



# INTERNATIONAL STANDARD

# NORME INTERNATIONALE



---

## **Superconductivity –**

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

## **Supraconductivité –**

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

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

---

ICS 17.220; 29.050; 77.040.10

ISBN 978-2-8322-5801-9

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.  
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

## CONTENTS

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

B.5	Evaluation of standard uncertainty (SU) for each measurand .....	24
B.5.1	Voltage tap length ( $L$ ) .....	24
B.5.2	Voltage ( $U$ ) .....	24
B.5.3	Current ( $I$ ) .....	25
B.6	Evaluation of combined standard uncertainty .....	26
Bibliography.....		29
Figure 1	– Sample holder.....	9
Figure 2	– Intrinsic $U$ - $I$ characteristic .....	12
Figure 3	– $U$ - $I$ characteristic with a current transfer component.....	12
Figure A.1	– Measurement configuration for a few hundred ampere class conductor.....	15
Figure A.2	– Clips .....	15
Figure A.3	– Additional strain caused by voltage tap wires and solders.....	16
Figure A.4	– Boiling temperature of liquid nitrogen versus atmospheric pressure .....	17
Figure A.5	– Critical current versus temperature for a typical Bi-2223 wire.....	18
Figure A.6	– Bending process .....	19
Figure B.1	– $U$ - $I$ diagram .....	22
Figure B.2	– Bending diameter dependence of the retained $I_C$ and $\langle X_{COV} \rangle$ , where the calculated curve of $I_C/I_{C0}$ gives Equation (B.24).....	28
Table A.1	– Thermal expansion data of Bi-2223 superconductors and selected materials.....	14
Table A.2	– Average of the degree of retained critical current ( $I_C/I_{C0}$ ), their relative standard uncertainty and coefficient of variance.....	21
Table B.1	– Precondition for evaluating standard uncertainty .....	22
Table B.2	– Partial sum (Equation (B.17) of standard uncertainty as related to the current measurement).....	26
Table B.3	– Budget table of standard uncertainty for each component .....	27
Table B.4	– Combined standard uncertainty.....	27

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**SUPERCONDUCTIVITY –**

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

FOREWORD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## INTRODUCTION

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

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

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

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

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

## **SUPERCONDUCTIVITY –**

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

#### **1 Scope**

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

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

#### **2 Normative references**

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

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

## SOMMAIRE

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



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

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

### SUPRACONDUCTIVITÉ –

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

#### AVANT-PROPOS

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

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

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
90/402/FDIS	90/406/RVD

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

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

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

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

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

## INTRODUCTION

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

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

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

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

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

## SUPRACONDUCTIVITÉ –

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

#### **1 Domaine d'application**

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

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

#### **2 Références normatives**

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

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