel or other high-resistivity material backing or jacket. For a measurement that needs the higher voltage sensitivity,  $L_1$  shall be increased. For some practical values for  $L_1$  through  $L_4$ , see A.3.2.





**Figure 1 – Schematic view of measurement setup**

## 6.2 Mounting of the specimen

The specimen shall be mounted to the flat surface of the holder. Both ends shall be fastened or soldered to the current contact blocks.

The voltage taps shall be placed in the central part with or without solder.

The current contacts and the voltage taps shall be on the superconducting layer side.

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

## 7 Critical current measurement

The critical current shall be measured while minimizing mechanical strain.

The specimen shall be inserted slowly into the liquid nitrogen bath. The volume of the liquid nitrogen bath shall be sufficiently larger than the specimen and the measurement holder. The depth of the bath shall be sufficiently higher than the height of the measurement holder. The specimen shall be cooled from room temperature to liquid nitrogen temperature until the specimen and the measurement holder are sufficiently cooled by liquid nitrogen that boils with microbubbles, i.e. steady state. It takes several tens of seconds.

When using the constant sweep rate method, the sweep rate shall be selected not to influence the voltage measurement.

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

Record the  $U$ - $I$  characteristic with increasing current.

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

Additional information relating to the measurement is given in Annex A.

## 8 Calculation of results

### 8.1 Critical current criteria

The critical current  $I_c$  shall be determined by using an electric field criterion  $E_c$ .

$I_c$  shall be determined at  $E_c = 100 \mu\text{V/m}$ .  $I_c$  determined at  $E_c = 10 \mu\text{V/m}$  is optional.

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

$$U_c = L1 E_c \quad (3)$$

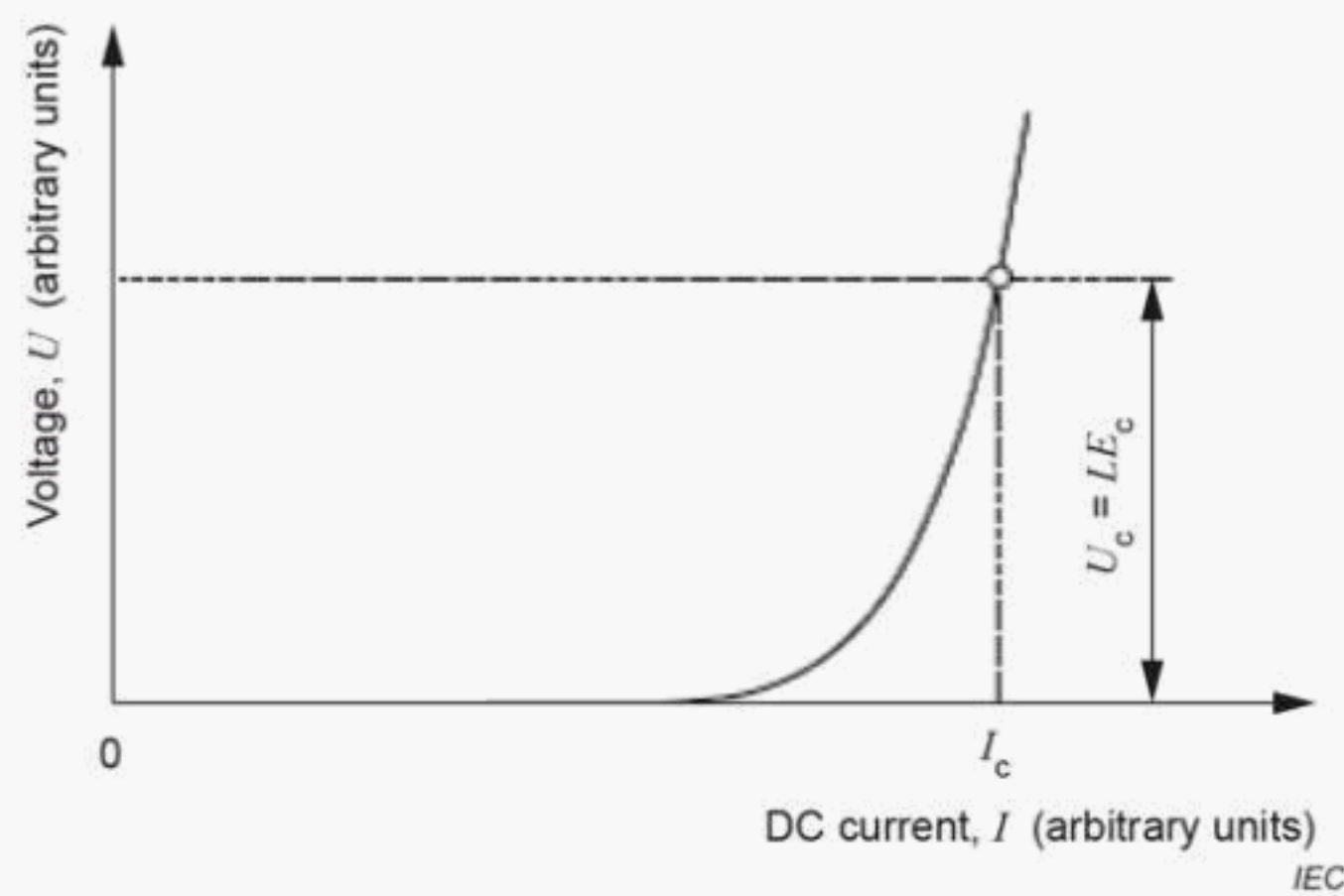
where

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

$L1$  is the voltage tap separation in metres (m);

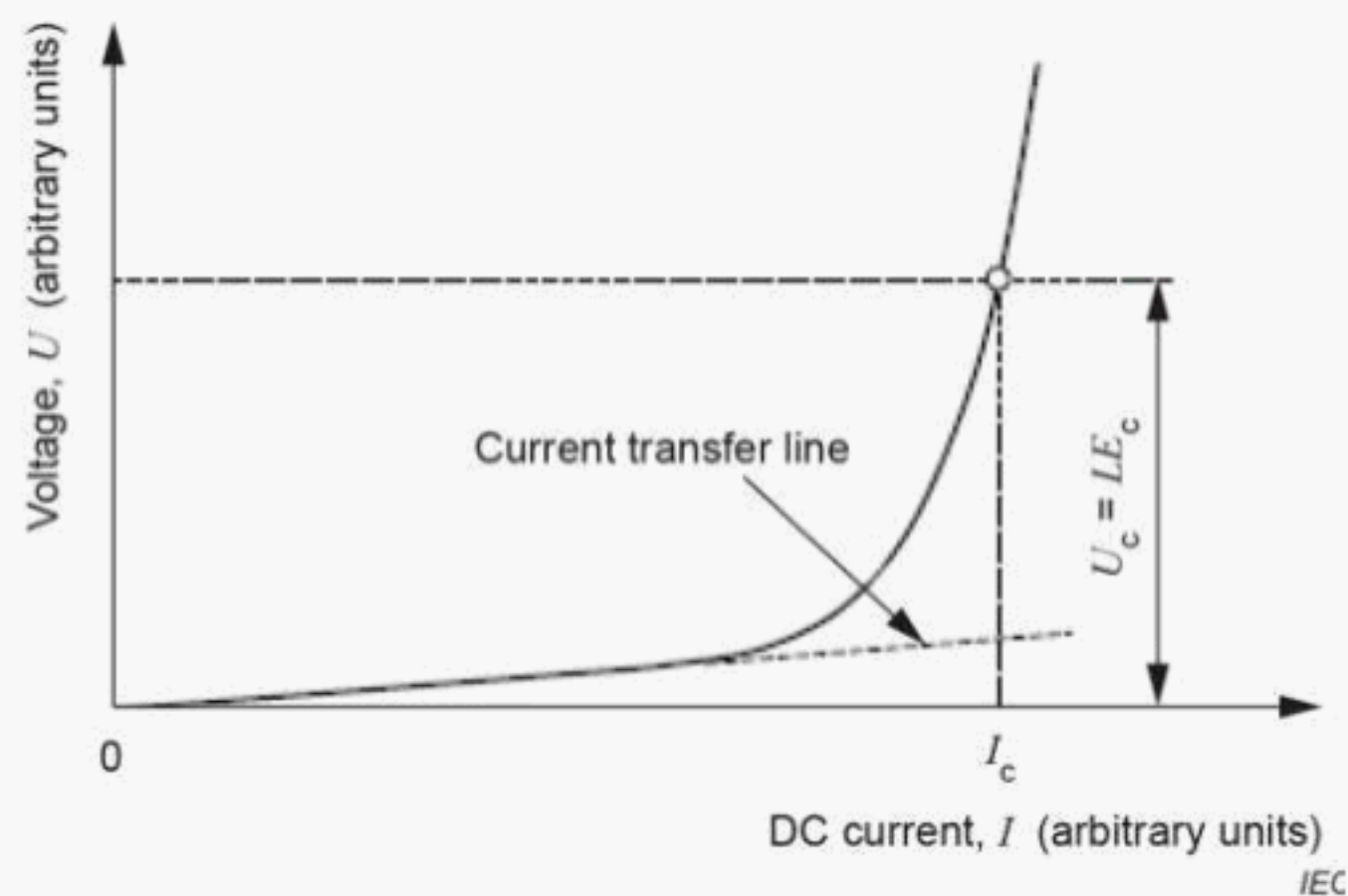
$E_c$  is the electric field criterion in microvolts per metre ( $\mu\text{V/m}$ ).

$U_c$  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.



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

If the measured  $U-I$  curve includes a resistive component, it is recommended to increase  $L3$  to minimize the current transfer component voltage.



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

## 8.2 $n$ -value (optional)

The  $n$ -value shall be calculated as the slope of the plot of  $\log U$  versus  $\log I$  in the region where the  $I_c$  is determined. The corresponding electric field region is recommended to be from 10  $\mu\text{V/m}$  to 100  $\mu\text{V/m}$ .

The electric field region used to determine the  $n$ -value shall be reported.

Additional information relating to the calculation is given in Annex A.

## 9 Uncertainty of measurement

Unless otherwise specified, measurements shall be carried out in a liquid nitrogen bath whose temperature can range from 76,8 K to 77,7 K. A voltmeter having 7,5 digits resolution, providing 1 nV sensitivity on 10 mV setting shall be used to measure specimen voltage.

According to the international round robin test (see Annex B), the relative standard uncertainty is less than 3 %. The target measurement uncertainty shall be 6 % with a coverage factor of 2.

## 10 Test report

### 10.1 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.

### 10.2 Reporting of $I_c$ values

The following values shall be reported:

- a)  $I_c$  values with their corresponding electric field criteria;
- b) specimen temperature and/or ambient pressure.

The reporting of  $n$ -values is optional.

### 10.3 Reporting of $I_c$ test conditions

The following test conditions shall be reported:

- a) length of specimen (  $L$  );
- b) width of specimen (  $W$  );
- c) thickness of specimen;
- d) distance between voltage taps (  $L_1$  );
- e) 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.



## Annex A (informative)

### Additional information relating to measurement, apparatus, and calculation

#### A.1 General information

There are variables that have a significant effect on the measured value of critical current in REBCO superconductors. Some of them are addressed in Annex A for users' attention (see also Annex B).

Special features found in REBCO superconductors may be classified into two groups. The first group is specific to REBCO multilayer composite superconductors, including mechanical fragility of delamination, magnetic flux flow and creep, large anisotropy, screening current caused by magnetic field change, non-uniformity of superconducting properties, etc. The second group is due to length of the specimen used in this document. A critical current measurement on such a specimen may easily pick up different voltage signals due to inductive voltage, thermal noise, current redistribution, etc. Current transfer voltages may be present due to the short distance from a current contact to a voltage tap.

Superconductor specimens with critical currents above 500 A could be measured with this present method with an anticipated increase in uncertainty. A superconductor specimen longer than 300 mm could be measured with this present method. However, care needs to be taken for the measurement preparation.

This document assumes that measurements are made in a liquid nitrogen bath. The cryogen is used at a temperature near boiling point for the normal atmospheric pressure of the test site. This document could be extended to measurements conducted in the cryogen at temperatures other than near boiling point, i.e. depressurized or pressurized. The measurements in a gas or a vacuum are not covered by the scope of this document.

#### A.2 Measurement condition

The minimum total length of the tape specimen is five times the tape width ( $W$ ) + 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 current contacts ( $L_2 \geq W$ );
- the shortest distance between current and voltage contacts ( $L_3 \geq W$ ).

It is expected that the specimen mounting and the specimen cooling procedures in this test method may be one of the most significant contributors to the overall uncertainty of the critical current measurement. The value of  $I_c$  is sensitive to strain. Cooling rates influence thermally induced strain due to different thermal time constants and coefficients of thermal expansion (CTEs) between the sample and mounting materials.

## A.3 Apparatus

### A.3.1 Measurement holder material

In this method, the specimen strain is controlled to a minimum (less than 0,1 %). A 0,1 % thermal contraction may result in no appreciable  $I_c$  deviation at 0 T and near 77,3 K. One significant source of strain is the mismatch in 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 suggested for the measurement holder material. For alternate holder materials, a carefully prepared qualification study should precede the routine tests.

Recommended holder material is glass-fibre epoxy composite, with the specimen lying in the plane of the fabric warp.

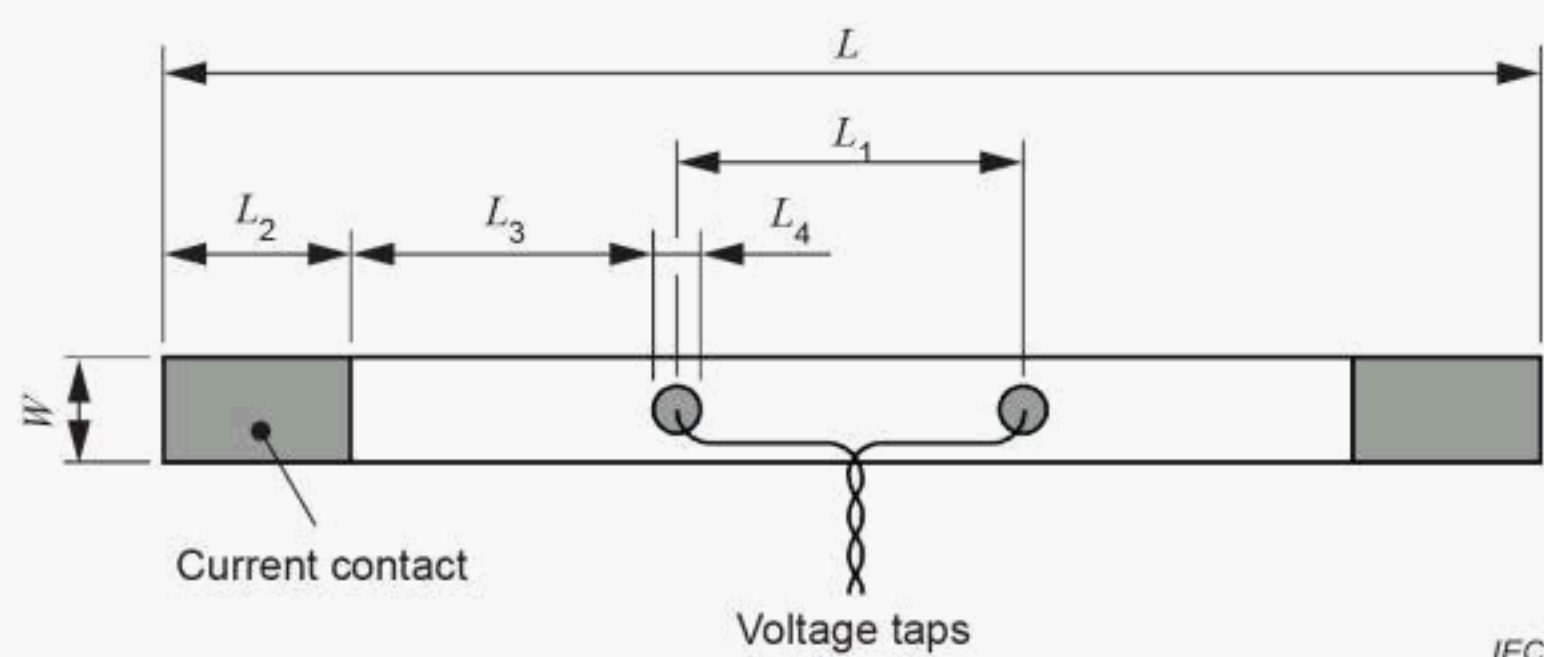
**Table A.1 – Thermal contraction data of superconductor and sample -holder materials [1]**

Material	$\Delta L/L_{293K-77K}$ [%]	$\alpha_{293K}$ [ $10^{-6} K^{-1}$ ]
YBCO polycrystal [2]	0,21	11,5
YBCO <i>a,b</i> -plane avg. [2]	0,14	8,5
Ni based alloy (UNS N10276) [3]	0,216	10,9
Silver [4]	0,370	18,5
Copper [5]	0,302	16,7
Glass-fibre epoxy composite, warp [6] [7]	0,21	12,5
Glass-fibre epoxy composite, normal [6] [7]	0,64	41

### A.3.2 Measurement holder construction

An example of measurement holder is shown in Figure A.1. Typically, the current contacts are made from copper blocks, and the thickness of the contact should be determined so that there is no difference in the level between the holder and the contact surfaces. The contact blocks should be rigidly affixed to the holder. Solder is often used to make current contacts. However, the soldering skills depend on the individual. Thus, this document recommends not to use solder to make current contacts.

Typical  $L_1$  through  $L_4$  values which were used by the participants of the international round robin test [8] were as follows:  $L_1$ : 30 mm to 90 mm,  $L_2$ : 25 mm to 40 mm,  $L_3$ : 10 mm to 30 mm, and  $L_4$ : 1 mm to 10 mm.



**Figure A.1 – Illustration of a measurement configuration for a short specimen of a few hundred amperes class REBCO conductor**



## A.4 Specimen preparation

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

## A.5 Measurement procedure

### A.5.1 Voltage leads

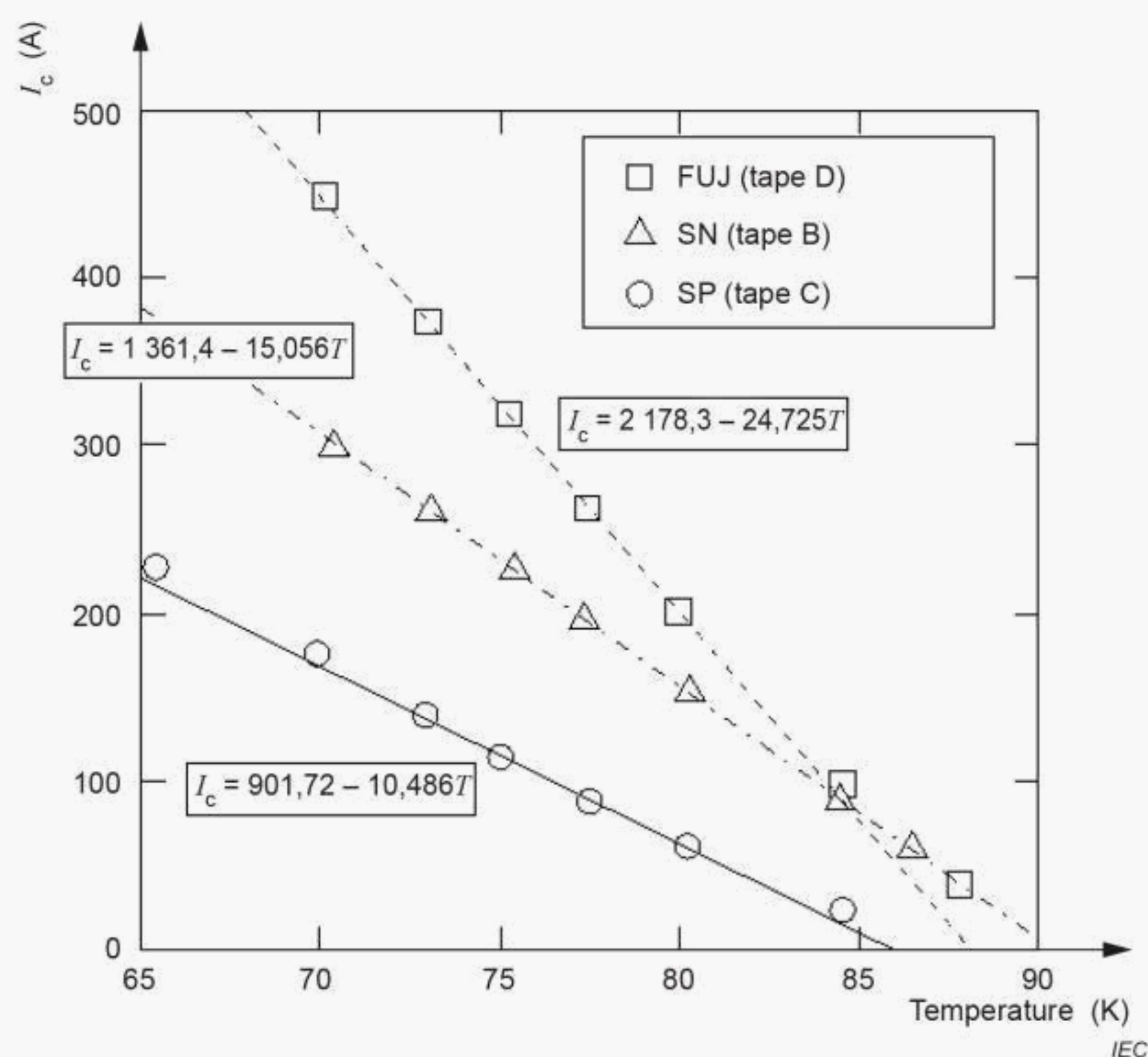
To reduce thermoelectric voltages on the specimen voltage leads, copper voltage leads are used which are continuous from the liquid nitrogen bath to room temperature where an isothermal environment for all room temperature joints or connections is provided. It should be noted that the joints or connections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

### A.5.2 Cooling process

The specimen cooling rate may affect the measured critical current. The strength of bonding between the specimen and its holder changes during the cooling process when different thermal contraction between the specimen and the holder proceeds.

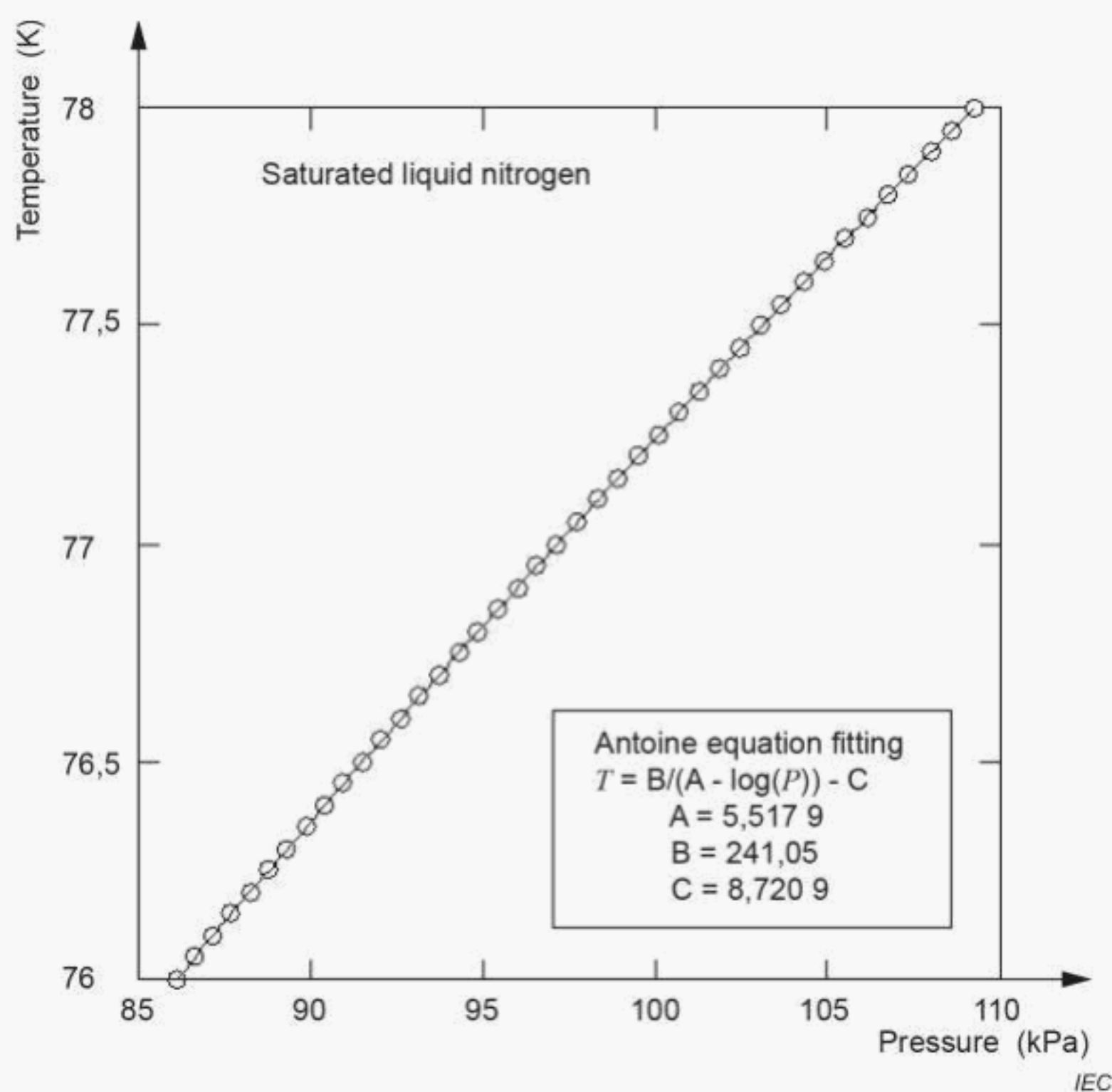
### A.5.3 Temperature of liquid nitrogen bath

REBCO critical current depends on temperature (Figure A.2) [9]. The liquid nitrogen temperature depends on the ambient pressure (Figure A.3) [10]. In addition, oxygen impurities can change temperature of liquid nitrogen in an open bath. Liquid nitrogen stored in the open bath for several days will condense enough oxygen impurities to shift the boiling point. To reduce the uncertainty caused by the temperature, the specimen temperature (temperature of the specimen surface) would be measured using appropriate thermometer(s) shown in [1]. Ambient pressure would be atmospheric pressure ( $950 \leq P \leq 1\,050$  hPa, corresponding to  $76,8\text{ K} \leq T \leq 77,7\text{ K}$ ).



**Figure A.2 – Temperature dependence of  $I_c$  for commercial REBCO superconductors (data from [9])**





**Figure A.3 – Pressure dependence of boiling temperature of liquid nitrogen**

#### **A.5.4 System noise and other contributions to the measured voltage**

If the system noise is significant compared to the prescribed value of voltage, i.e.  $U_c$ , it is desirable to increase the time for the ramp from zero current to  $I_c$  to more than 30 s. In this case, care should be taken to increase the heat capacity and/or cooling surface of the current contacts enough to suppress the influence of heat generation due to the longer time required for the measurement. It should be noted that the ramp-and-hold method allows for averaging data that can be appropriately distributed along the  $U$ - $I$  characteristic.

Ramping the current can induce a positive or negative voltage on the voltage taps. This source of interfering voltage during the ramp can be identified by its proportional dependence on ramp rate. If this voltage is significant compared to  $U_c$ , then decrease the ramp rate (increase the ramp time from zero current to  $I_c$ ), decrease the area of the loop formed by the voltage taps and the specimen between them, or else use the ramp-and-hold method.

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

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

## A.6 Calculation of $n$ -value

The  $U$ - $I$  characteristic curve of a superconducting tape near the  $I_c$  can usually be approximated by the empirical power-law equation:

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

where

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

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

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

$I_c$  is the critical current in amperes (A).

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

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  $\mu\text{V/m}$ ; thus, the range of the criteria used to determine the  $n$ -value needs to be reported.

## Annex B (informative)

### Evaluation of combined standard uncertainty for REBCO $I_c$ measurement [8]

#### B.1 Practical critical current measurement

A superconductor in a superconducting state, which has no resistance, transitions to a normal state when a transport current exceeds a certain threshold value. The threshold current value is called the critical current ( $I_c$ ). There are several methods to measure  $I_c$ . A four-probe method, which is the most popular and practical, is introduced in Annex B.

The four-probe  $I_c$  measurement is described using a circuit shown in Figure B.1. The transport current ( $I$ ) is supplied by a DC current supply. The voltage drop ( $U$ ) along the specimen length is measured. Typical  $U$ - $I$  characteristic is shown in Figure B.2. The  $U$ - $I$  characteristic is nonlinear. The transport current value that corresponds to the threshold voltage  $U_c$  is determined to be  $I_c$ .

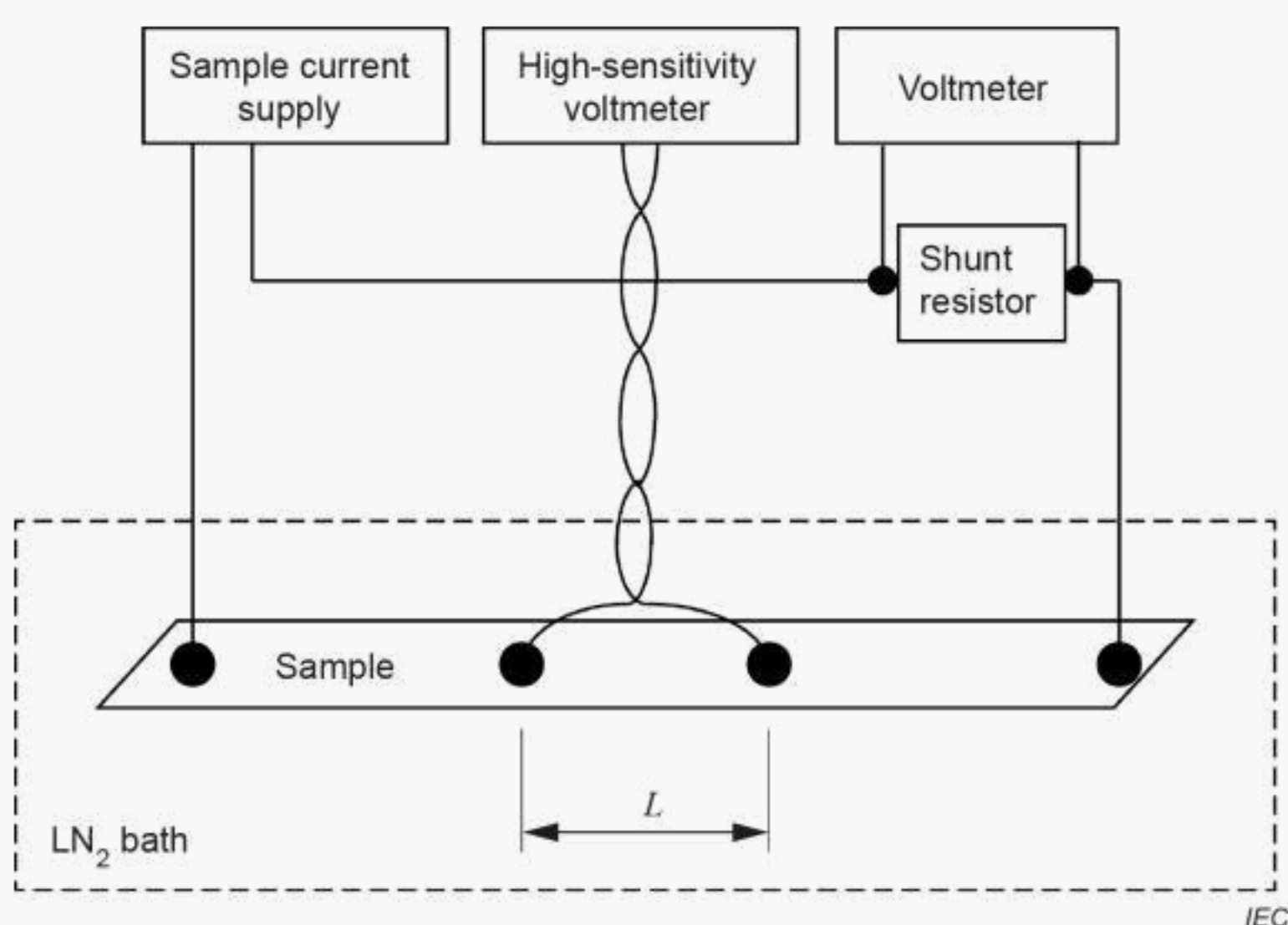
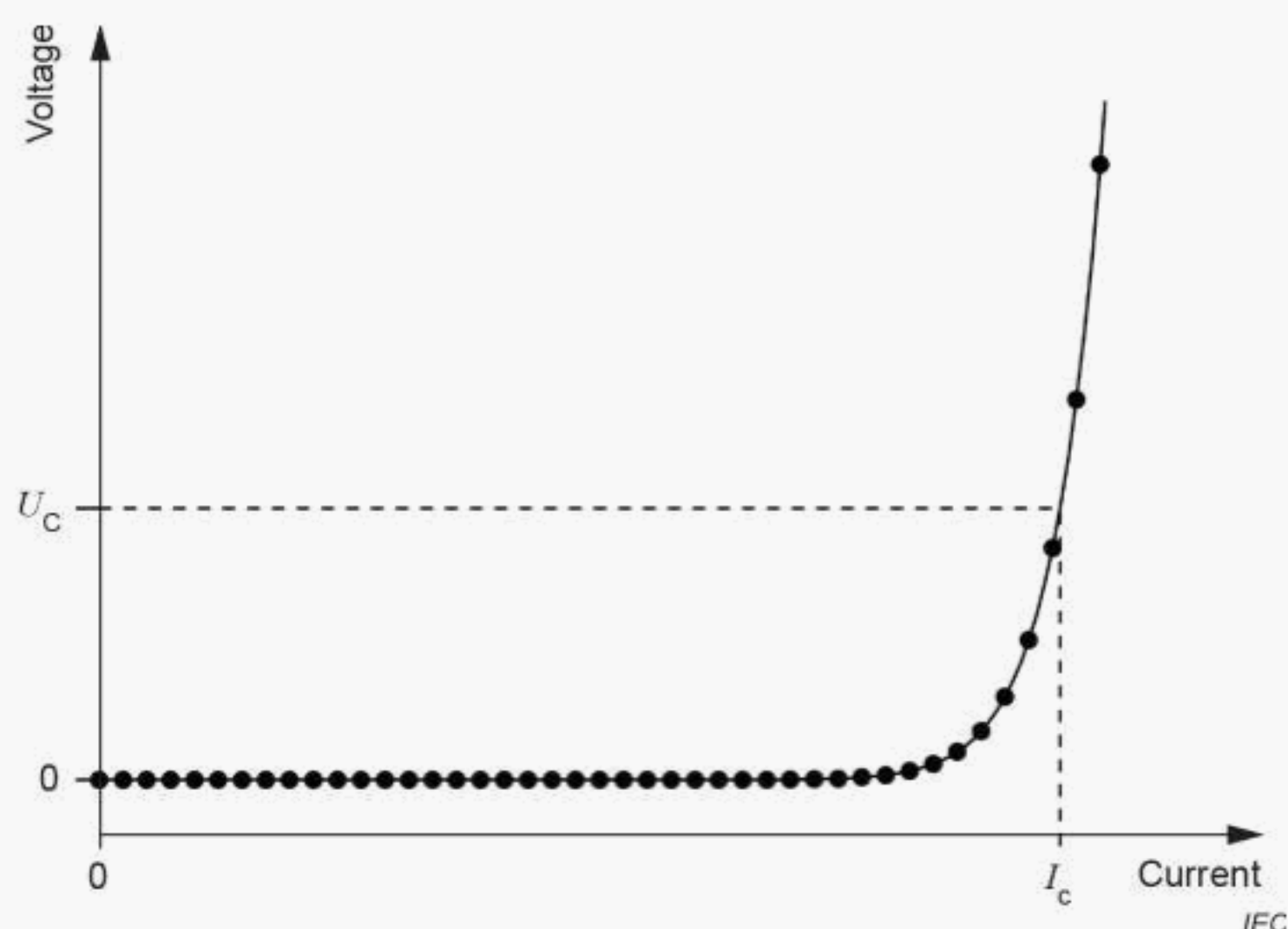


Figure B.1 – Typical circuit to measure  $I_c$





The current corresponding to the threshold voltage ( $U_c$ ) is determined to be  $I_c$ .

**Figure B.2 – Typical voltage–current (  $U$ - $I$ ) characteristic of a superconductor**

## B.2 Model equation

The  $U$ - $I$  characteristic of a practical superconductor is well approximated by an empirical power law:

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

where the index  $n$  is called the  $n$ -value.  $U_c$  is described using  $L1$ , which is a distance between the pair of voltage taps:

$$U_c = L1 E_c \quad (\text{B.2})$$

where

$E_c$  is an electric field criterion to determine  $I_c$ .

The model equation can be described as follows considering Formulas (B.1) and (B.2):

$$I_c = \frac{L E_c}{U}^{\frac{1}{n}} \left( I + g_{\text{Temp}}(T) + \varepsilon_{\text{NU}} \right) \quad (\text{B.3})$$

where  $g_{\text{Temp}}(T)$  and  $\varepsilon_{\text{NU}}$  are terms coming from temperature and non-uniformity of  $I_c$  along the length of the conductor, respectively.

### B.3 $I_c$ measurement results

An international round robin test (RRT) on  $I_c$  measurement of REBCO superconductors was conducted. Four kinds of REBCO conductors were distributed to 10 participating institutions/universities/industries. Each participant measured five specimens for each conductor. Table B.1 shows the specifications of distributed conductors.

**Table B.1 – Conductors distributed in the international RRT**

Manufacturer	A	B	C	D
Rare earth elements	Y	Gd	Y and Gd	Gd
Deposition processes	RABITS/MOD	IBAD/RCE-DR	IBAD/MOCVD	IBAD/PLD
Tape width [mm]	4,4	4,1	4	5
Tape thickness [mm]	0,4	0,1	0,095	0,16
Superconductor thickness [ $\mu\text{m}$ ]	1	1,0 to 1,5	no information	no information
Substrate	Ni-5W	Ni based alloy	Ni based alloy	Ni based alloy
Substrate thickness [ $\mu\text{m}$ ]	50 to 75	60	50	75
Lamination	Brass	n/a	n/a	n/a
Lamination thickness [ $\mu\text{m}$ ]	150	n/a	n/a	n/a
Copper stabilizer	n/a	Both sides	Both sides	Superconductor side
Copper thickness [ $\mu\text{m}$ ]	n/a	no information	20 × 2	75

n/a = not applicable

Table B.2, Table B.3, Table B.4, and Table B.5 show  $I_c$  data reported from participants P1 to P10 for conductors A, B, C, and D. Since some data were lacking for P9, the P9 column was not used for analysis for conductors B and D.

**Table B.2 –  $I_c$  data for conductor A**

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1	104,898	102,89	97,802	97,73	104,0	106,95	104,3	104,05	103,190	105,54
2	106,819	102,93	98,834	100,86	103,8	108,20	102,0	104,69	100,755	106,10
3	108,932	102,49	98,731	103,38	102,8	104,87	103,6	104,25	113,625	105,35
4	103,792	101,22	99,062	98,89	101,2	105,07	101,4	103,35	110,202	105,77
5	104,538	102,32	98,608	99,55	100,60	104,09	103,80	102,70	104,338	105,98
$I_{c,avg}$ [A]	105,796	102,37	98,607	100,082	102,48	105,836	103,02	103,808	106,422	105,748
$\chi_{SD}$ [A]	2,079	0,693 4	0,480 2	2,163	1,527	1,688	1,250	0,785 7	5,317	0,308 2
$\chi_{SU}$ [A]	0,929 7	0,310 1	0,214 7	0,9674	0,682 9	0,754 9	0,558 9	0,351 4	2,378	0,137 8
$\chi_{RSU}$ [%]	0,879	0,303	0,218	0,967	0,666	0,713	0,543	0,338	2,234	0,130

**Table B.3 –  $I_c$  data for conductor B**

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1	187,837	197,180	189,935	196,920	189,600	198,020	191,000	187,350	191,440	200,140
2	183,258	189,390	184,803	191,290	191,400	198,990	190,800	192,570	181,650	197,050
3	188,917	193,150	191,041	192,630	193,000	193,910	197,000	198,360		195,870
4	192,467	194,320	188,539	194,210	191,600	193,100	195,600	197,920		192,160
5	187,803	195,510	192,863	190,540	187,600	194,680	177,600	193,320		196,920
$I_{c,avg}$ [A]	188,056	193,910	189,436	193,118	190,640	195,740	190,400	193,904	186,545	196,428
$\chi_{SD}$ [A]	3,291	2,934	3,035	2,543	2,085	2,608	7,664	4,502	6,923	2,869
$\chi_{SU}$ [A]	1,472	1,312	1,357	1,137	0,933	1,166	3,428	2,013	4,895	1,283
$\chi_{RSU}$ [%]	0,783	0,677	0,716	0,589	0,489	0,596	1,800	1,038	2,624	0,653

**Table B.4 –  $I_c$  data for conductor C**

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1	89,626	90,674	87,649	86,160	89,600	88,790	91,200	88,960	92,650	91,490
2	90,814	93,314	90,775	86,040	89,800	94,080	93,400	91,300	92,650	92,960
3	92,230	88,783	88,390	88,360	88,600	87,960	93,100	91,460	93,700	91,670
4	89,545	90,176	86,317	88,330	89,600	90,910	90,500	91,790	92,760	92,170
5	89,231	89,539	85,786	86,340	87,400	88,670	90,800	92,630	91,110	89,790
$I_{c,avg}$ [A]	90,289	90,497	87,783	87,046	89,000	90,082	91,800	91,228	92,574	91,616
$\chi_{SD}$ [A]	1,240	1,727	1,967	1,191	1,010	2,492	1,351	1,368	0,930	1,169
$\chi_{SU}$ [A]	0,555	0,772	0,880	0,532	0,452	1,114	0,604	0,612	0,416	0,523
$\chi_{RSU}$ [%]	0,614	0,853	1,002	0,612	0,507	1,237	0,658	0,671	0,449	0,571

**Table B.5 –  $I_c$  data for conductor D**

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1	303,462	300,650	298,120	294,860	296,000	307,890	300,400	303,570	293,315	303,470
2	303,423	292,180	300,163	289,150	291,800	306,620	301,800	298,690	294,705	299,000
3	304,080	293,070	294,352	292,380	293,400	299,710	299,500	305,450	298,985	300,160
4	304,160	301,190	300,766	296,600	293,200	307,080	307,700	306,650	301,955	299,750
5	308,802	303,200	296,921	286,880	295,000	314,780	303,900	300,070		303,580
$I_{c,avg}$ [A]	304,785	298,058	298,064	291,974	293,880	307,216	302,660	302,886	297,240	301,192
$\chi_{SD}$ [A]	2,271	5,060	2,588	3,994	1,641	5,347	3,270	3,419	3,963	2,170
$\chi_{SU}$ [A]	1,016	2,263	1,157	1,786	0,734	2,391	1,462	1,529	1,981	0,971
$\chi_{RSU}$ [%]	0,333	0,759	0,388	0,612	0,250	0,778	0,483	0,505	0,667	0,322

Table B.6 shows averaged values, standard deviations (SD), and relative standard deviations (RSD) of  $I_c$  for each conductor. The inter-laboratory variance is not taken into account. Note that P9 data were not used for conductors B and D. RSDs are in the range of 1,9 % to 3,1 %.



**Table B.6 – Statistics for each conductor**

Conductor ID	A	B	C	D
<i>N</i>	50	45	50	45
<i>I<sub>c,avg</sub> [A]</i>	103,42	192,40	90,192	300,08
<i>X<sub>SD</sub> [A]</i>	3,176	4,447	2,189	5,746
<i>X<sub>RSD</sub> [%]</i>	3,071	2,311	2,427	1,915

In reality, we should consider other effects, e.g. day, human, laboratory, etc. Now we assume that all effects can be summarized into the inter-laboratory variance. We also assume that the five specimens were measured in the same day. According to an analysis of variance (ANOVA), we obtain Table B.7, which shows that the inter-laboratory effect is significantly large.

**Table B.7 – ANOVA results for each conductor**

Conductor ID	A	B	C	D
<i>N</i>	50	45	50	45
<i>s<sub>a2</sub> (inter-laboratory)</i>	34,73	588,5	15,89	111,7
<i>s<sub>b2</sub> (intra-laboratory)</i>	4,544	156,15	2,296	12,42
<i>F-value</i>	7,644	3,769	6,918	8,996
<i>F<sub>0,95</sub> (<i>f<sub>a</sub></i>, <i>f<sub>b</sub></i>)</i>	2,124	2,209	2,124	2,209

#### B.4 Combined standard uncertainty [11]

The combined standard uncertainty  $u_c$  for Formula (B.3) is given by

$$u_c^2 = \left( \frac{\partial I_c}{\partial L_1} \right)^2 u_1^2 + \left( \frac{\partial I_c}{\partial U} \right)^2 u_2^2 + \left( \frac{\partial I_c}{\partial I} \right)^2 u_3^2 + \left( \frac{\partial I_c}{\partial n} \right)^2 u_4^2 + c_{\text{Temp}}^2 u_{\text{Temp}}^2 + c_{\text{NU}}^2 u_{\text{NU}}^2 \quad (\text{B.4})$$

Sensitivity coefficients in Formula (B.4) are given by

$$c_1 = \frac{\partial I_c}{\partial L_1} = \frac{I_c}{nL_1} \quad (\text{B.5})$$

$$c_2 = \frac{\partial I_c}{\partial U} = - \frac{I_c}{nU} \quad (\text{B.6})$$

$$c_3 = \frac{\partial I_c}{\partial I} = \frac{I_c}{I} \quad (\text{B.7})$$

$$c_4 = \frac{\partial I_c}{\partial n} = \frac{I_c}{n} \log \frac{I_c}{U} \quad (\text{B.8})$$

The fourth term in Formula (B.4) can be neglected in the present evaluation, because  $c_4 = 0$  at  $I = I_c$  ( $U = U_c$ ).

## B.5 Type B uncertainty evaluation

### B.5.1 General

Here we assume the following precondition for conductor C:  $L1 = 80 \text{ mm}$ ,  $I_c = 90 \text{ A}$ ,  $n = 30$ , and  $U_c = 8 \text{ } \mu\text{V}$ . Under the precondition,  $c1$ ,  $c2$ , and  $c3$  are calculated to be  $0,0375 \text{ A/mm}$ ,  $0,375 \text{ A/}\mu\text{V}$ , and  $1,0$  at  $I = I_c$ , respectively.

### B.5.2 Uncertainty of $L1$ measurement

The distance is measured using a ruler having the minimum scale of  $1 \text{ mm}$ . The standard uncertainty (SU)  $u_{11}$  is given as

$$u_{11} = \frac{0,5}{\sqrt{3}} = 0,289 \text{ [mm]} \quad (\text{B.9})$$

The sensitivity coefficient  $c_{11} = c1 = 0,05 \text{ A/mm}$ .

### B.5.3 Uncertainty of voltage measurement

The second term in Formula (B.4) is expressed as

$$u_2^2(U) = \frac{\partial U^2}{\partial U} u_{21}^2 + \frac{\partial U^2}{\partial t} u_{22}^2(t) \quad (\text{B.10})$$

The voltage is measured using a digital voltmeter, usually a nanovoltmeter having  $1 \text{ nV}$  minimum resolution. A nanovoltmeter with  $10 \text{ mV}$  range and  $1 \text{ PLC}$  is assumed to be used. The DC noise is presumed to be  $\Delta U = 70 \text{ nV}$ . Thus, the SU  $u_{21}$  is given by

$$u_{21} = \frac{\frac{\Delta U}{2}}{\sqrt{3}} = \frac{0,035}{\sqrt{3}} = 0,0202 \text{ [}\mu\text{V]} \quad (\text{B.11})$$

The second factor comes from the ramp rate of the current. Assuming that the ramp time from zero to  $I_c$  is  $10 \text{ seconds}$ , the changing rate of the voltage at  $I_c$  is given by

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dU}{dI} \frac{dI}{dt} = \frac{nU_c}{I_c} \frac{I_c}{10} = \frac{nU_c}{10} = \frac{30 \times 8}{10} = 24 \text{ [}\mu\text{V/s]} \quad (\text{B.12})$$

The sampling rate of  $66,7 \text{ ms}$  can be assumed for a nanovoltmeter controlled via General Purpose Interface Bus (GPIB). Thus, SU  $u_{22}$  is given by

$$\frac{\partial U}{\partial t} u_{22} = \frac{24 \times \frac{0,0667}{2}}{\sqrt{3}} = 0,4621 \text{ [}\mu\text{V]} \quad (\text{B.13})$$

#### B.5.4 Uncertainty of current measurement

Current measurement is usually the voltage measurement of a shunt resistor. In addition, temperature of liquid nitrogen (LN<sub>2</sub>) bath is also considered. The third term in Formula (B.4) is expressed as

$$u_{31}^2(I) = \frac{\partial I^2}{\partial U} u_{31}^2(U) + \frac{\partial I^2}{\partial t} u_{32}^2(t) \quad (\text{B.14})$$

The sensitivity coefficient of the first term  $c_{31}$  is described by

$$\frac{dI}{dU} = \frac{1}{R_s} = \frac{1}{0,25} = 4 \text{ [A/mV]} \quad (\text{B.15})$$

where  $R_s$  is the resistance of the shunt resistor and  $R_s = 0,25 \text{ m}\Omega$  is assumed. A digital multimeter with 100 mV range and 1 PLC is assumed to be used. The DC noise is presumed to be  $\Delta U = 4 \text{ }\mu\text{V}$ . Thus, the  $u_{31}$  is given by

$$u_{31} = \frac{\frac{\Delta U}{2}}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,155 \text{ [}\mu\text{V]} \quad (\text{B.16})$$

Now  $I$  is assumed to be close to  $I_c = 90 \text{ A}$ . The sampling rate is assumed to be similar to that of voltage measurement (66,7 ms).  $u_{32}$  is given by

$$\frac{\partial I_u}{\partial t} = \frac{\frac{90 \times 0,0667}{2}}{10 \sqrt{3}} = 0,1733 \text{ [}\mu\text{V]} \quad (\text{B.17})$$

#### B.5.5 Uncertainty of temperature measurement

As shown in Figure A.2, REBCO conductors  $I_c$  are sensitive to temperature. The sensitivity coefficient, which depends on the manufacturer, is

$$c_c = \frac{\partial I_c}{\partial T} = -10,49 \text{ [A/K]} \quad (\text{B.18})$$

for conductor C.

Now a possible temperature difference among the laboratories is discussed. Table B.8 shows statistical analyses of atmospheric pressure at Tsukuba, Tokyo, Osaka, Kyoto, and Chiba from 1 January 2014 to 31 December 2014. We can estimate a plausible atmospheric pressure distribution using average and SD. The highest and lowest values are 1020,67 hPa and 998,23 hPa, which correspond to LN<sub>2</sub> boiling temperatures of 77,403 K and 77,215 K, respectively. Temperature values are calculated using the Antoine equation [10].



**Table B.8 – Atmospheric pressure from 1 January 2014 to 31 December 2014**

	Tsukuba	Tokyo	Osaka	Kyoto	Chiba
Number of data	8760	8760	8760	8760	8760
Maximum [hPa]	1028,3	1028,2	1023,8	1027,6	1030,7
Minimum [hPa]	979,3	974,8	974,7	978,5	976,5
Average [hPa]	1010,7	1009,56	1005,43	1009,08	1013,2
SD [hPa]	7,460 63	7,485 09	7,202 53	7,344 07	7,465 23
$P_{avg} + P\sigma$	1018,16	1017,05	1012,63	1016,42	1020,67
$P_{avg} - P\sigma$	1003,24	1002,07	998,227	1001,74	1005,73
$T_{high}$ [K]	77,382	77,373	77,336	77,368	77,403
$T_{low}$ [K]	77,257	77,247	77,215	77,245	77,278

The possible temperature distribution is assumed to be limited to the following range:

$$\Delta T = 77,403 - 77,215 = 0,188 \text{ [K]} \quad (\text{B.19})$$

Then the SU is evaluated to be

$$u_4 = \frac{0,188}{\sqrt{2}} = 0,05196 \text{ [K]} \quad (\text{B.20})$$

#### B.5.6 Uncertainty coming from intrinsic non-uniformity of $I_c$

The intrinsic  $I_c$  non-uniformity was evaluated by reel-to-reel scanning Hall-probe microscopy (RTR-SHPM) [12] for a 10-m-long conductor. Evaluated  $I_c$  corresponded to  $10^{-8}$  V/m electric field criterion with 0,43 mm resolution. The obtained  $I_c$  were converted to  $I_c$  values corresponding to  $10^{-4}$  V/m criterion using the empirical power law with constant  $n$ -value for each conductor. Table B.9 shows the raw and converted  $I_c$  values and standard deviations for each conductor. Relative standard deviations (coefficients of variation) are 2,1 to 2,8 for the converted  $I_c$ . The parameter  $N = 22000$  was used to deduce RSD. But the number is the number of measured points, not the number of repetitions. Thus, RSD and SD correspond to RSU and SU with  $N = 1$ , respectively. For conductor C, SD and RSD are 1,96 A and 2,2 %, respectively.

**Table B.9 – Intrinsic  $I_c$  non-uniformity evaluated by RTR-SHPM**

Conductor	$I_c$ evaluated by RTR-SHPM ( $10^{-8}$ V/m criterion, 0,43 mm resolution)			Converted $I_c$ ( $10^{-4}$ V/m criterion, 90 mm resolution)		
	$I_{c,avg}$ [A]	SD [A]	RSD [%]	$I_{c,avg}$ [A]	SD [A]	RSD [%]
A	88,4	2,62	2,96	116	2,44	2,1
B	155,7	5,57	3,58	201	5,03	2,5
C	67,2	2,11	3,14	89	1,96	2,2
D	211,6	8,44	3,99	271	7,59	2,8

### B.5.7 Comparison between types A and B combined standard uncertainties

The type-B RSU is evaluated to be 0,32 % for conductor C. Table B.10 shows the budget table for type B uncertainty evaluation considering additional sources. One can find that the largest contribution is the intrinsic non-uniformity of the conductor itself.

The second and third are temperature and voltage measurements, respectively. The voltage measurements uncertainty is dominated by the effect of the sampling rate. The longer the ramp time, the smaller the expected uncertainty. Concerning the temperature, it is important to report the temperature at which  $I_c$  was measured.

**Table B.10 – Budget table of SUs of  $I_c$  measurements for conductor C**

Component	Source	$ij$	$c_{ij}$	$u_{ij}$	$c_{ij}u_{ij}$ [A]
$L_1$	Length	11	0,037 5 [A/mm]	0,289 [mm]	0,01083
$U$	DC noise	21	0,375 [A/μV]	0,020 2 [μV]	0,007 578
	Ramp time	22	0,375 [A/μV]	0,462 1 [μV]	0,1733
$I$	DC noise	31	1	0,004 619 [A]	0,00 4619
	Ramp time	32	1	0,173 3 [A]	0,1733
$T$	Temperature	4	–10,49 [A/K]	0,051 96 [K]	–0,544 9
$I_c$	Non-uniformity	5	1	1,96 [A]	1,96

The combined SU is given by

$$u_c = \sqrt{\sum_i \sum_j (c_{ij}u_{ij})^2} = 2,05[\text{A}] \quad (\text{B.21})$$

RSU is calculated to be 2,27 %.

Similar analyses were adopted for conductors B and D. Now we can compare RSU calculated using type B evaluation with type A. RSD values of type A analyses correspond to RSU for  $N = 1$ . Table B.11 shows comparisons between type A and type B uncertainties for conductors B, C, and D. Unfortunately, since the temperature dependence of  $I_c$  for conductor A was not known, we do not have type B evaluation result. However, Table B.11 indicates that both analyses agree well. It can be concluded that the  $I_c$  measurement method described in this document provides the combined standard uncertainty of < 3 %.

**Table B.11 – Comparison of the relative standard uncertainties for conductors B, C, and D**

		B	C	D
Type A	$I_{c,avg}$ [A]	192,40	90,19	300,1
	$X_{SU}$ [A]	4,447	2,189	5,476
	$X_{RSU}$ [%]	2,31	2,43	1,91
Type B	$Y_{SU}$ [A]	5,112	2,047	7,739
	$Y_{RSU}$ [%]	2,69	2,27	2,58

## B.6 Influence of current ramp rate on the total uncertainty

Subclauses B.5.2 and B.5.3 imply that uncertainties coming from  $U$  and  $I$  are influenced by the current ramp time, which is the time from zero to  $I_c$ . Uncertainties shown in Table B.10 were calculated using the ramp time of 10 seconds. The ramp time dependence of the total RSU is shown in Figure B.3. RSUs increase with decreasing ramp time. They exceed 5 % when the ramp time is shorter than 0,6 s. Ramp time of 0,6 s is less than 10 data points, because data sampling time of 66,7 ms was assumed in this calculation. You can decrease RSU if you use higher data sampling time.

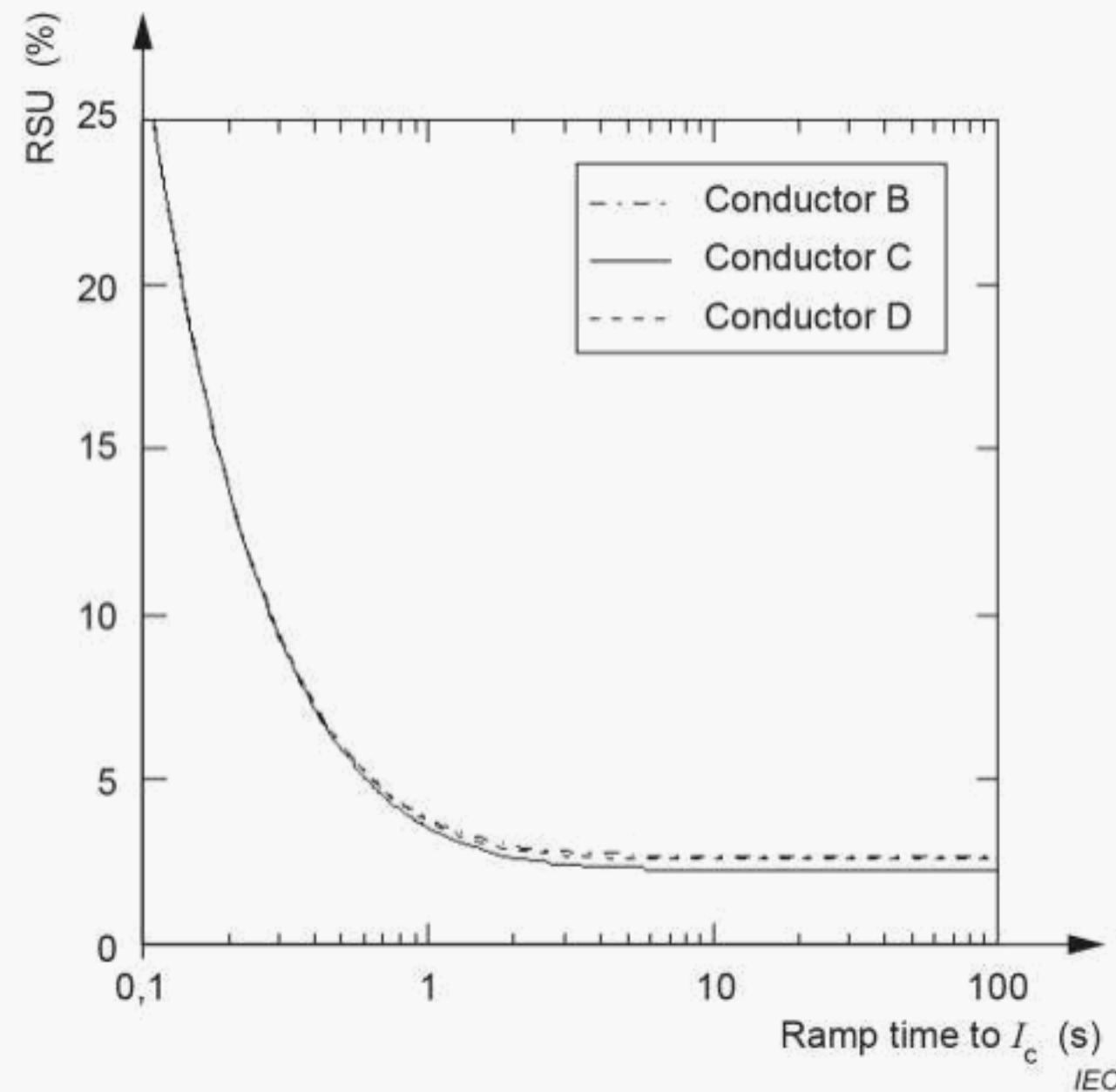


Figure B.3 – Ramp time dependence of total RSU of  $I_c$  for conductors B, C, and D



## Bibliography

- [1] J.W. Ekin, *Experimental techniques for low-temperature measurements*, Oxford University Press, 2006
  - [2] Calculated from data by H. You, J.D. Axe, X.B. Kan, S. Hashimoto, S.C. Moss, J.Z. Liu, G.W. Crabtree, and D.J. Lam, "Phase constitution and thermal expansion of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-Δ</sub> single crystals", *Phys. Rev. B* 38 (1988) 9213-9216
  - [3] Y.S. Touloukian, R.K. Kirby, R.E. Taylor, and P.D. Desai, *Thermophysical Properties of Matter – the TPRC Data Series, Vol. 12. Thermal expansion: Metallic elements and alloys*, p. 1248
  - [4] *Properties of Materials at Low Temperature (Phase 1)*, edited by V.J. Johnson, Pergamon Press, 1961
  - [5] T.A. Hahn, "Thermal expansion of copper from 20 to 800 K – Standard reference material 736", *J. Appl. Phys.* 41 (1970) 5096-5101
  - [6] A.F. Clark, G. Fujii, and M.A. Ranney, "The thermal expansion of several materials for superconducting magnets", *IEEE Trans. Magn.* MAG-17 (1981) 2316-2319
  - [7] A.F. Clark, Chapter 3, in *Materials at Low Temperature* (1983) pp. 96-97, ASM International, Materials park, Ohio
  - [8] G. Nishijima et al., "International round robin test for critical current measurement of RE-Ba-Cu-O superconducting tapes", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 28 (2018) 6601205
  - [9] G. Nishijima, Y. Tsuchiya, H. Kitaguchi, T. Nishimura and T. Kato, "I<sub>c</sub>-B-T evaluation for high- T<sub>c</sub> superconductors in pressurized/depressurized liquid nitrogen", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 23 (2013) 8000703
  - [10] M.R. Moussa, R. Muijlwijk, and H.V. Dijk, "The vapour pressure of liquid nitrogen", *Physica* 32 (1966) 900-912
  - [11] ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*
  - [12] K. Higashikawa et al., "Nondestructive diagnostics of narrow coated conductors for electric power applications", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 24 (2014) 6600704
-

## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS .....	30
INTRODUCTION .....	32
1 Domaine d'application .....	33
2 Références normatives .....	33
3 Termes et définitions .....	33
4 Principe .....	34
5 Appareillage .....	34
5.1 Généralités .....	34
5.2 Système de mesure du courant critique .....	34
6 Préparation et montage de l'échantillon .....	34
6.1 Longueur .....	34
6.2 Montage de l'échantillon .....	35
7 Mesurage du courant critique .....	35
8 Calcul des résultats .....	36
8.1 Critères de courant critique .....	36
8.2 Valeur $n$ (calcul facultatif).....	37
9 Incertitude de mesure .....	37
10 Rapport d'essai .....	37
10.1 Identification de l'échantillon d'essai .....	37
10.2 Rapport des valeurs $I_c$ .....	37
10.3 Rapport des conditions d'essai $I_c$ .....	38
Annexe A (informative) Informations complémentaires relatives au mesurage, à l'appareillage et au calcul .....	39
A.1 Informations générales .....	39
A.2 Conditions de mesure .....	39
A.3 Appareillage .....	40
A.3.1 Matériau du support de mesure .....	40
A.3.2 Construction du support de mesure .....	40
A.4 Préparation de l'échantillon .....	41
A.5 Procédure de mesure .....	41
A.5.1 Fils de tension .....	41
A.5.2 Processus de refroidissement .....	41
A.5.3 Température du bain d'azote liquide .....	41
A.5.4 Bruit du système et autres contributions à la tension mesurée .....	43
A.6 Calcul de la valeur $n$ .....	43
Annexe B (informative) Évaluation de l'incertitude type composée pour le mesurage de $I_c$ des supraconducteurs REBCO [8] .....	44
B.1 Mesurage pratique du courant critique .....	44
B.2 Équation modèle .....	45
B.3 Résultats de mesure de $I_c$ .....	46
B.4 Incertitude type composée [11] .....	48
B.5 Évaluation d'incertitude de type B .....	49
B.5.1 Généralités .....	49
B.5.2 Incertitude de mesure de $L_1$ .....	49
B.5.3 Incertitude de mesure de la tension .....	49

B.5.4	Incertitude de mesure du courant .....	50
B.5.5	Incertitude de mesure de la température .....	50
B.5.6	Incertitude due à la non-uniformité intrinsèque de $I_c$ .....	51
B.5.7	Comparaison entre les incertitudes types composées de type A et de type B .....	52
B.6	Influence du temps de variation du courant sur l'incertitude globale .....	53
Bibliographie .....		54
Figure 1 – Vue schématique d'un montage de mesure .....		35
Figure 2 – Caractéristique $U-I$ intrinsèque .....		36
Figure 3 – Courbe $U-I$ avec une composante de transfert de courant .....		37
Figure A.1 – Illustration d'une configuration de mesure pour un petit échantillon de quelques centaines de conducteurs REBCO de classe A .....		41
Figure A.2 – Dépendance du courant $I_c$ des supraconducteurs REBCO commerciaux vis-à-vis de la température (données issues de [9]) .....		42
Figure A.3 – Dépendance de la température d'ébullition de l'azote liquide vis-à-vis de la pression .....		42
Figure B.1 – Circuit type de mesure de $I_c$ .....		44
Figure B.2 – Caractéristique tension-courant ( $U-I$ ) type d'un supraconducteur .....		45
Figure B.3 – Dépendance de la RSU globale de $I_c$ vis-à-vis du temps de variation pour les conducteurs B, C et D .....		53
Tableau A.1 – Données de contraction thermique de matériaux supraconducteurs et de support d'échantillon [1] .....		40
Tableau B.1 – Conducteurs distribués dans le cadre de l'essai international de comparaison interlaboratoires .....		46
Tableau B.2 – Données $I_c$ pour le conducteur A .....		46
Tableau B.3 – Données $I_c$ pour le conducteur B .....		47
Tableau B.4 – $I_c$ data for conductor C .....		47
Tableau B.5 – $I_c$ data for conductor D .....		47
Tableau B.6 – Statistiques pour chaque conducteur .....		48
Tableau B.7 – Résultats de l'ANOVA pour chaque conducteur .....		48
Tableau B.8 – Pression atmosphérique du 1er janvier 2014 au 31 décembre 2014 .....		51
Tableau B.9 – Non-uniformité intrinsèque de $I_c$ évaluée par microscopie RTR-SHPM .....		52
Tableau B.10 – Tableau budgétaire des incertitudes types de mesure de $I_c$ pour le conducteur C .....		52
Tableau B.11 – Comparaison des incertitudes types relatives pour les conducteurs B, C et D .....		53



## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

## SUPRACONDUCTIVITÉ –

**Partie 26: Mesurage du courant critique – Courant critique continu des composites supraconducteurs de RE-Ba-Cu-O**

## AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Électrotechnique 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 61788-26 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
90/455/FDIS	90/458/RVD

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

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

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61788, publiées sous le titre général *Supraconductivité*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication 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 à la publication recherchée. À cette date, la publication sera

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

## INTRODUCTION

En 1986, la supraconductivité a été découverte dans des matériaux de type pérovskite contenant des oxydes de cuivre à des températures très supérieures aux températures critiques des supraconducteurs métalliques. En 1987, il a été découvert que la température critique ( $T_c$ ) de Y-Ba-Cu-O (YBCO) est de 93 K. Après un quart de siècle, les supraconducteurs RE-Ba-Cu-O (REBCO, RE = terre rare) sont disponibles dans le commerce.

En 2013, le VAMAS-TWA (Technical Working Areas) 16 a commencé à travailler sur les méthodes de mesure du courant critique des supraconducteurs REBCO. En 2014, TWA 16 a conduit un essai international de comparaison interlaboratoires sur la méthode de mesure du courant critique des supraconducteurs REBCO. Dix institutions/universités/industries de cinq pays y ont participé. Les travaux de prénormalisation menés par VAMAS ont servi de base au présent document sur la méthode d'essai du courant critique continu des composites supraconducteurs REBCO.

La méthode d'essai traitée dans le présent document est destinée à fournir une base technique appropriée et acceptée aux ingénieurs évoluant dans le domaine de la technologie de la supraconductivité.

## SUPRACONDUCTIVITÉ –

### Partie 26: Mesurage du courant critique – Courant critique continu des composites supraconducteurs de RE-Ba-Cu-O

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61788 spécifie une méthode d'essai pour la détermination du courant critique continu des échantillons de composites supraconducteurs RE (terre rare)-Ba-Cu-O (REBCO) courts en forme de ruban plat et rectiligne. Le présent document s'applique aux échantillons d'essai d'une longueur inférieure à 300 mm et d'une superficie de section rectangulaire de 0,03 mm<sup>2</sup> à 7,2 mm<sup>2</sup>, ce qui correspond aux rubans d'une largeur de 1,0 mm à 12,0 mm et d'une épaisseur de 0,03 mm à 0,6 mm.

Cette méthode est destinée à être utilisée avec des échantillons de supraconducteurs caractérisés par un courant critique inférieur à 300 A et des valeurs  $n$  supérieures à 5 dans les conditions d'essai normalisées: l'échantillon d'essai est immergé dans un bain d'azote liquide à pression ambiante sans champ magnétique externe pendant l'essai. Le présent document spécifie les écarts par rapport à cette méthode d'essai qui sont admis dans les essais individuels de série, ainsi que d'autres restrictions spécifiques.

#### 2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils 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, *Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) – Partie 815: Supraconductivité*

#### 3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de 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

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

méthode d'acquisition de données  $U-I$  dans laquelle un courant balaye à vitesse constante l'étendue entre 0 et une valeur supérieure à  $I_c$  et dans laquelle les données  $U-I$  sont acquises continuellement ou fréquemment

##### 3.2

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

méthode d'acquisition de données  $U-I$  dans laquelle un courant balaye par étapes l'étendue entre 0 et une valeur supérieure à  $I_c$ , dans laquelle le courant est maintenu constant à chacune de ces valeurs le temps nécessaire, et dans laquelle les données  $U-I$  sont acquises continuellement ou fréquemment



## 4 Principe

Le courant critique d'un échantillon de composite supraconducteur doit être déterminé à partir d'une caractéristique tension–courant ( $U-I$ ) mesurée dans un bain d'azote liquide à pression ambiante. Pour obtenir une caractéristique  $U-I$ , un courant continu est appliqué à l'échantillon de supraconducteur et la tension générée le long de l'échantillon est mesurée. Le courant est augmenté à partir de zéro et la caractéristique  $U-I$  est enregistrée. Le courant critique doit être déterminé comme étant le courant pour lequel un critère de champ électrique ( $E_c$ ) spécifique est atteint. Pour tout  $E_c$  choisi, il doit y avoir un critère de tension correspondant ( $U_c$ ) pour une séparation entre prises de tension spécifiées.

## 5 Appareillage

### 5.1 Généralités

L'appareillage exigé pour la présente méthode d'essai comprend le système de mesure du courant critique. L'Annexe A donne des informations complémentaires concernant l'appareillage.

### 5.2 Système de mesure du courant critique

Il convient que l'appareillage de mesure de la caractéristique  $U-I$  comprenne un porte-échantillon, un bain ouvert et un système de mesure  $U-I$ .

Le porte-échantillon, qui est constitué d'un échantillon et d'un support de mesure, est immergé dans le bain ouvert rempli d'azote liquide. Le système de mesure  $U-I$  comporte une source de courant continu, et un système d'acquisition des données nécessaires, des préamplificateurs, filtres ou voltmètres nécessaires, ou une combinaison de ces appareils. Des matériaux appropriés de support de mesure sont recommandés en A.3.1.

Un système d'acquisition de données assisté par ordinateur est recommandé.

## 6 Préparation et montage de l'échantillon

### 6.1 Longueur

La Figure 1 donne un exemple de vue schématique d'un montage de mesure.

La longueur ( $L$ ) de l'échantillon à mesurer doit être définie comme suit:

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

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

où

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

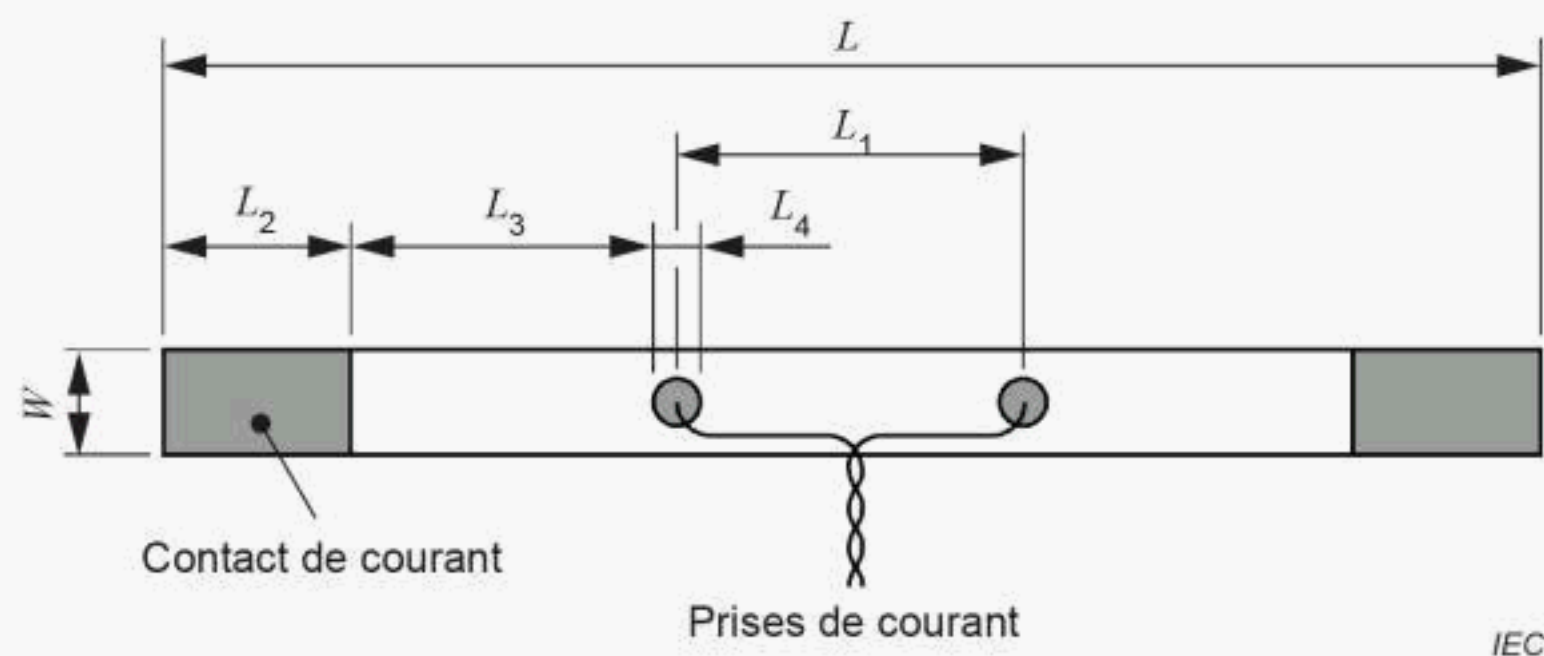
$L_2$  est la longueur du contact de courant;

$L_3$  est la distance la plus courte entre un contact de courant et la prise de tension avoisinante;

$L_4$  est la largeur d'une prise de tension;

$W$  est la largeur d'un échantillon à mesurer.

$L_2$  doit être plus grande pour un échantillon ayant le plus grand courant admissible.  $L_2$  doit être augmentée pour un échantillon équipé d'un support ou recouverte d'une enveloppe en acier inoxydable ou en un autre matériau de haute résistivité.  $L_1$  doit être augmentée pour un mesurage nécessitant la sensibilité de tension la plus élevée. Voir A.3.2 pour des valeurs pratiques de  $L_1$  à  $L_4$ .



**Figure 1 – Vue schématique d'un montage de mesure**

## 6.2 Montage de l'échantillon

L'échantillon doit être monté sur la surface plane du support. Les deux extrémités doivent être fixées ou soudées aux blocs de connexions de courant.

Les prises de tension doivent être placées dans la partie centrale avec ou sans soudure.

Les contacts de courant et les prises de tension doivent être situés du côté de la couche supraconductrice.

Les fils de tension doivent être torsadés aussi près que possible des prises de tension.

## 7 Mesurage du courant critique

Le courant critique doit être mesuré en réduisant le plus possible les contraintes mécaniques.

L'échantillon doit être inséré lentement dans le bain d'azote liquide. Le volume du bain d'azote liquide doit être suffisamment supérieur à celui de l'échantillon et du support de mesure. La profondeur du bain doit être suffisamment supérieure à la hauteur du support de mesure. L'échantillon doit être refroidi de la température ambiante à la température de l'azote liquide jusqu'à ce que l'échantillon et le support de mesure soient suffisamment refroidis par l'azote liquide qui bout avec des microbulles, c'est-à-dire à l'état stationnaire. Cela dure plusieurs dizaines de secondes.

Lors de l'utilisation de la méthode à vitesse de balayage constante, la vitesse de balayage doit être sélectionnée de telle manière qu'elle n'influence pas le mesurage de la tension.

Lors de l'utilisation de la méthode de variation et de maintien, la vitesse de balayage du courant entre les étapes doit être inférieure à l'équivalent de la variation allant de 0 à  $I_c$  en 3 s. L'acquisition de données à chaque étape doit démarrer dès que la tension d'écoulement ou de fluage générée par la variation du courant peut être ignorée. La dérive de courant à chaque point de consigne de courant doit être inférieure à 1 % de  $I_c$ .

Enregistrer la caractéristique  $U-I$  par rapport à l'augmentation du courant.

Après le mesurage, l'échantillon doit être réchauffé jusqu'à atteindre la température ambiante.

L'Annexe A donne des informations complémentaires concernant le mesurage.

## 8 Calcul des résultats

### 8.1 Critères de courant critique

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

$I_c$  doit être déterminé pour un  $E_c$  de 100  $\mu\text{V/m}$ . Il est facultatif de déterminer  $I_c$  pour un  $E_c$  de 10  $\mu\text{V/m}$ .

Le  $I_c$  doit être déterminé comme étant le courant correspondant au point de la courbe  $U-I$  où la tension  $U_c$  est mesurée (voir Figure 2 et Figure 3):

$$U_c = L1 E_c \quad (3)$$

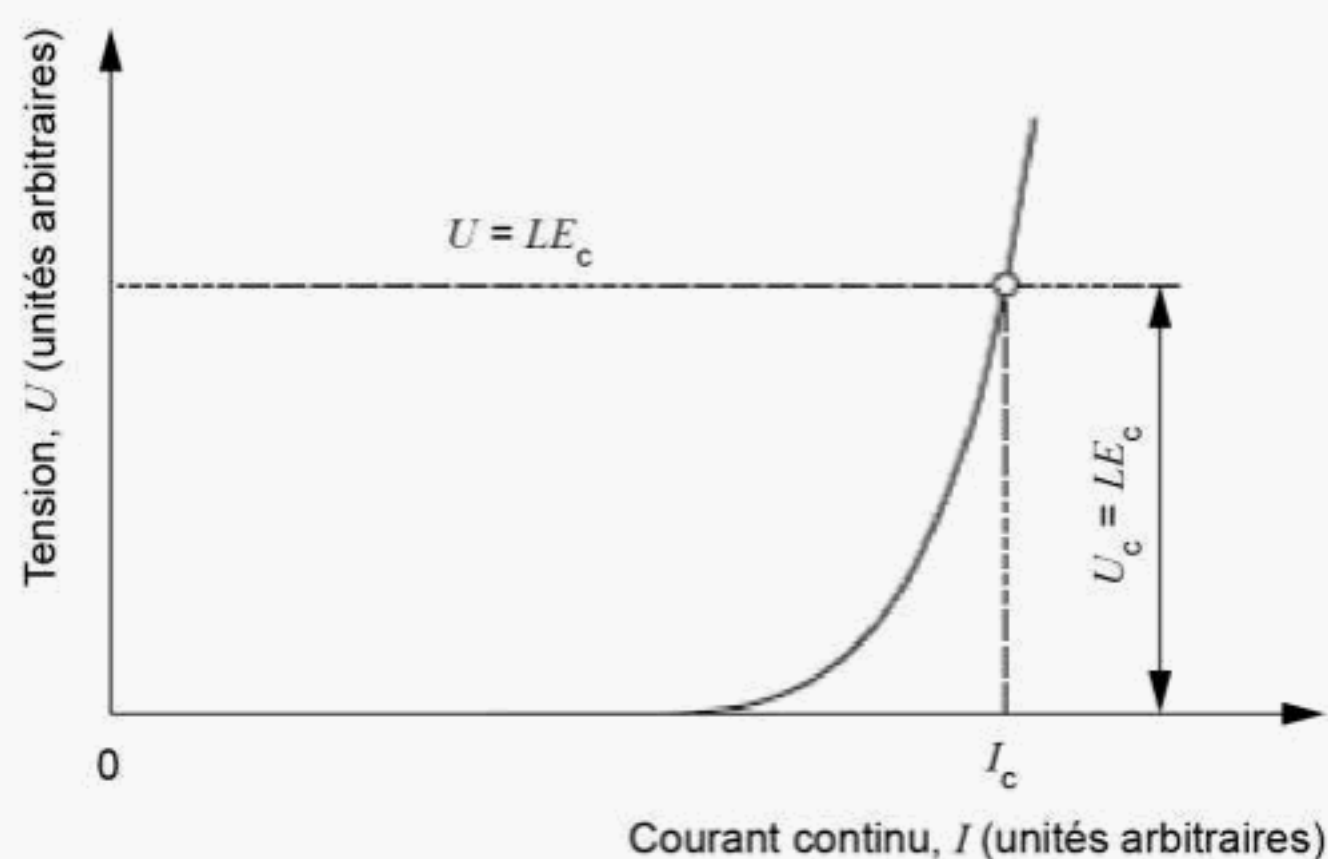
où

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

$L1$  est la séparation entre prises de tension en mètres (m);

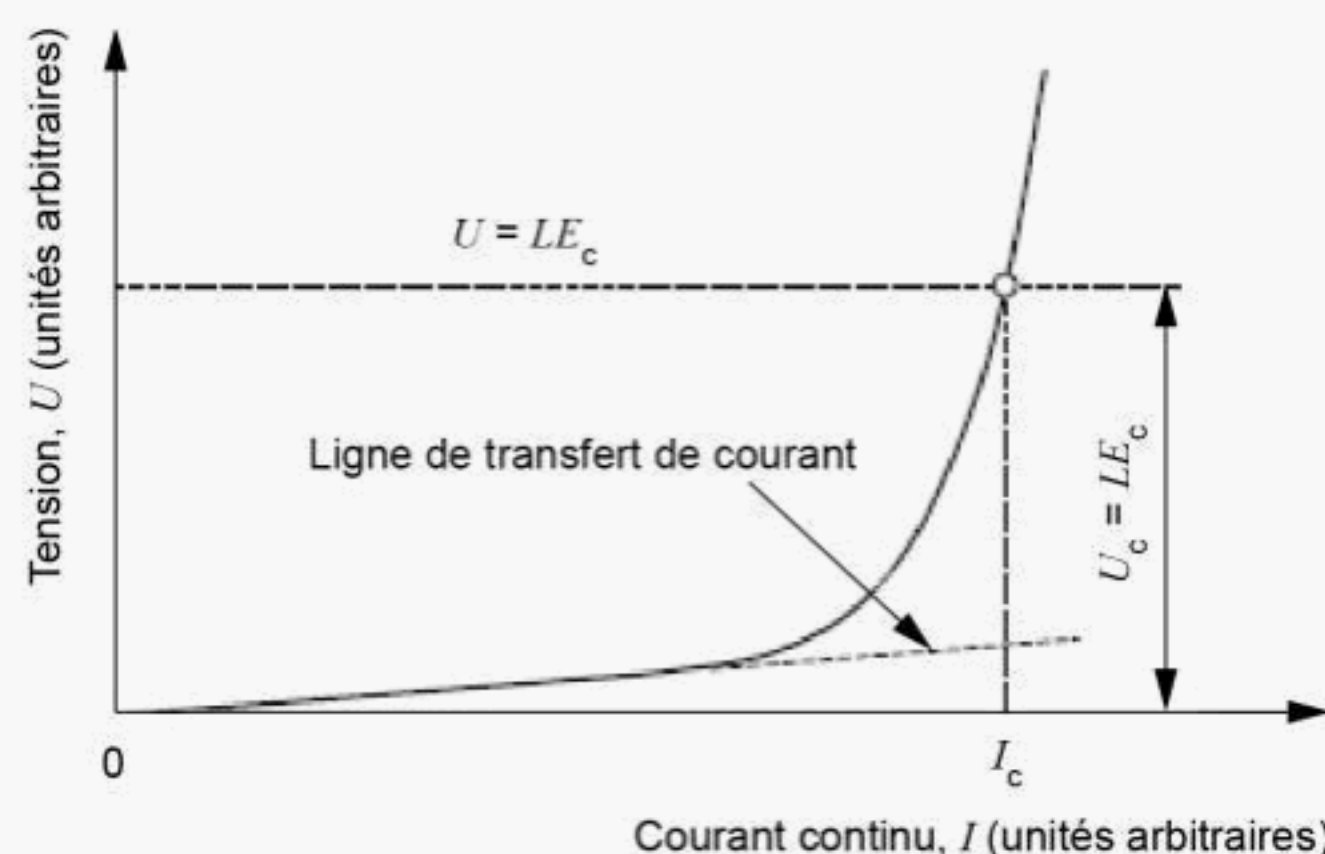
$E_c$  est le critère de champ électrique en microvolts par mètre (  $\mu\text{V/m}$ ).

$U_c$  et  $I_c$  représentent respectivement la tension et le courant correspondants mesurés au point d'intersection des lignes droites et de la courbe  $U-I$ , comme cela est représenté à la Figure 2.



**Figure 2 – Caractéristique  $U-I$  intrinsèque**

Si la courbe  $U-I$  mesurée inclut une composante résistive, il est recommandé d'allonger  $L3$  pour réduire le plus possible la tension de la composante de transfert de courant.



**Figure 3 – Courbe  $U$ - $I$  avec une composante de transfert de courant**

## 8.2 Valeur $n$ (calcul facultatif)

La valeur  $n$  doit être calculée comme étant la pente du tracé de  $\log U$  en fonction de  $\log I$  dans la région où  $I_c$  est déterminé. Il est recommandé que la région de champ électrique correspondante se situe entre 10  $\mu\text{V/m}$  et 100  $\mu\text{V/m}$ .

La région de champ électrique utilisée pour déterminer la valeur  $n$  doit être consignée.

L'Annexe A donne des informations complémentaires concernant le calcul.

## 9 Incertitude de mesure

Sauf spécification contraire, les mesurages doivent être effectués dans un bain d'azote liquide dont la température peut être comprise entre 76,8 K et 77,7 K. Un voltmètre avec une résolution de 7,5 chiffres offrant une sensibilité de 1 nV sur un réglage de 10 mV doit être utilisé pour mesurer la tension de l'échantillon.

Selon l'essai international de comparaison interlaboratoires (voir l'Annexe B), l'incertitude type relative est inférieure à 3 %. L'incertitude de mesure cible doit être de 6 % avec un facteur d'élargissement de 2.

## 10 Rapport d'essai

### 10.1 Identification de l'échantillon d'essai

L'échantillon d'essai doit être identifié par les caractéristiques suivantes:

- a) nom du fabricant de l'échantillon;
- b) classification et/ou symbole;
- c) numéro de lot.

### 10.2 Rapport des valeurs $I_c$

Les valeurs suivantes doivent être consignées:

- a) valeurs  $I_c$  avec leurs critères de champ électrique correspondants;
- b) température et/ou pression ambiante de l'échantillon.

Le rapport des valeurs  $n$  est facultatif.



### 10.3 Rapport des conditions d'essai $I_c$

Les conditions d'essai suivantes doivent être consignées:

- a) longueur de l'échantillon (  $L$ );
- b) largeur de l'échantillon (  $W$ );
- c) épaisseur de l'échantillon;
- d) distance entre les prises de tension (  $L_1$ );
- e) distance la plus courte entre un contact de courant et une prise de tension (  $L_3$ );
- f) longueur des contacts de courant (  $L_2$ );
- g) vitesse de balayage lors de l'utilisation de la méthode à vitesse de balayage constante;
- h) pas de variation, temps de variation et temps de maintien lors de l'utilisation de la méthode de variation et de maintien.

## **Annexe A** (informative)

### **Informations complémentaires relatives au mesurage, à l'appareillage et au calcul**

#### **A.1 Informations générales**

Il existe des variables qui ont un effet significatif sur la valeur mesurée du courant critique des supraconducteurs REBCO. L'Annexe A traite certaines d'entre elles à l'attention des utilisateurs (voir aussi l'Annexe B).

Les caractéristiques spéciales présentes dans les supraconducteurs REBCO peuvent être classées en deux groupes. Le premier groupe est propre aux composites supraconducteurs multicouches REBCO et intègre la fragilité mécanique par délaminage, l'écoulement et le fluage de flux magnétique, une anisotropie importante, le courant d'écrantage causé par une variation du champ magnétique, la non-uniformité des propriétés supraconductrices, etc. Le second groupe concerne la longueur de l'échantillon spécifiée dans le présent document. Un mesurage du courant critique sur un tel échantillon peut facilement capter différents signaux de tension dus à la tension inductive, au bruit thermique, à la redistribution du courant, etc. Des tensions de transfert de courant peuvent être présentes en raison de la distance courte entre un contact de courant et une prise de tension.

Les échantillons de supraconducteurs dont les courants critiques sont supérieurs à 500 A peuvent être mesurés à l'aide de la présente méthode avec une augmentation anticipée de l'incertitude. Un échantillon de supraconducteur d'une longueur supérieure à 300 mm peut être mesuré à l'aide de la présente méthode. Toutefois, il est nécessaire d'effectuer avec soin la préparation du mesurage.

Le présent document par du principe que les mesurages sont effectués dans un bain d'azote liquide. Les fluides cryogéniques sont utilisés à une température proche du point d'ébullition pour la pression atmosphérique normale du site d'essai. Le présent document peut couvrir les mesurages effectués dans les fluides cryogéniques à des températures autres que celles proches du point d'ébullition, c'est-à-dire pompé ou sous pression. Les mesurages dans un gaz ou sous vide ne relèvent pas du domaine d'application du présent document.

#### **A.2 Conditions de mesure**

La longueur totale minimale de l'échantillon de ruban est égale à cinq fois la largeur du ruban ( $W$ ) + la largeur de la prise de tension ( $L_4$ ), ce qui représente la somme des éléments suivants:

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

Il est prévu que les procédures de montage et de refroidissement des échantillons de cette méthode d'essai puissent être l'un des facteurs les plus déterminants de l'incertitude globale de mesure du courant critique. La valeur de  $I_c$  est sensible aux contraintes. Les vitesses de refroidissement ont une influence sur les contraintes thermiques dues aux différentes constantes de temps thermiques et des coefficients de dilatation thermique (CDT) entre l'échantillon et les matériaux de montage.

## A.3 Appareillage

### A.3.1 Matériau du support de mesure

Dans cette méthode, la déformation de l'échantillon est maintenue à un minimum (inférieure à 0,1 %). Une contraction thermique de 0,1 % peut entraîner un écart négligeable de  $I_c$  à 0 T et près de 77,3 K. Une des sources de déformation déterminantes est le décalage des vitesses de contraction thermique entre le support de mesure et l'échantillon lorsqu'il est refroidi jusqu'à atteindre la température de l'azote liquide.

Sur la base des contractions thermiques types indiquées dans le Tableau A.1, les matériaux suivants sont conseillés à titre de matériaux du support de mesure. Pour des matériaux de support alternatifs, il convient de mener une étude minutieuse de qualification avant les essais individuels de série.

Le matériau de support recommandé est un composite de fibre de verre et résine époxyde, l'échantillon étant placé dans le plan de la chaîne du produit.

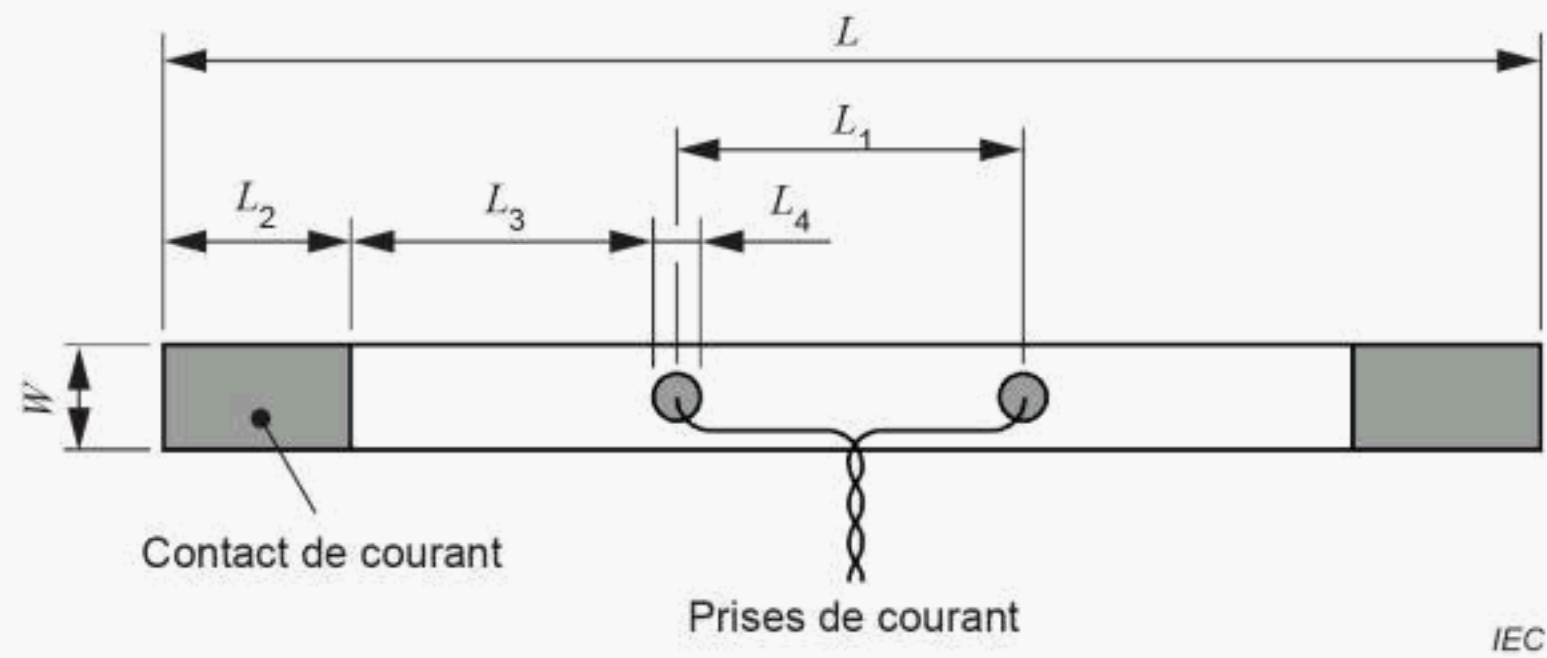
**Tableau A.1 – Données de contraction thermique de matériaux supraconducteurs et de support d'échantillon [1]**

Matériau	$\Delta L/L_{293K-77K}$ [%]	$\alpha_{293K}$ [ $10^{-6} K^{-1}$ ]
Polycrystal YBCO [2]	0,21	11,5
YBCO <i>a,b</i> -moyenne du plan [2]	0,14	8,5
Alliage composé de Ni (nickel) (UNS N10276) [3]	0,216	10,9
Argent [4]	0,370	18,5
Cuivre [5]	0,302	16,7
Composite de fibre de verre et résine époxyde, chaîne [6][7]	0,21	12,5
Composite de fibre de verre et résine époxyde, normal [6][7]	0,64	41

### A.3.2 Construction du support de mesure

La Figure A.1 représente un exemple de support de mesure. En règle générale, les contacts de courant sont fabriqués à partir de blocs de cuivre. Il convient de déterminer l'épaisseur du contact afin d'éviter toute différence de niveau entre le support et les surfaces de contact. Il convient de fixer les blocs de connexions de manière ferme au support. La soudure est souvent utilisée pour établir les contacts de courant. Cependant, les compétences de soudage dépendent des individus. Ainsi, le présent document recommande de ne pas utiliser de soudure pour établir les contacts de courant.

Les valeurs types de  $L_1$  à  $L_4$  qui ont été utilisées par les participants à l'essai international de comparaison interlaboratoires [8] se présentent comme suit:  $L_1$ : 30 mm à 90 mm,  $L_2$ : 25 mm à 40 mm,  $L_3$ : 10 mm à 30 mm et  $L_4$ : 1 mm à 10 mm.



**Figure A.1 – Illustration d'une configuration de mesure pour un petit échantillon de quelques centaines de conducteurs REBCO de classe A**

#### **A.4 Préparation de l'échantillon**

La distance entre les prises de tension est définie comme la distance entre les centres des contacts de tension, quelle que soit leur taille.

#### **A.5 Procédure de mesure**

##### **A.5.1 Fils de tension**

Pour réduire les tensions thermoélectriques sur les fils de tension de l'échantillon, des fils de tension en cuivre qui relient sans interruption le bain d'azote liquide à température ambiante sont utilisés, créant ainsi un environnement isotherme pour tous les joints ou connexions à température ambiante. Il convient de noter que les joints ou les connexions immergé(e)s dans les fluides cryogéniques sont isothermes.

##### **A.5.2 Processus de refroidissement**

La vitesse de refroidissement de l'échantillon peut affecter le courant critique mesuré. La résistance de la liaison entre l'échantillon et son support change pendant le processus de refroidissement lorsqu'une contraction thermique différente entre l'échantillon et le support se produit.

##### **A.5.3 Température du bain d'azote liquide**

Le courant critique des supraconducteurs REBCO dépend de la température (voir Figure A.2) [9]. La température de l'azote liquide dépend de la pression ambiante (voir Figure A.3) [10]. De plus, les impuretés d'oxygène peuvent modifier la température de l'azote liquide dans un bain ouvert. L'azote liquide stocké dans le bain ouvert pendant plusieurs jours condense suffisamment d'impuretés d'oxygène pour déplacer le point d'ébullition. Afin de réduire l'incertitude liée à la température, la température de l'échantillon (température de sa surface) est mesurée à l'aide d'un ou des thermomètres appropriés indiqués en [1]. La pression ambiante correspond à la pression atmosphérique ( $950 \leq P \leq 1\,050$  hPa, correspondant à  $76,8\text{ K} \leq T \leq 77,7\text{ K}$ ).



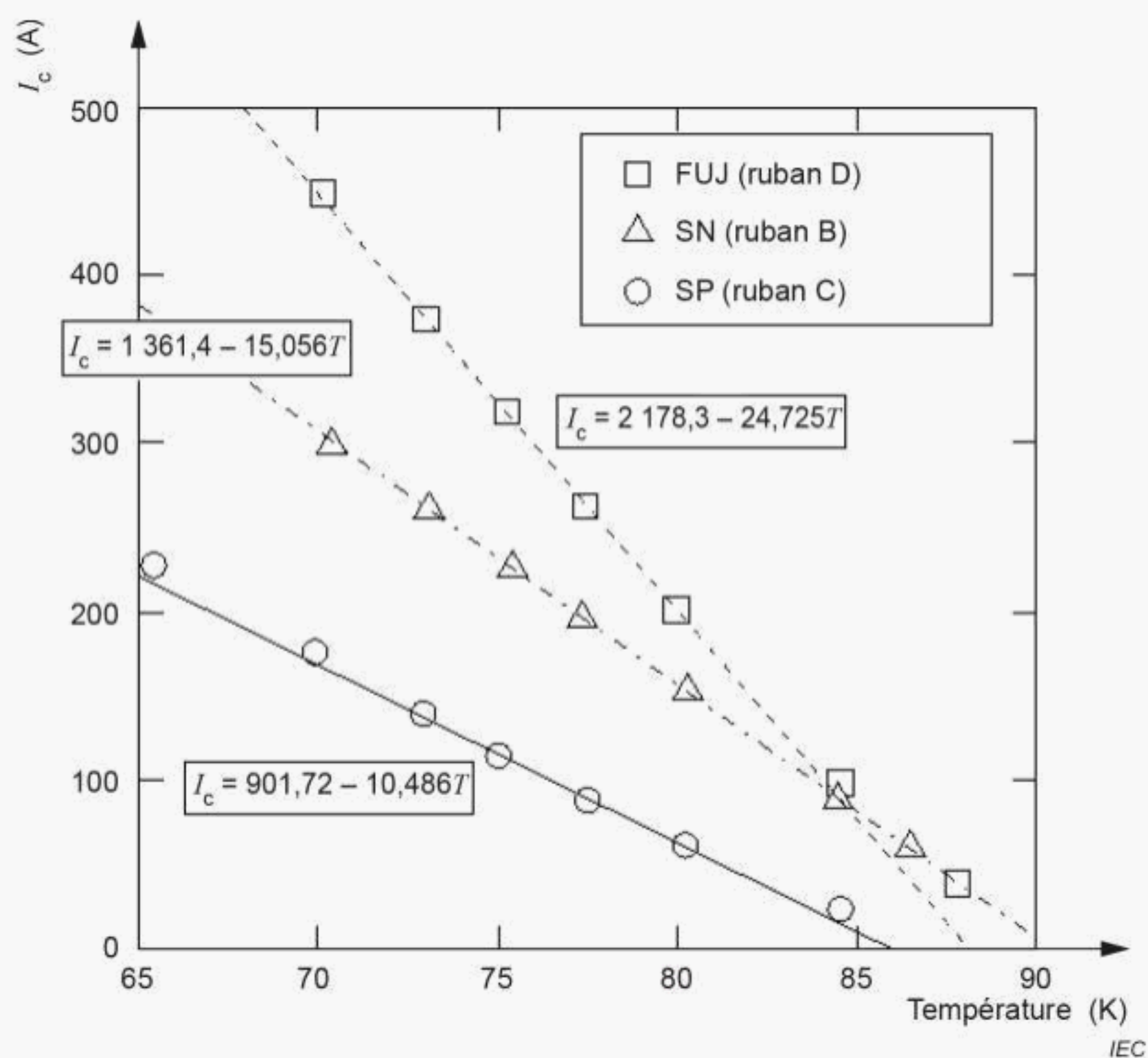


Figure A.2 – Dépendance du courant  $I_c$  des supraconducteurs REBCO commerciaux vis-à-vis de la température (données issues de [9])

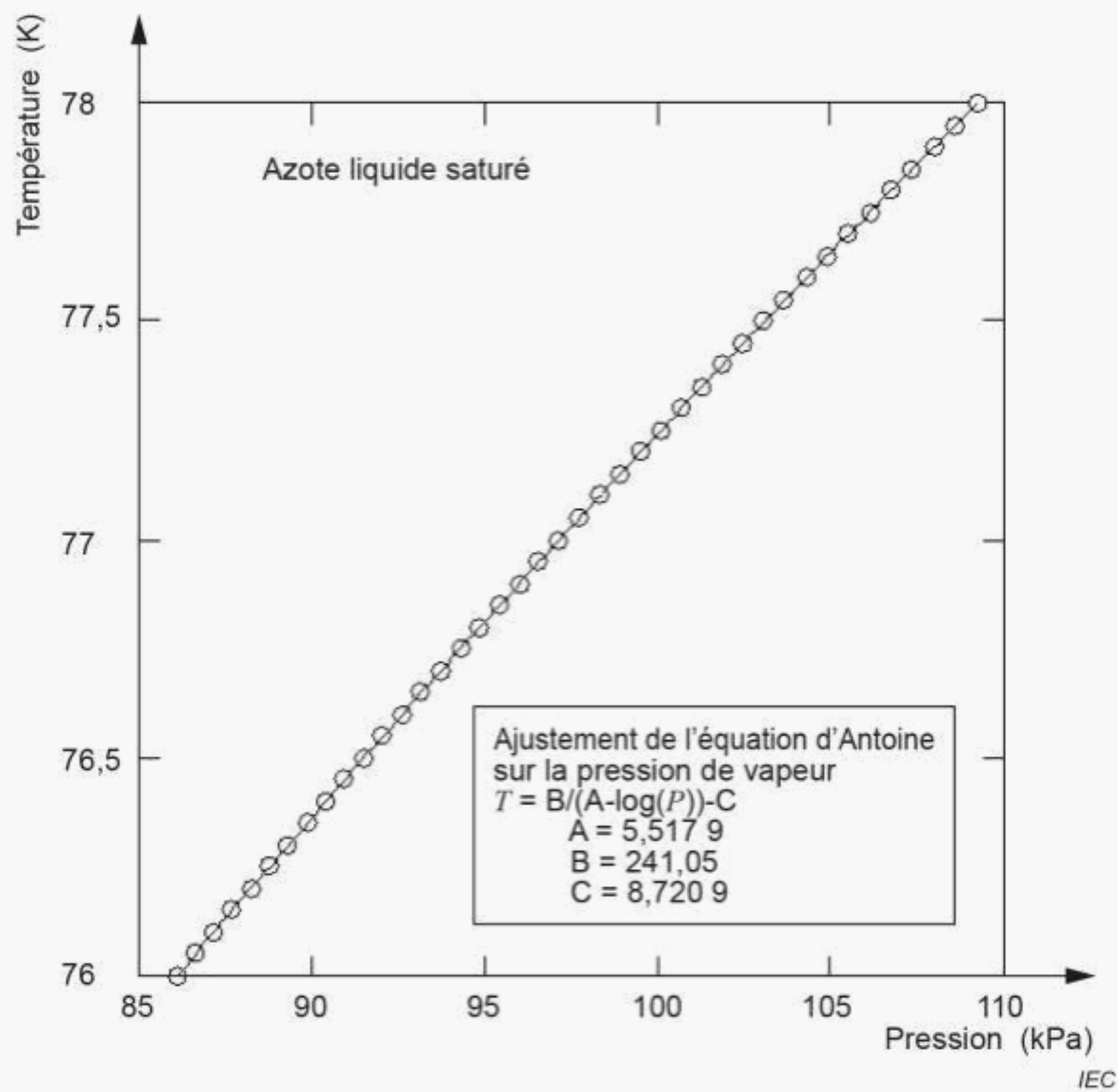


Figure A.3 – Dépendance de la température d'ébullition de l'azote liquide vis-à-vis de la pression

#### A.5.4 Bruit du système et autres contributions à la tension mesurée

Si le bruit du système est significatif par rapport à la valeur recommandée de la tension, c'est-à-dire  $U_c$ , il est souhaitable d'augmenter le temps de variation du courant zéro au courant  $I_c$  au-delà de 30 s. Dans ce cas, il convient de prendre soin d'augmenter suffisamment la capacité thermique et/ou la surface de refroidissement des contacts de courant, de façon à annuler l'influence de la production de chaleur due à la durée exigée pour les mesurages. Il convient de noter que la méthode de variation et de maintien du courant permet l'intégration de données qui peuvent être réparties de manière appropriée sur la caractéristique  $U-I$ .

Soumettre l'échantillon à des variations de courant peut créer une tension positive ou négative sur les prises de tension. Cette source de tension parasite peut être identifiée pendant la variation, car elle est proportionnelle à la vitesse de variation. Si cette tension est significative par rapport à  $U_c$ , diminuer la vitesse de variation (augmenter le temps de variation du courant zéro au courant  $I_c$ ), diminuer la surface de la boucle formée par les prises de tension et l'échantillon situé entre elles, ou bien utiliser la méthode de variation et de maintien du courant.

La tension de base peut comprendre les tensions thermoélectriques, les tensions décalées, les tensions de terre et les tensions en mode commun. Par hypothèse, ces tensions demeurent relativement constantes pendant la durée d'enregistrement de chaque caractéristique  $U-I$ . De légères variations de tensions thermoélectriques et décalées peuvent être supprimées de façon approchée en mesurant la tension de base avant et après le mesurage de la courbe  $U-I$  et en partant du principe que la variation est linéaire dans le temps. Si la variation de tension est significative par rapport à  $U_c$ , il convient d'apporter des corrections à la configuration expérimentale.

Une plus grande séparation entre un contact de courant et une prise de tension peut être nécessaire s'il existe, par rapport aux critères, une tension de transfert de courant significative.

#### A.6 Calcul de la valeur $n$

La courbe de la caractéristique  $U-I$  d'un ruban supraconducteur située à côté de  $I_c$  peut généralement être obtenue par approximation à l'aide de l'équation empirique à loi en puissance:

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

où

$U$  est la tension de l'échantillon en microvolts ( $\mu\text{V}$ );

$U_c$  est la tension du critère de courant critique en microvolts ( $\mu\text{V}$ );

$I$  est le courant de l'échantillon en ampères (A);

$I_c$  est le courant critique en ampères (A).

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

Le tracé de  $\log U$  en fonction de  $\log I$  n'est pas toujours linéaire, même pour la plage de courant proche des critères de courant critique ( $E_c$ ) de  $10 \mu\text{V/m}$  et de  $100 \mu\text{V/m}$ , et il est donc nécessaire de consigner la plage des critères utilisés pour déterminer les valeurs  $n$ .

## Annexe B (informative)

### Évaluation de l'incertitude type composée pour le mesurage de $I_c$ des supraconducteurs REBCO [8]

#### B.1 Mesurage pratique du courant critique

Un supraconducteur dans un état supraconducteur, qui n'a aucune résistance, passe à l'état normal lorsqu'un courant de transport dépasse une certaine valeur seuil. La valeur du courant de seuil est appelée courant critique ( $I_c$ ). Il existe plusieurs méthodes de mesure de  $I_c$ . Une méthode à quatre sondes, la plus populaire et la plus pratique, est présentée dans l'Annexe B.

Le mesurage de  $I_c$  avec quatre sondes est décrit à l'aide d'un circuit représenté à la Figure B.1.

Le courant de transport ( $I$ ) est fourni par une alimentation en courant continu. La chute de tension ( $U$ ) sur la longueur de l'échantillon est mesurée. La caractéristique type  $U-I$  est représentée à la Figure B.2. La caractéristique  $U-I$  est non linéaire. La valeur du courant de transport qui correspond à la tension de seuil  $U_c$  est déterminée et équivaut à  $I_c$ .

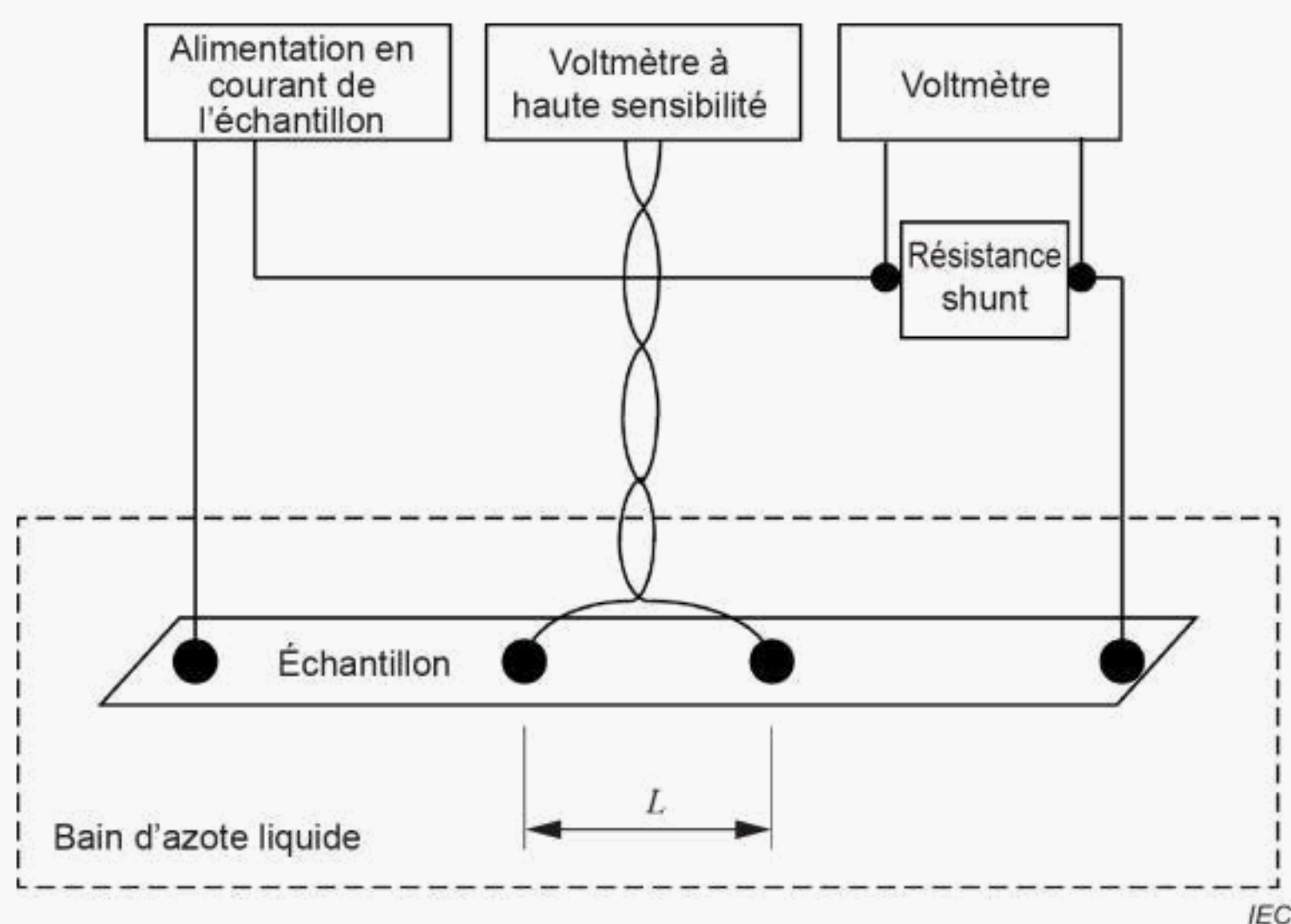
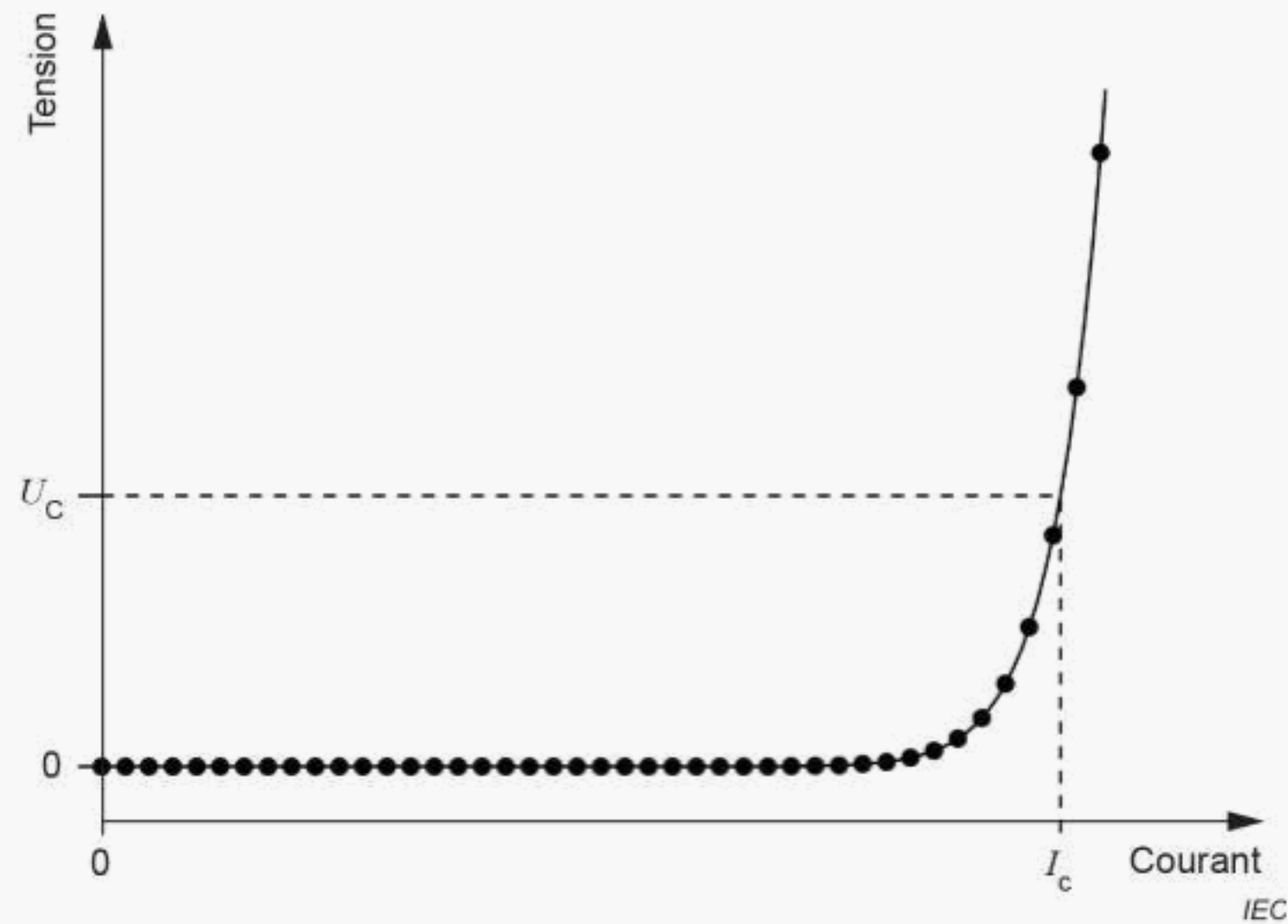


Figure B.1 – Circuit type de mesure de  $I_c$ .



Le courant qui correspond à la tension de seuil ( $U_c$ ) est déterminé et est égal à  $I_c$ .

**Figure B.2 – Caractéristique tension–courant (  $U-I$  ) type d'un supraconducteur**

## B.2 Équation modèle

Une valeur approchée de la caractéristique  $U-I$  d'un supraconducteur pratique est obtenue par une loi de puissance empirique:

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

où l'indice  $n$  est appelé valeur  $n$ .  $U_c$  est décrite en utilisant  $L1$ , qui est une distance entre la paire de prises de tension:

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

où

$E_c$  est un critère de champ électrique utilisé pour déterminer  $I_c$ .

En prenant en considération les Formules (B.1) et (B.2), l'équation modèle peut être décrite comme suit:

$$I_c = \frac{L E_c^{\frac{1}{n}}}{U} I + g_{\text{Temp}}(T) + \varepsilon_{\text{NU}} \quad (\text{B.3})$$

où  $g_{\text{Temp}}(T)$  et  $\varepsilon_{\text{NU}}$  sont les termes provenant respectivement de la température et de la non-uniformité de  $I_c$  sur la longueur du conducteur.



### B.3 Résultats de mesure de $I_c$

Un essai international de comparaison interlaboratoires a été réalisé sur le mesurage du courant critique ( $I_c$ ) des supraconducteurs REBCO. Quatre types de conducteurs REBCO ont été distribués à 10 institutions/universités/industries participantes. Chaque entité participante a mesuré cinq échantillons pour chaque conducteur. Le Tableau B.1 présente les spécifications des conducteurs distribués.

**Tableau B.1 – Conducteurs distribués dans le cadre de l'essai international de comparaison interlaboratoires**

Fabricant	A	B	C	D
Terre rare	Y	Gd	Y et Gd	Gd
Dépôts	RABiTS/MOD	IBAD/RCE-DR	IBAD/MOCVD	IBAD/PLD
Largeur du ruban [mm]	4,4	4,1	4	5
Épaisseur du ruban [mm]	0,4	0,1	0 095	0,16
Épaisseur du supraconducteur [ $\mu\text{m}$ ]	1	1,0 à 1,5	aucune information	aucune information
Substrat	Ni-5W	Alliage à base de Ni	Alliage à base de Ni	Alliage à base de Ni
Épaisseur du substrat [ $\mu\text{m}$ ]	50 à 75	60	50	75
Stratifié	Laiton	s/o	s/o	s/o
Épaisseur du stratifié [ $\mu\text{m}$ ]	150	s/o	s/o	s/o
Stabilisateur en cuivre	s/o	Des deux côtés	Des deux côtés	Côté du supraconducteur
Épaisseur du cuivre [ $\mu\text{m}$ ]	s/o	aucune information	20 × 2	75

s/o = sans objet

Les Tableau B.2, Tableau B.3, Tableau B.4, et Tableau B.5 présentent les données  $I_c$  rapportées par les participants P1 à P10 pour les conducteurs A, B, C et D. Étant donné que certaines données manquaient chez le participant 9 (P9), la colonne P9 n'a pas été prise en compte dans l'analyse des conducteurs B et D.

**Tableau B.2 – Données  $I_c$  pour le conducteur A**

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1	104,898	102,89	97,802	97,73	104,0	106,95	104,3	104,05	103,190	105,54
2	106,819	102,93	98,834	100,86	103,8	108,20	102,0	104,69	100,755	106,10
3	108,932	102,49	98,731	103,38	102,8	104,87	103,6	104,25	113,625	105,35
4	103,792	101,22	99,062	98,89	101,2	105,07	101,4	103,35	110,202	105,77
5	104,538	102,32	98,608	99,55	100,60	104,09	103,80	102,70	104,338	105,98
$I_{c,avg}$ [A]	105,796	102,37	98,607	100,082	102,48	105,836	103,02	103,808	106,422	105,748
$X_{SD}$ [A]	2,079	0,693 4	0,480 2	2,163	1,527	1,688	1,250	0,785 7	5,317	0,308 2
$X_{SU}$ [A]	0,929 7	0,310 1	0,214 7	0,9674	0,682 9	0,754 9	0,558 9	0,351 4	2,378	0,137 8
$X_{RSU}$ [%]	0,879	0,303	0,218	0,967	0,666	0,713	0,543	0,338	2,234	0,130

**Tableau B.3 – Données  $I_c$  pour le conducteur B**

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1	187,837	197,180	189,935	196,920	189,600	198,020	191,000	187,350	191,440	200,140
2	183,258	189,390	184,803	191,290	191,400	198,990	190,800	192,570	181,650	197,050
3	188,917	193,150	191,041	192,630	193,000	193,910	197,000	198,360		195,870
4	192,467	194,320	188,539	194,210	191,600	193,100	195,600	197,920		192,160
5	187,803	195,510	192,863	190,540	187,600	194,680	177,600	193,320		196,920
$I_{c,avg}$ [A]	188,056	193,910	189,436	193,118	190,640	195,740	190,400	193,904	186,545	196,428
$X_{SD}$ [A]	3,291	2,934	3,035	2,543	2,085	2,608	7,664	4,502	6,923	2,869
$X_{SU}$ [A]	1,472	1,312	1,357	1,137	0,933	1,166	3,428	2,013	4,895	1,283
$X_{RSU}$ [%]	0,783	0,677	0,716	0,589	0,489	0,596	1,800	1,038	2,624	0,653

**Tableau B.4 –  $I_c$  data for conductor C**

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1	89,626	90,674	87,649	86,160	89,600	88,790	91,200	88,960	92,650	91,490
2	90,814	93,314	90,775	86,040	89,800	94,080	93,400	91,300	92,650	92,960
3	92,230	88,783	88,390	88,360	88,600	87,960	93,100	91,460	93,700	91,670
4	89,545	90,176	86,317	88,330	89,600	90,910	90,500	91,790	92,760	92,170
5	89,231	89,539	85,786	86,340	87,400	88,670	90,800	92,630	91,110	89,790
$I_{c,avg}$ [A]	90,289	90,497	87,783	87,046	89,000	90,082	91,800	91,228	92,574	91,616
$X_{SD}$ [A]	1,240	1,727	1,967	1,191	1,010	2,492	1,351	1,368	0,930	1,169
$X_{SU}$ [A]	0,555	0,772	0,880	0,532	0,452	1,114	0,604	0,612	0,416	0,523
$X_{RSU}$ [%]	0,614	0,853	1,002	0,612	0,507	1,237	0,658	0,671	0,449	0,571

**Tableau B.5 –  $I_c$  data for conductor D**

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1	303,462	300,650	298,120	294,860	296,000	307,890	300,400	303,570	293,315	303,470
2	303,423	292,180	300,163	289,150	291,800	306,620	301,800	298,690	294,705	299,000
3	304,080	293,070	294,352	292,380	293,400	299,710	299,500	305,450	298,985	300,160
4	304,160	301,190	300,766	296,600	293,200	307,080	307,700	306,650	301,955	299,750
5	308,802	303,200	296,921	286,880	295,000	314,780	303,900	300,070		303,580
$I_{c,avg}$ [A]	304,785	298,058	298,064	291,974	293,880	307,216	302,660	302,886	297,240	301,192
$X_{SD}$ [A]	2,271	5,060	2,588	3,994	1,641	5,347	3,270	3,419	3 963	2 170
$X_{SU}$ [A]	1,016	2,263	1,157	1,786	0,734	2,391	1,462	1,529	1,981	0,971
$X_{RSU}$ [%]	0,333	0,759	0,388	0,612	0,250	0,778	0,483	0,505	0,667	0,322

Le Tableau B.6 indique les valeurs moyennes, les écarts types (SD - standard deviation) et les écarts types relatifs (RSD - relative standard deviation) de  $I_c$  pour chaque conducteur. La variance interlaboratoires n'est pas prise en compte. Noter que les données P9 n'ont pas été exploitées pour les conducteurs B et D. Les RSD se situent dans la plage de 1,9 % à 3,1 %.

**Tableau B.6 – Statistiques pour chaque conducteur**

ID du conducteur	A	B	C	D
<i>N</i>	50	45	50	45
<i>I<sub>c,avg</sub> [A]</i>	103,42	192,40	90 192	300,08
<i>X<sub>SD</sub> [A]</i>	3,176	4,447	2,189	5,746
<i>X<sub>RSD</sub> [%]</i>	3,071	2,311	2,427	1,915

Il convient en réalité de prendre en considération d'autres effets, par exemple ceux relatifs au jour, à l'homme, au laboratoire, etc. Par hypothèse, la variance interlaboratoires peut regrouper l'ensemble des effets. De même, par hypothèse, les cinq échantillons ont été mesurés le même jour. Une analyse de la variance (ANOVA - analysis of variance) permet d'obtenir le Tableau B.7 qui indique que l'effet interlaboratoires est considérablement important.

**Tableau B.7 – Résultats de l'ANOVA pour chaque conducteur**

ID du conducteur	A	B	C	D
<i>N</i>	50	45	50	45
<i>sa2(interlaboratoires)</i>	34,73	588,5	15,89	111,7
<i>sb2(intralaboratoires)</i>	4,544	156,15	2 296	12,42
<b>Valeur <i>F</i></b>	7,644	3,769	6,918	8,996
<i>F<sub>0,95</sub> (<i>f<sub>a</sub></i>, <i>f<sub>b</sub></i>)</i>	2,124	2,209	2,124	2,209

#### B.4 Incertitude type composée [11]

L'incertitude type composée  $u_c$  pour (B.3) est donnée par

$$u_c^2 = \left( \frac{\partial I_c}{\partial L_1} \right)^2 u_1^2 + \left( \frac{\partial I_c}{\partial U} \right)^2 u_2^2 + \left( \frac{\partial I_c}{\partial I} \right)^2 u_3^2 + \left( \frac{\partial I_c}{\partial n} \right)^2 u_4^2 + c_{\text{Temp}}^2 u_{\text{Temp}}^2 + c_{\text{NU}}^2 u_{\text{NU}}^2 \quad (\text{B.4})$$

Les coefficients de sensibilité pour (B.4) sont donnés par

$$c_1 = \frac{\partial I_c}{\partial L_1} = \frac{I_c}{n L_1} \quad (\text{B.5})$$

$$c_2 = \frac{\partial I_c}{\partial U} = - \frac{I_c}{U} \quad (\text{B.6})$$

$$c_3 = \frac{\partial I_c}{\partial I} = \frac{I_c}{I} \quad (\text{B.7})$$

$$c_4 = \frac{\partial I_c}{\partial n} = \frac{I_c}{n} \log \frac{L_1 E_c}{U} \quad (\text{B.8})$$

Le quatrième terme de la Formule (B.4) peut être ignoré dans cette évaluation car  $c_4 = 0$  à  $I = I_c$  ( $U = U_c$ ).

## B.5 Évaluation d'incertitude de type B

### B.5.1 Généralités

La précondition suivante est retenue par hypothèse pour le conducteur C:  $L_1 = 80$  mm,  $I_c = 90$  A,  $n = 30$ , et  $U_c = 8$   $\mu$ V. En vertu de cette précondition,  $c_1$ ,  $c_2$  et  $c_3$  sont calculés et donnent respectivement 0,0375 A/mm, 0,375 A/ $\mu$ V et 1,0 à  $I = I_c$ .

### B.5.2 Incertitude de mesure de $L_1$

La distance est mesurée à l'aide d'une règle dont l'échelle minimale est de 1 mm. L'incertitude type (SU - standard deviation)  $u_{11}$  est donnée par

$$u_{11} = \frac{0,5}{\sqrt{3}} = 0,289 \text{ [mm]} \quad (\text{B.9})$$

Le coefficient de sensibilité  $c_{11} = c_1 = 0,05$  A/mm.

### B.5.3 Incertitude de mesure de la tension

Le deuxième terme de la Formule (B.4) est exprimé comme suit

$$u_{22}(U) = \frac{\partial U^2}{\partial U} u_{212}(U) + \frac{\partial U^2}{\partial t} u_{222}(t) \quad (\text{B.10})$$

La tension est mesurée à l'aide d'un voltmètre numérique, généralement un nanovoltmètre ayant une résolution minimale de 1 nV. Par hypothèse, un nanovoltmètre avec une portée de 10 mV et un automate programmable sont utilisés. Le bruit en continu est considéré comme étant  $\Delta U = 70$  nV. Ainsi, l'incertitude type (SU)  $u_{21}$  est donnée par

$$u_{21} = \frac{\frac{\Delta U}{2}}{\sqrt{3}} = \frac{0,035}{\sqrt{3}} = 0,0202 \text{ [}\mu\text{V]} \quad (\text{B.11})$$

Le deuxième facteur provient de la vitesse de variation du courant. En partant du principe que le temps de variation depuis le courant zéro au courant  $I_c$  est de 10 s, la vitesse de variation de la tension à  $I_c$  est donnée par

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dU}{dI} \frac{dI}{dt} = \frac{nU_c}{I_c} \frac{I_c}{10} = \frac{nU_c}{10} = \frac{30 \times 8}{10} = 24 \text{ [}\mu\text{V/s]} \quad (\text{B.12})$$

La fréquence d'échantillonnage de 66,7 ms peut être estimée pour un nanovoltmètre commandé par carte d'interface bus universel (GPIB - General Purpose Interface Bus). Ainsi, SU  $u_{22}$  est donnée par



$$\frac{\partial U}{\partial t} u_{22} = \frac{24 \times \frac{0,0667}{2}}{\sqrt{3}} = 0,4621 \text{ } [\mu\text{V}] \quad (\text{B.13})$$

#### B.5.4 Incertitude de mesure du courant

Le mesurage du courant correspond généralement au mesurage de la tension d'une résistance shunt. De plus, la température du bain d'azote liquide (LN2) est également prise en considération. Le troisième terme de la Formule (B.4) est exprimé comme suit

$$u_{32}(I) = \frac{\partial I^2}{\partial U} u_{312}(U) + \frac{\partial I^2}{\partial t} u_{322}(t) \quad (\text{B.14})$$

Le coefficient de sensibilité du premier terme  $c_{31}$  est décrit par

$$\frac{dI}{dU} = \frac{1}{R_s} = \frac{1}{0,25} = 4 \text{ } [\text{A/mV}] \quad (\text{B.15})$$

où  $R_s$  est la résistance de la résistance shunt et où il est estimé que  $R_s = 0,25 \text{ m}\Omega$ . Par hypothèse, un nanovoltmètre numérique avec une portée de 100 mV et un automate programmable sont utilisés. Le bruit en continu est considéré comme étant  $\Delta U = 4 \text{ } \mu\text{V}$ . Ainsi, l'incertitude type (SU)  $u_{31}$  est donnée par

$$u_{31} = \frac{\frac{\Delta U}{2}}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,155 \text{ } [\mu\text{V}] \quad (\text{B.16})$$

Alors,  $I$  est réputé proche de  $I_c = 90 \text{ A}$ . La fréquence d'échantillonnage est par principe égale à celle retenue pour le mesurage de la tension (66,7 ms). La SU  $u_{32}$  est donnée par

$$\frac{\partial I}{\partial t} u_{32} = \frac{90 \times 0,0667}{\sqrt{3}} = 0,1733 \text{ } [\mu\text{V}] \quad (\text{B.17})$$

#### B.5.5 Incertitude de mesure de la température

Comme cela est représenté à la Figure A.2, les conducteurs REBCO  $I_c$  sont sensibles à la température. Le coefficient de sensibilité, qui dépend du fabricant, est

$$c_4 = \frac{\partial I_c}{\partial T_c} = -10,49 \text{ } [\text{A/K}] \quad (\text{B.18})$$

pour le conducteur C.

Une possible différence de température entre les laboratoires fait actuellement l'objet de discussion. Le Tableau B.8 présente des analyses statistiques de la pression atmosphérique à Tsukuba, Tokyo, Osaka, Kyoto et Chiba du 1er janvier 2014 au 31 décembre 2014. Il peut être envisagé une distribution admissible de la pression atmosphérique à l'aide des valeurs moyennes et de l'écart type. Les valeurs les plus élevées et les plus faibles sont 1 020,67 hPa et 998,23 hPa, ce qui correspond respectivement aux températures d'ébullition de LN<sub>2</sub> (azote liquide) de 77,403 K et 77,215 K. Les valeurs de température sont calculées à l'aide de l'équation d'Antoine [10].

**Tableau B.8 – Pression atmosphérique du 1er janvier 2014 au 31 décembre 2014**

	Tsukuba	Tokyo	Osaka	Kyoto	Chiba
<b>Nombre de données</b>	8 760	8 760	8 760	8 760	8 760
<b>Maximale [hPa]</b>	1 028,3	1 028,2	1 023,8	1 027,6	1 030,7
<b>Minimale [hPa]</b>	979,3	974,8	974,7	978,5	976,5
<b>Moyenne [hPa]</b>	1 010,7	1 009,56	1 005,43	1 009,08	1 013,2
<b>SD (écart type) [hPa]</b>	7,46063	7,48509	7,20253	7,34407	7,46523
$P_{avg} + P\sigma$	1 018,16	1 017,05	1 012,63	1 016,42	1 020,67
$P_{avg} - P\sigma$	1 003,24	1 002,07	998,227	1 001,74	1 005,73
$T_{high}$ [K]	77,382	77,373	77,336	77,368	77,403
$T_{low}$ [K]	77,257	77,247	77,215	77,245	77,278

La distribution possible de la température est par hypothèse limitée à la plage suivante:

$$\Delta T = 77,403 - 77,215 = 0,188 \text{ [K]} \quad (\text{B.19})$$

Ainsi, l'incertitude type évaluée est égale à

$$u_4 = \frac{0,188}{\sqrt{3}} = 0,05196 \text{ [K]} \quad (\text{B.20})$$

#### B.5.6 Incertitude due à la non-uniformité intrinsèque de $I_c$

La non-uniformité intrinsèque de  $I_c$  a été évaluée par microscopie-sonde de Hall à balayage équipée de bobines (RTR-SHPM) [12] pour un conducteur d'une longueur de 10 m.  $I_c$  évalué correspondait à un critère de champ électrique de 10<sup>-8</sup> V/m avec une résolution de 0,43 mm. Les valeurs  $I_c$  obtenues ont été converties en valeurs  $I_c$  correspondant au critère de 10<sup>-4</sup> V/m à l'aide d'une loi de puissance empirique avec une valeur  $n$  constante pour chaque conducteur. Le Tableau B.9 indique les valeurs  $I_c$  brutes et converties et les écarts types (SD) pour chaque conducteur. Les écarts types relatifs (coefficients de variation) vont de 2,1 à 2,8 pour  $I_c$  converti. Le paramètre  $N = 22000$  a été utilisé pour déduire l'écart type relatif (RSD). Mais ce nombre est le nombre de points mesurés et non le nombre de répétitions. Ainsi, RSD et SD correspondent respectivement à l'incertitude type relative (RSU) et à l'incertitude type (SU) avec  $N = 1$ . Pour le conducteur C, SD et RSD sont respectivement de 1,96 A et 2,2 %.

**Tableau B.9 – Non-uniformité intrinsèque de  $I_c$  évaluée par microscopie RTR-SHPM**

Conducteur	$I_c$ évalué par RTR-SHPM (critère $10^{-8}$ V/m, résolution 0,43 mm)			$I_c$ converti (critère $10^{-4}$ V/m, résolution 90 mm)		
	$I_{c,avg}$ [A]	SD [A]	RSD [%]	$I_{c,avg}$ [A]	SD [A]	RSD [%]
A	88,4	2,62	2,96	116	2,44	2,1
B	155,7	5,57	3,58	201	5,03	2,5
C	67,2	2,11	3,14	89	1,96	2,2
D	211,6	8,44	3,99	271	7,59	2,8

**B.5.7 Comparaison entre les incertitudes types composées de type A et de type B**

L'incertitude type relative (RSU) de type B est évaluée à 0,32 % pour le conducteur C. Le Tableau B.10 présente le tableau budgétaire pour l'évaluation de l'incertitude de type B en tenant compte de sources complémentaires. La non-uniformité intrinsèque du conducteur lui-même peut être considérée comme la première contribution à l'incertitude.

Les deuxième et troisième contributions sont respectivement les mesurages de température et de tension. L'incertitude des mesurages de tension est dominée par l'effet de la fréquence d'échantillonnage. Plus le temps de variation est long, plus l'incertitude attendue est petite. En ce qui concerne la température, il est important de consigner la température à laquelle  $I_c$  a été mesuré.

**Tableau B.10– Tableau budgétaire des incertitudes types de mesure de  $I_c$  pour le conducteur C**

Composante	Source	$ij$	$c_{ij}$	$u_{ij}$	$c_{ij}u_{ij}$ [A]
$L_1$	Longueur	11	0,0375 [A/mm]	0,289 [mm]	0,01083
$U$	Bruit en continu	21	0,375 [A/ $\mu$ V]	0,0202 [ $\mu$ V]	0,007578
	Temps de variation	22	0,375 [A/ $\mu$ V]	0,4621 [ $\mu$ V]	0,1733
$I$	Bruit en continu	31	1	0,004619 [A]	0,004619
	Temps de variation	32	1	0,1733 [A]	0,1733
$T$	Température	4	-10,49 [A/K]	0,05196 [K]	-0,5449
$I_c$	Non-uniformité	5	1	1,96 [A]	1,96

Ainsi, l'incertitude type composée est donnée par

$$u_c = \sqrt{\sum_i \sum_j (c_{ij}u_{ij})^2} = 2,05[\text{A}] \quad (\text{B.21})$$

L'incertitude type relative (RSU) est calculée et est égale à 2,27 %.

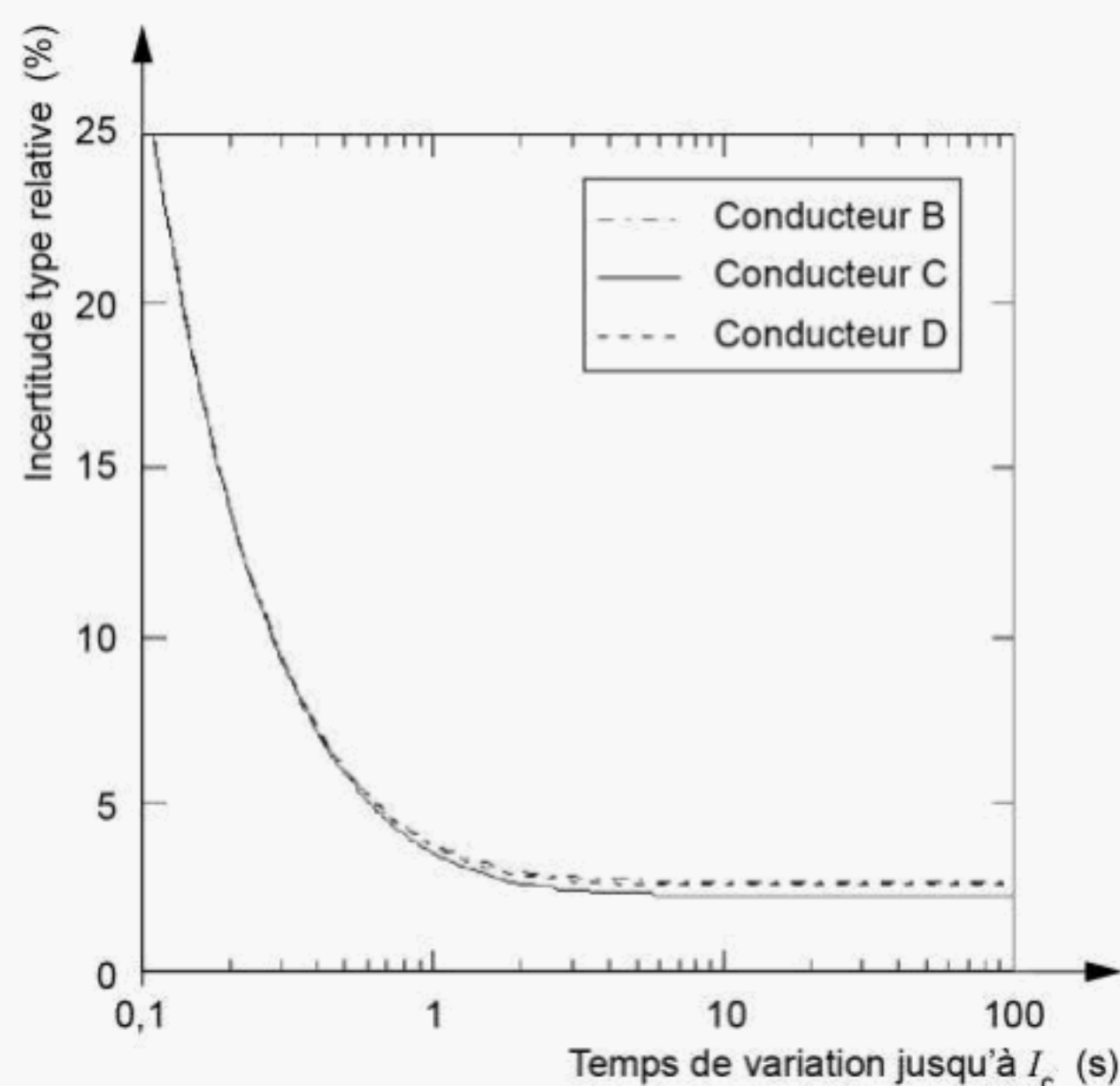
Des analyses similaires ont été adoptées pour les conducteurs B et D. La RSU calculée à l'aide d'une évaluation de type B peut être donc comparée à la RSU obtenue avec une évaluation de type A. Les valeurs de RSD des évaluations de type A correspondent à la RSU pour  $N = 1$ . Le Tableau B.11 présente des comparaisons entre les incertitudes de types A et B pour les conducteurs B, C et D. Malheureusement, étant donné que la dépendance de  $I_c$  vis-à-vis de la température n'était pas connue pour le conducteur A, il n'existe pas de résultat d'évaluation de type B. Cependant, le Tableau B.11 indique que les deux analyses s'accordent bien. Il peut être conclu que la méthode de mesure de  $I_c$  décrite dans le présent document fournit une incertitude type composée < 3 %.

**Tableau B.11 – Comparaison des incertitudes types relatives pour les conducteurs B, C et D**

		B	C	D
Type A	$I_{c,avg}$ [A]	192,40	90,19	300,1
	$X_{SU}$ [A]	4,447	2,189	5,476
	$X_{RSU}$ [%]	2,31	2,43	1,91
Type B	$Y_{SU}$ [A]	5,112	2,047	7,739
	$Y_{RSU}$ [%]	2,69	2,27	2,58

### B.6 Influence du temps de variation du courant sur l'incertitude globale

Les paragraphes B.5.2 et B.5.3 impliquent que les incertitudes provenant de  $U$  et  $I$  sont influencées par le temps de variation du courant, qui correspond au temps allant du courant zéro à  $I_c$ . Les incertitudes décrites dans le Tableau B.10 ont été calculées pour un temps de variation de 10 secondes. La dépendance de la RSU (incertitude type relative) globale vis-à-vis du temps de variation est représentée à la Figure B.3. Les RSU augmentent avec la diminution du temps de variation. Elles dépassent 5 % lorsque le temps de variation est inférieur à 0,6 s. Un temps d'échantillonnage de données de 66,7 ms ayant été retenu par hypothèse dans ce calcul, un temps de variation de 0,6 s est donc inférieur à 10 points de données. La RSU peut être diminuée lorsqu'un temps d'échantillonnage plus important est utilisé.



**Figure B.3 – Dépendance de la RSU globale de  $I_c$  vis-à-vis du temps de variation pour les conducteurs B, C et D**



## Bibliographie

- [1] J.W. Ekin, *Experimental techniques for low-temperature measurements*, Oxford University Press, 2006
- [2] Calculated from data by H. You, J.D. Axe, X.B. Kan, S. Hashimoto, S.C. Moss, J.Z. Liu, G.W. Crabtree, and D.J. Lam, "Phase constitution and thermal expansion of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-Δ</sub> single crystals", *Phys. Rev. B* 38 (1988) 9213-9216
- [3] Y.S. Touloukian, R.K. Kirby, R.E. Taylor, and P.D. Desai, *Thermophysical Properties of Matter – the TPRC Data Series, Vol. 12 Thermal expansion: Metallic Elements and Alloys*, p. 1248
- [4] *Properties of Materials at Low Temperature (Phase 1)*, edited by V.J. Johnson, Pergamon Press, 1961
- [5] T.A. Hahn, "Thermal expansion of copper from 20 to 800 K – Standard reference material 736", *J. Appl. Phys.* 41 (1970) 5096-5101
- [6] A.F. Clark, G. Fujii, and M.A. Ranney, "The thermal expansion of several materials for superconducting magnets", *IEEE Trans. Magn.* MAG-17 (1981) 2316-2319
- [7] A.F. Clark, Chapter 3, in *Materials at Low Temperature* (1983) pp. 96-97, ASM International, Materials park, Ohio
- [8] G. Nishijima et al., "International round robin test for critical current measurement of RE-Ba-Cu-O superconducting tapes," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 28 (2018) 6601205
- [9] G. Nishijima, Y. Tsuchiya, H. Kitaguchi, T. Nishimura and T. Kato, "*I<sub>c</sub>-B-T* evaluation for high- *T<sub>c</sub>* superconductors in pressurized/depressurized liquid nitrogen," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 23 (2013) 8000703
- [10] M.R. Moussa, R. Muijlwijk, and H.V. Dijk, "The vapour pressure of liquid nitrogen," *Physica*, 32 (1966) 900-912
- [11] Guide ISO/IEC 98-3:2008, Incertitude de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)
- [12] K. Higashikawa et al., "Nondestructive diagnostics of narrow coated conductors for electric power applications," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 24 (2014) 6600704





