

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Superconductivity –
Part 4: Residual resistance ratio measurement – Residual resistance ratio of
Nb-Ti and Nb₃Sn composite superconductors**

**Supraconductivité –
Partie 4: Mesurage du rapport de résistance résiduelle – Rapport de résistance
résiduelle des composites supraconducteurs de Nb-Ti et de Nb₃Sn**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 17.220.20; 29.050

ISBN 978-2-8322-7916-8

**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 Material of measurement mandrel or of measurement base plate	8
5.2 Diameter of the measurement mandrel and length of the measurement base plate	9
5.3 Cryostat for the resistance (R_2) measurement	9
6 Specimen preparation	9
7 Data acquisition and analysis	9
7.1 Resistance (R_1) at room temperature	9
7.2 Resistance (R_2 or R_2^*) just above the superconducting transition	10
7.2.1 Correction of strain effect	10
7.2.2 Data acquisition of cryogenic resistance	10
7.2.3 Optional acquisition methods	12
7.3 Correction on measured R_2^* of Nb-Ti composite superconductor for bending strain	12
7.4 Residual resistance ratio (RRR)	12
8 Uncertainty and stability of the test method	13
8.1 Temperature	13
8.2 Voltage	13
8.3 Current	13
8.4 Dimension	13
9 Test report	13
9.1 RRR value	13
9.2 Specimen	14
9.3 Test conditions	14
9.3.1 Measurements of R_1 and R_2	14
9.3.2 Measurement of R_1	15
9.3.3 Measurement of R_2	15
Annex A (informative) Additional information relating to the measurement of RRR	16
A.1 Recommendation on specimen mounting orientation	16
A.2 Alternative methods for increasing temperature of specimen above superconducting transition temperature	16
A.3 Alternative measurement methods of R_2 or R_2^*	16
A.4 Bending strain dependency of RRR for Nb-Ti composite superconductor	19
A.5 Procedure of correction of bending strain effect	22
Annex B (informative) Uncertainty considerations	24
B.1 Overview	24
B.2 Definitions	24

B.3	Consideration of the uncertainty concept	24
B.4	Uncertainty evaluation example for IEC TC 90 standards	26
Annex C (informative)	Uncertainty evaluation in test method of RRR for Nb-Ti and Nb ₃ Sn composite superconductors	28
C.1	Evaluation of uncertainty	28
C.2	Summary of round robin test of RRR of a Nb-Ti composite superconductor	31
C.3	Reason for large COV value in the intercomparison test on Nb ₃ Sn composite superconductor	32
Bibliography	34
Figure 1	– Relationship between temperature and resistance	8
Figure 2	– Voltage versus temperature curves and definitions of each voltage	11
Figure A.1	– Definition of voltages	18
Figure A.2	– Bending strain dependency of RRR value for pure Cu matrix of Nb-Ti composite superconductors (comparison between measured values and calculated values)	20
Figure A.3	– Bending strain dependency of RRR value for round Cu wires	20
Figure A.4	– Bending strain dependency of normalized RRR value for round Cu wires	21
Figure A.5	– Bending strain dependency of RRR value for rectangular Cu wires	21
Figure A.6	– Bending strain dependency of normalized RRR value for rectangular Cu wires	22
Figure C.1	– Distribution of observed r_{RRR} of Cu/Nb-Ti composite superconductor	32
Table A.1	– Minimum diameter of the measurement mandrel for round wires	22
Table A.2	– Minimum diameter of the measurement mandrel for rectangular wires	22
Table B.1	– Output signals from two nominally identical extensometers	25
Table B.2	– Mean values of two output signals	25
Table B.3	– Experimental standard deviations of two output signals	25
Table B.4	– Standard uncertainties of two output signals	26
Table B.5	– COV values of two output signals	26
Table C.1	– Uncertainty of each measurement	31
Table C.2	– Obtained values of RRR for six Nb ₃ Sn specimens	32
Table C.3	– Average, standard deviation and coefficient of variation for six specimens	33

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SUPERCONDUCTIVITY –**Part 4: Residual resistance ratio measurement –
Residual resistance ratio of Nb-Ti and Nb₃Sn
composite superconductors****FOREWORD**

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

This fifth edition cancels and replaces the fourth edition published in 2016. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- a) change in the suitable distance of voltage taps on the specimen for reliable measurement,
- b) new report on the result of the round robin test of the residual resistance ratio of Nb₃Sn superconductors that proves the validity of the measurement method in this standard,
- c) revision of the confusing definitions of the copper ratio and copper fraction.

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

FDIS	Report on voting
90/448/FDIS	90/451/RVD

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

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

A list of all parts of the IEC 61788 series, 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 website 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.

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

Copper, Cu/Cu-Ni or aluminium is used as matrix material in Ni-Ti and Nb₃Sn composite superconductors and works as an electrical shunt when the superconductivity is interrupted. It also contributes to recovery of the superconductivity by conducting heat generated in the superconductor to the surrounding coolant. The cryogenic-temperature resistivity of copper is an important quantity, which influences the stability and AC losses of the superconductor. The residual resistance ratio is defined as a ratio of the resistance of the superconductor at room temperature to that just above the superconducting transition.

This document specifies the test method for residual resistance ratio of Nb-Ti and Nb₃Sn composite superconductors. The curve method is employed for the measurement of the resistance just above the superconducting transition. Other methods are described in Clause A.3.

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 4: Residual resistance ratio measurement – Residual resistance ratio of Nb-Ti and Nb₃Sn composite superconductors

1 Scope

This part of IEC 61788 specifies a test method for the determination of the residual resistance ratio (RRR) of Nb-Ti and Nb₃Sn composite superconductors with Cu, Cu-Ni, Cu/Cu-Ni and Al matrix in a strain-free condition and zero external magnetic field. This method is intended for use with superconductor specimens that have a monolithic structure with rectangular or round cross-section, RRR value less than 350, and cross-sectional area less than 3 mm². In the case of Nb₃Sn, the specimens have received a reaction heat-treatment.

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* (available at: www.electropedia.org)

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	38
INTRODUCTION	40
1 Domaine d'application	41
2 Références normatives	41
3 Termes et définitions	41
4 Principe	42
5 Appareillage	42
5.1 Matériau du mandrin de mesure ou de l'embase de mesure	42
5.2 Diamètre du mandrin de mesure et longueur de l'embase de mesure	43
5.3 Cryostat pour le mesurage de la résistance (R_2)	43
6 Préparation de l'éprouvette	43
7 Acquisition et analyse des données	43
7.1 Résistance (R_1) à température ambiante	43
7.2 Résistance (R_2 ou R_2^*) juste au-dessus de la transition supraconductrice	44
7.2.1 Correction de l'effet contrainte/déformation	44
7.2.2 Acquisition des données de la résistance cryogénique	44
7.2.3 Méthodes d'acquisition facultatives	46
7.3 Correction de R_2^* mesurée d'un composite supraconducteur de Nb-Ti pour une flexion	47
7.4 Rapport de résistance résiduelle (RRR)	47
8 Incertitude et stabilité de la méthode d'essai	47
8.1 Température	47
8.2 Tension	47
8.3 Courant	47
8.4 Dimension	48
9 Rapport d'essai	48
9.1 Valeur du RRR	48
9.2 Éprouvette	48
9.3 Conditions d'essai	49
9.3.1 Mesurage de R_1 et R_2	49
9.3.2 Mesurage de R_1	49
9.3.3 Mesurage de R_2	49
Annexe A (informative) Informations supplémentaires concernant le mesurage du RRR	50
A.1 Recommandation concernant l'orientation du montage de l'éprouvette	50
A.2 Autres méthodes pour augmenter la température d'une éprouvette au- dessus de la température de transition supraconductrice	50
A.3 Autres méthodes de mesure de R_2 ou R_2^*	51
A.4 Dépendance du RRR vis-à-vis de la flexion du composite supraconducteur de Nb-Ti	53
A.5 Mode opératoire de correction de l'effet contrainte/déformation de flexion	56
Annexe B (informative) Considérations relatives à l'incertitude	58
B.1 Vue d'ensemble	58
B.2 Définitions	58

B.3	Considérations relatives au concept d'incertitude.....	59
B.4	Exemple d'évaluation d'incertitude pour les normes du comité d'études 90 de l'IEC.....	60
Annexe C (informative) Évaluation de l'incertitude de la méthode d'essai du RRR pour des composites supraconducteurs de Nb-Ti et Nb ₃ Sn.....		63
C.1	Évaluation de l'incertitude	63
C.2	Résumé de l'essai interlaboratoire du RRR d'un composite supraconducteur de Nb-Ti.....	66
C.3	Justification de la valeur de COV élevée dans l'essai interlaboratoire du composite supraconducteur de Nb ₃ Sn	67
Bibliographie.....		69
Figure 1 – Rapport entre la température et la résistance.....		42
Figure 2 – Courbes de la tension en fonction de la température et définitions de chaque tension		45
Figure A.1 – Définition des tensions.....		52
Figure A.2 – Dépendance de la valeur du RRR vis-à-vis de la flexion pour la matrice en cuivre pur des composites supraconducteurs de Nb-Ti (comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées).....		54
Figure A.3 – Dépendance de la valeur du RRR vis-à-vis de la flexion pour des fils de cuivre circulaires.....		54
Figure A.4 – Dépendance de la valeur normalisée du RRR vis-à-vis de la flexion pour des fils de cuivre circulaires.....		55
Figure A.5 – Dépendance de la valeur du RRR vis-à-vis de la flexion pour des fils de cuivre rectangulaires.....		55
Figure A.6 – Dépendance de la valeur normalisée du RRR vis-à-vis de la flexion pour des fils de cuivre rectangulaires.....		56
Figure C.1 – Distribution du r_{RRR} observé du composite supraconducteur de Cu/Nb-Ti.....		67
Tableau A.1 – Diamètre minimal du mandrin de mesure pour les fils circulaires.....		56
Tableau A.2 – Diamètre minimal du mandrin de mesure pour les fils rectangulaires.....		56
Tableau B.1 – Signaux de sortie de deux extensomètres nominalement identiques.....		59
Tableau B.2 – Valeurs moyennes de deux signaux de sortie.....		59
Tableau B.3 – Écarts types expérimentaux de deux signaux de sortie.....		60
Tableau B.4 – Incertitudes types de deux signaux de sortie		60
Tableau B.5 – Valeurs du COV de deux signaux de sortie		60
Tableau C.1 – Incertitude de chaque mesurage		66
Tableau C.2 – Valeurs obtenues du RRR pour six éprouvettes Nb ₃ Sn.....		68
Tableau C.3 – Moyenne, écart type et coefficient de variation des six éprouvettes.....		68

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 4: Mesurage du rapport de résistance résiduelle – Rapport de résistance résiduelle des composites supraconducteurs de Nb-Ti et de Nb₃Sn

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 61788-4 a été établie par le comité d'études 90 de l'IEC: Supraconductivité.

Cette cinquième édition annule et remplace la quatrième édition parue en 2016. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) modification de la distance adéquate des prises de tension sur les éprouvettes pour un mesurage fiable,

- b) nouveau rapport du résultat de l'essai interlaboratoire du rapport de résistance résiduelle des supraconducteurs Nb₃Sn qui atteste de la validité de la méthode de mesure utilisée dans la présente norme,
- c) révision des définitions prêtant à confusion concernant le rapport entre le cuivre et la fraction de cuivre.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
90/448/FDIS	90/451/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.

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

Le cuivre, Cu/Cu-Ni ou l'aluminium est utilisé comme matériau de matrice dans les composites supraconducteurs de Ni-Ti et de Nb₃Sn et fonctionne comme un shunt électrique lorsque la supraconductivité est interrompue. Il contribue également à la reprise de la supraconductivité en dirigeant la chaleur générée dans le supraconducteur vers le fluide de refroidissement environnant. La résistivité à la température cryogénique du cuivre est une grandeur importante qui influe sur la stabilité et les pertes en courant alternatif du supraconducteur. Le rapport de résistance résiduelle est défini comme le rapport de la résistance du supraconducteur à température ambiante à celle juste au-dessus de la transition supraconductrice.

Le présent document spécifie la méthode d'essai relative au rapport de résistance résiduelle des composites supraconducteurs de Nb-Ti et de Nb₃Sn. La méthode des courbes est utilisée pour mesurer la résistance juste au-dessus de la transition supraconductrice. D'autres méthodes sont décrites en A.3.

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 4: Mesurage du rapport de résistance résiduelle – Rapport de résistance résiduelle des composites supraconducteurs de Nb-Ti et de Nb₃Sn

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61788 spécifie une méthode d'essai pour la détermination du rapport de résistance résiduelle (RRR) des composites supraconducteurs de Nb-Ti et de Nb₃Sn avec une matrice de Cu, Cu-Ni, Cu/Cu-Ni et Al dans une condition sans contrainte et dans un champ magnétique externe nul. Cette méthode est destinée à être utilisée avec des éprouvettes de supraconducteurs présentant une structure monolithique avec une section rectangulaire ou circulaire, un RRR de valeur inférieure à 350 et une surface de section inférieure à 3 mm². Dans le cas de Nb₃Sn, les éprouvettes ont subi un traitement thermique de réaction.

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, *Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) – Partie 815: Supraconductivité* (disponible sous: www.electropedia.org)