

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Superconductivity –

**Part 6: Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test
of Cu/Nb-Ti composite superconductors**

Supraconductivité –

**Partie 6: Mesure des propriétés mécaniques – Essai de traction à température
ambiante des supraconducteurs composites de Cu/Nb-Ti**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2011 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: www.iec.ch

About the IEC

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

About IEC publications

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

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Electropedia: www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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 CEI

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

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Superconductivity –

Part 6: Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test of Cu/Nb-Ti composite superconductors

Supraconductivité –

Partie 6: Mesure des propriétés mécaniques – Essai de traction à température ambiante des supraconducteurs composites de Cu/Nb-Ti

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX



ICS 29.050; 77.040.10

ISBN 978-2-88912-580-7

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 Conformity.....	8
5.2 Testing machine	8
5.3 Extensometer	9
6 Specimen preparation.....	9
6.1 Straightening the specimen	9
6.2 Length of specimen	9
6.3 Removing insulation	9
6.4 Determination of cross-sectional area (S_0)	9
7 Testing conditions	9
7.1 Specimen gripping.....	9
7.2 Pre-loading and setting of extensometer	9
7.3 Testing speed.....	9
7.4 Test.....	10
8 Calculation of results	12
8.1 Tensile strength (R_m)	12
8.2 0,2 % proof strength ($R_{p0,2A}$ and $R_{p0,2B}$)	12
8.3 Modulus of elasticity (E_o and E_a)	12
9 Uncertainty.....	12
10 Test report.....	13
10.1 Specimen	13
10.2 Results.....	13
10.3 Test conditions.....	13
Annex A (informative) Additional information relating to Clauses 1 to 10	14
Annex B (informative) Uncertainty considerations	19
Annex C (informative) Specific examples related to mechanical tests	23
Bibliography.....	32
Figure 1 – Stress-strain curve and definition of modulus of elasticity and 0,2 % proof strengths	11
Figure A.1 – An example of the light extensometer, where R1 and R3 indicate the corner radius	15
Figure A.2 – An example of the extensometer provided with balance weight and vertical specimen axis.....	16
Figure C.1 – Measured stress versus strain curve of the rectangular cross section NbTi wire and the initial part of the curve	23
Figure C.2 – 0,2 % offset shifted regression line, the raw stress versus strain curve and the original raw data of stress versus strain	29

Table B.1 – Output signals from two nominally identical extensometers	20
Table B.2 – Mean values of two output signals	20
Table B.3 – Experimental standard deviations of two output signals.....	20
Table B.4 – Standard uncertainties of two output signals	21
Table B.5 – Coefficient of variations of two output signals.....	21
Table C.1 – Load cell specifications according to manufacturer's data sheet	26
Table C.2 – Uncertainties of displacement measurement	26
Table C.3 – Uncertainties of wire width measurement	27
Table C.4 – Uncertainties of wire thickness measurement	27
Table C.5 – Uncertainties of gauge length measurement	27
Table C.6 – Calculation of stress at 0 % and at 0,1 % strain using the zero offset regression line as determined in Figure C.1b).	28
Table C.7 – Linear regression equations computed for the three shifted lines and for the stress versus strain curve in the region where the lines intersect	29
Table C.8 – Calculation of strain and stress at the intersections of the three shifted lines with the stress strain curve	30
Table C.9 – Measured stress versus strain data and the computed stress based on a linear fit to the data in the region of interest.....	31

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-6:2011

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SUPERCONDUCTIVITY –

**Part 6: Mechanical properties measurement –
Room temperature tensile test of Cu/Nb-Ti
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 61788-6 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity.

This third edition cancels and replaces the second edition published in 2008. It constitutes a technical revision.

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

- specific example of uncertainty estimation related to mechanical tests was supplemented as Annex C.

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

FDIS	Report on voting
90/267/FDIS	90/278/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 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.

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

The Cu/Nb-Ti superconductive composite wires currently in use are multifilamentary composite material with a matrix that functions as a stabilizer and supporter, in which ultrafine superconductor filaments are embedded. A Nb-40~55 mass % Ti alloy is used as the superconductive material, while oxygen-free copper and aluminium of high purity are employed as the matrix material. Commercial composite superconductors have a high current density and a small cross-sectional area. The major application of the composite superconductors is to build superconducting magnets. While the magnet is being manufactured, complicated stresses are applied to its windings and, while it is being energized, a large electromagnetic force is applied to the superconducting wires because of its high current density. It is therefore indispensable to determine the mechanical properties of the superconductive wires, of which the windings are made.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-6:2011

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 6: Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test of Cu/Nb-Ti composite superconductors

1 Scope

This part of IEC 61788 covers a test method detailing the tensile test procedures to be carried out on Cu/Nb-Ti superconductive composite wires at room temperature.

This test is used to measure modulus of elasticity, 0,2 % proof strength of the composite due to yielding of the copper component, and tensile strength.

The value for percentage elongation after fracture and the second type of 0,2 % proof strength due to yielding of the Nb-Ti component serves only as a reference (see Clauses A.1 and A.2).

The sample covered by this test procedure has a round or rectangular cross-section with an area of 0,15 mm² to 2 mm² and a copper to superconductor volume ratio of 1,0 to 8,0 and without the insulating coating.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application 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 – Part 815: Superconductivity*

ISO 376, *Metallic materials – Calibration of force-proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines*

ISO 6892-1, *Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature*

ISO 7500-1, *Metallic materials – Verification of static uniaxial testing machines – Part 1: Tension/compression testing machines – Verification and calibration of the force-measuring system*

ISO 9513, *Metallic materials – Calibration of extensometers used in uniaxial testing*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the definitions given in IEC 60050-815 and ISO 6892-1, as well as the following, apply.

3.1

tensile stress

tensile force divided by the original cross-sectional area at any moment during the test

3.2 tensile strength

R_m

tensile stress corresponding to the maximum testing force

NOTE The symbol σ_{UTS} is commonly used instead of R_m .

3.3 extensometer gauge length

length of the parallel portion of the test piece used for the measurement of elongation by means of an extensometer

3.4 distance between grips

L_g

length between grips that hold a test specimen in position before the test is started

3.5 0,2 % proof strength

$R_{p0,2}$ (see Figure 1)

stress value where the copper component yields by 0,2 %

NOTE 1 The designated stress, $R_{p0,2A}$ or $R_{p0,2B}$ corresponds to point A or B in Figure 1, respectively. This strength is regarded as a representative 0,2 % proof strength of the composite. The second type of 0,2 % proof strength is defined as a 0,2 % proof strength of the composite where the Nb-Ti component yields by 0,2 %, the value of which corresponds to the point C in Figure 1 as described complementarily in Annex A (see Clause A.2).

NOTE 2 The symbol $\sigma_{0,2}$ is commonly used instead of $R_{p0,2}$.

3.6 modulus of elasticity

E

gradient of the straight portion of the stress-strain curve in the elastic deformation region

4 Principle

The test consists of straining a test piece by tensile force, generally to fracture, for the purpose of determining the mechanical properties defined in Clause 3.

5 Apparatus

5.1 Conformity

The test machine and the extensometer shall conform to ISO 7500-1 and ISO 9513, respectively. The calibration shall obey ISO 376. The special requirements of this standard are presented here.

5.2 Testing machine

A tensile machine control system that provides a constant cross-head speed shall be used. Grips shall have a structure and strength appropriate for the test specimen and shall be constructed to provide an effective connection with the tensile machine. The faces of the grips shall be filed or knurled, or otherwise roughened, so that the test specimen will not slip on them during testing. Gripping may be a screw type, or pneumatically or hydraulically actuated.

5.3 Extensometer

The weight of the extensometer shall be 30 g or less, so as not to affect the mechanical properties of the superconductive wire. Care shall also be taken to prevent bending moments from being applied to the test specimen (see Clause A.3).

6 Specimen preparation

6.1 Straightening the specimen

When a test specimen sampled from a bobbin needs to be straightened, a method shall be used that affects the material as little as possible.

6.2 Length of specimen

The total length of the test specimen shall be the inward distance between grips plus both grip lengths. The inward distance between the grips shall be 60 mm or more, as requested for the installation of the extensometer.

6.3 Removing insulation

If the test specimen surface is coated with an insulating material, that coating shall be removed. Either a chemical or mechanical method shall be used, with care taken not to damage the specimen surface (see Clause A.4).

6.4 Determination of cross-sectional area (S_0)

A micrometer or other dimension-measuring apparatus shall be used to obtain the cross-sectional area of the specimen after the insulation coating has been removed. The cross-sectional area of a round wire shall be calculated using the arithmetic mean of the two orthogonal diameters. The cross-sectional area of a rectangular wire shall be obtained from the product of its thickness and width. Corrections to be made for the corners of the cross-sectional area shall be determined through consultation among the parties concerned (see Clause A.5).

7 Testing conditions

7.1 Specimen gripping

The test specimen shall be mounted on the grips of the tensile machine. At this time, the test specimen and tensile loading axis must be on a single straight line. Sand paper may be inserted as a cushioning material to prevent the gripped surfaces of the specimen from slipping and fracturing (see Clause A.6).

7.2 Pre-loading and setting of extensometer

If there is any slack in the specimen when it is mounted, a force not greater than one-tenth of the 0,2 % proof strength of the composite shall be applied to take up the slack before the extensometer is mounted. When mounting the extensometer, care shall be taken to prevent the test specimen from being deformed. The extensometer shall be mounted at the centre between the grips, aligning the measurement direction with the specimen axis direction. After installation, loading shall be zeroed.

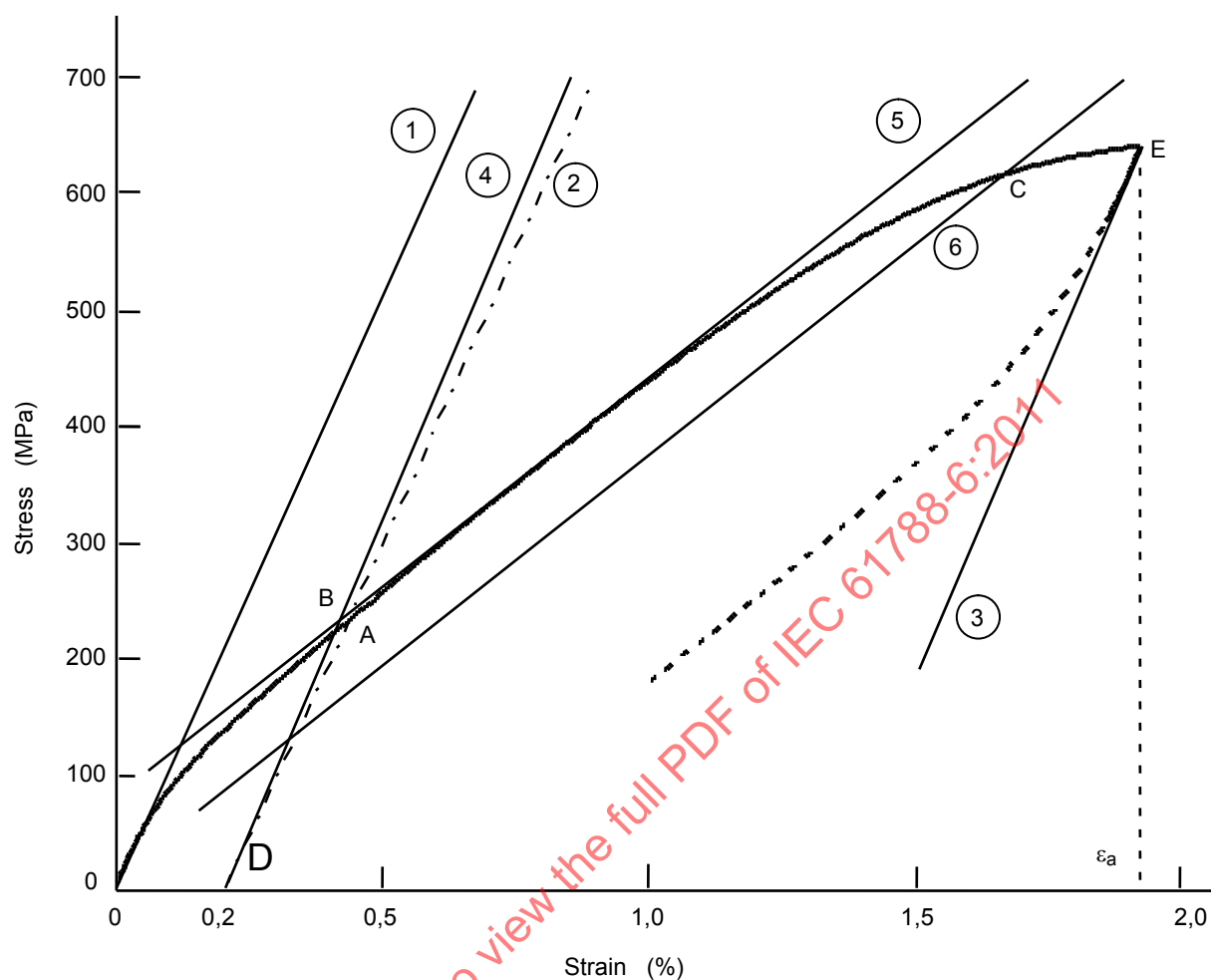
7.3 Testing speed

The strain rate shall be $10^{-4}/s$ to $10^{-3}/s$ during the test using the extensometer. After removing the extensometer, the strain rate may be increased to a maximum of $10^{-3}/s$.

7.4 Test

The tensile machine shall be started after the cross-head speed has been set to the specified level. The signals from the extensometer and load cell shall be plotted on the abscissa and ordinate, respectively, as shown in Figure 1. When the total strain has reached approximately 2 %, reduce the force by approximately 10 % and then remove the extensometer. The step of removing the extensometer can be omitted in the case where the extensometer is robust enough not to be damaged by the total strain and the fracture shock of this test. At this time, care shall be taken to prevent unnecessary force from being applied to the test specimen. Then, increase loading again to the previous level and continue testing until the test specimen fractures. Measurement shall be made again if a slip or fracture occurs on the gripped surfaces of the test specimen.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-6:2011



IEC 1597/11

Key

- ① Initial loading line
- ② Line shifted by an offset of 0,2% parallel to the initial loading line
- ③ Unloading line
- ④ Line shifted by an offset of 0,2% parallel to the unloading line
- ⑤ Second linear part of loading line
- ⑥ Line shifted by an offset of 0,2% parallel to the second linear loading line

NOTE 1 When the total strain has reached ~2 % (point E), the load is reduced by 10 % and the extensometer is removed, if necessary. Then, the load is increased again.

NOTE 2 The slope of the initial loading line is usually smaller than that of the unloading line. Then, two lines can be drawn from the 0,2 % offset point on the abscissa to obtain 0,2 % proof strength of the composite due to yielding of the copper component. Point A is obtained from the initial loading line, and Point B is obtained from the unloading line. Point C is the second type of 0,2 % proof strength of the composite where the Nb-Ti component yields.

Figure 1 – Stress-strain curve and definition of modulus of elasticity and 0,2 % proof strengths

8 Calculation of results

8.1 Tensile strength (R_m)

Tensile strength R_m shall be the maximum force divided by the original cross-sectional area of the wire before loading.

8.2 0,2 % proof strength ($R_{p0,2A}$ and $R_{p0,2B}$)

The 0,2 % proof strength of the composite due to yielding of the copper component is determined in two ways from the loading and unloading stress-strain curves as shown in Figure 1. The 0,2 % proof strength under loading $R_{p0,2A}$ shall be determined as follows: the initial linear portion under loading of the stress-strain curve is moved 0,2 % in the strain axis (0,2 % offset line under loading) and the point A at which this linear line intersects the stress-strain curve shall be defined as the 0,2 % proof strength under loading. The 0,2 % proof strength of the composite under unloading $R_{p0,2B}$ shall be determined as follows: the linear portion under unloading is to be moved parallel to the 0,2 % offset strain point. The intersection of this line with the stress-strain curve determines the point B that shall be defined as the 0,2 % proof strength. This measurement shall be discarded if the 0,2 % proof strength of the composite is less than three times the pre-load specified in 7.2.

Each 0,2 % proof strength shall be calculated using formula (1) given below:

$$R_{p0,2i} = F_i / S_0 \quad (1)$$

where

$R_{p0,2i}$ is the 0,2 % proof strength (MPa) at each point;

F_i is the force (N) at each point;

S_0 is the original cross-sectional area (in square millimetres) of the test specimen;

Further, $i = A$ and B .

8.3 Modulus of elasticity (E_o and E_a)

Modulus of elasticity shall be calculated using the following formula and the straight portion, either of the initial loading curve or of the unloading one.

$$E = \Delta F (1 + \varepsilon_a) / (S_0 \Delta \varepsilon) \quad (2)$$

where

E is the modulus of elasticity (MPa);

ΔF is the increments (N) of the corresponding force;

$\Delta \varepsilon$ is the increment of strain corresponding to ΔF ;

ε_a is the strain just after unloading as shown in Figure 1.

E is designated as E_o when using the initial loading curve ($\varepsilon_a = 0$), and as E_a when using the unloading curve ($\varepsilon_a \neq 0$).

9 Uncertainty

Unless otherwise specified, measurements shall be carried in a temperature range between 280 K and 310 K. A force measuring cell with a combined standard uncertainty not greater than 0,5 % shall be used. An extensometer with a combined standard uncertainty not greater than 0,5 % shall be used. The dimension-measuring apparatus shall have a combined standard uncertainty not greater than 0,1 %. The target combined standard uncertainties are defined by root square sum (RSS) procedure, which is given in Annex B.

There are no reliable experimental data with respect to uncertainties on moduli of elasticity and 0,2 % proof strengths as mentioned in Clause A.7. As described in Annex C, on the other hand, their uncertainties could be evaluated from the experimental conditions, of which parts are indicated above like uncertainty of force measuring cell. Consequently the relative expanded uncertainties ($k=2$) for the modulus of elasticity, E_o , and the 0,2 % proof strength, $R_{p0,2A}$, are expected to be 2,0 % ($N=1$) and 0,78 % ($N=1$), respectively, where N indicates the time of repeated tests.

NOTE Uncertainties reported in the present text, if used for the purpose of practical assessment, have to be taken under the specific considerations with detailed caution as indicated in Annex B.

10 Test report

10.1 Specimen

- a) Name of the manufacturer of the specimen
- b) Classification and/or symbol
- c) Lot number

The following information shall be reported as necessary.

- d) Raw materials and their chemical composition
- e) Cross-sectional shape and dimension of the wire
- f) Filament diameter
- g) Number of filaments
- h) Twist pitch of filaments
- i) Copper to superconductor ratio

10.2 Results

- a) Tensile strength (R_m)
- b) 0,2 % proof strengths ($R_{p0,2A}$ and $R_{p0,2B}$)
- c) Modulus of elasticity (E_o and E_a with ε_a)

The following information shall be reported as necessary.

- d) Second type of 0,2 % proof strength ($R_{p0,2C}$)
- e) Percentage elongation after fracture (A)

10.3 Test conditions

- a) Cross-head speed
- b) Distance between grips
- c) Temperature

The following information shall be reported as necessary.

- d) Manufacturer and model of testing machine
- e) Manufacturer and model of extensometer
- f) Gripping method

Annex A (informative)

Additional information relating to Clauses 1 to 10

A.1 General

This annex gives reference information on the variable factors that can seriously affect the tensile test methods, together with some precautions to be observed when using the standard.

A.2 Percentage elongation after fracture (A)

In Cu/NbTi superconductive wires there is a difference in strength between the copper and NbTi, and the wire is often deformed in waves by the shock of fracture. In such a case, it is difficult to find the elongation accurately after fracture using the butt method. Hence, the measurement of elongation after fracture should serve only as a reference. The movement of the cross-head may be used to find the approximate value for elongation after fracture, instead of using the butt method, as shown below. To use this method, the cross-head position at fracture must be recorded. Use the following formula to obtain the elongation after fracture, given in percentage.

$$A = 100 (L_u - L_c) / L_c \quad (\text{A.1})$$

where

A is the percentage elongation after fracture;
 L_c is the initial distance between cross-heads;
 L_u is the distance between cross-heads after fracture.

A.3 Second type of 0,2 % proof strength ($R_{p0,2C}$)

The second type of 0,2 % proof strength, at which the Nb-Ti component yields, is defined reasonably on the basis of the rule-of-mixture for the bimetallic composite including continuous filaments. As indicated in Figure 1, it should be the stress $R_{p0,2C}$ corresponding to point C, at which the straight portion of the loading curve after the point A is moved by 0,2 % along the strain axis intersects the stress-strain curve. The relevant straight portion is usually observed for the commercial Cu/Nb-Ti superconductive wires, because the copper component deforms plastically in a linear behaviour. Often the stress-strain curve does not show any straight line, but is rounded off for some wires, when they have high copper/non-copper ratio and are highly cold worked. It has been empirically made clear that the rounded-off appearance is observed when the following k -factor is less than 0,4:

$$k = (R_m - R_{p0,2A}) / R_{p0,2A} \quad (\text{A.2})$$

The $R_{p0,2C}$ is one of the important parameters describing the mechanical property of the composite material in the scientific viewpoint, but its use is not always demanded in the engineering sense.

A.4 Extensometer

When using a special type of extensometer, which is attached with an unremovable spacer for determining the gauge length, it may introduce a problem during the unloading of the wire to zero force. To avoid a compressive force on the spacer, the actual gauge length must be

adjusted during installation with sufficient clearance. If the clearance after unloading is not negligible, it must be included in calculating the strain values.

If the test specimen is thin and the extensometer is relatively heavy, any bending moment caused by the weight of the extensometer can stress the specimen, eventually resulting in the specimen yielding. To avoid this, a light extensometer with a balance weight is to be carefully attached. Alternatively, a sufficiently light extensometer without a balance weight is also acceptable to use. Figure A.1 shows an extensometer made with a Ti alloy, with a total mass of about 3 g. It is so light that even a single use without a balance weight could provide enough uncertainty according to the procedure of the present standard. Figure A.2 shows one of the lightest extensometers commercially available, with a total mass of 31 g together with a balance weight. Using it, a round robin test (RRT) was conducted in Japan and good results were obtained. The results were used to establish the present international standard.

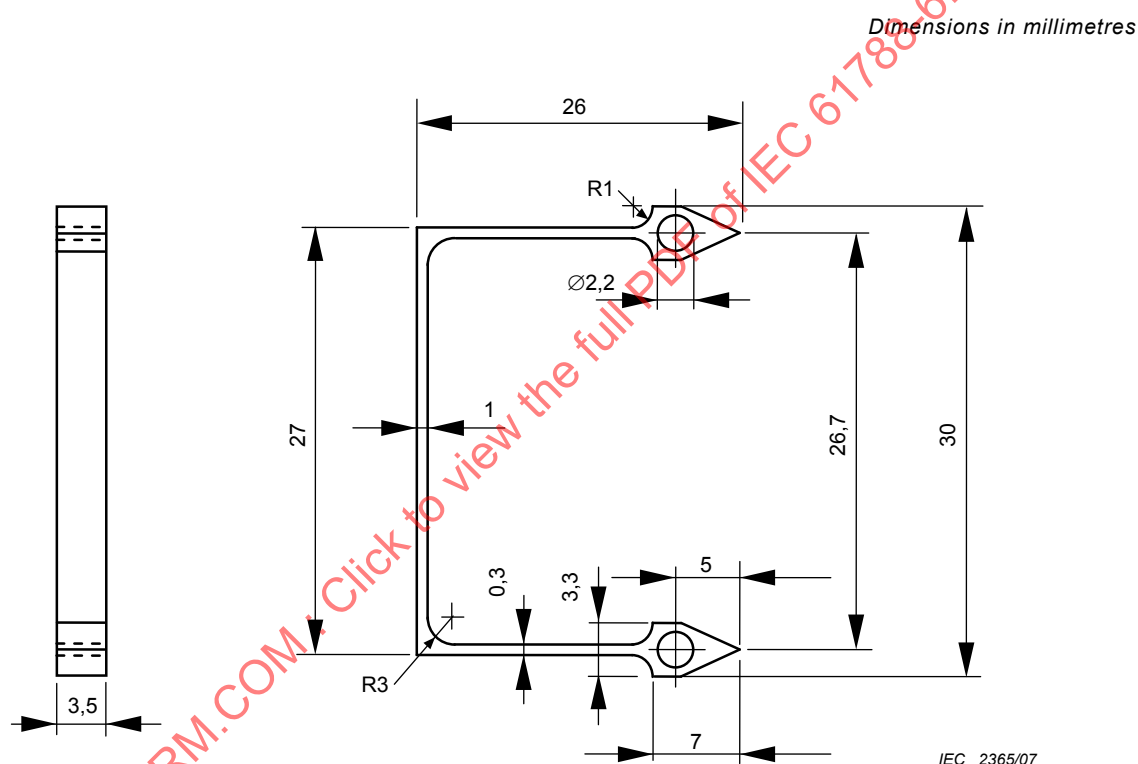
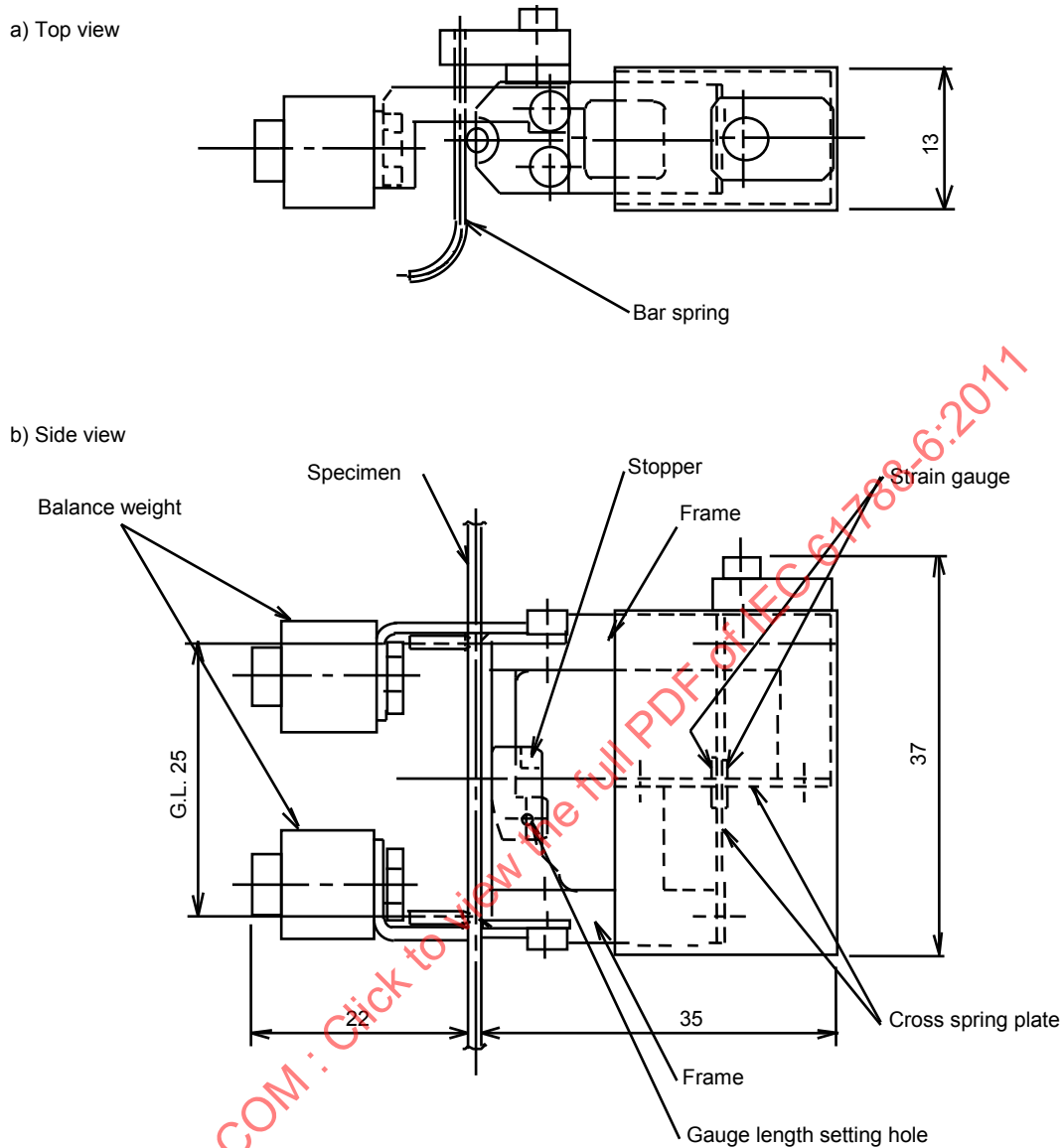


Figure A.1 – An example of the light extensometer, where R1 and R3 indicate the corner radius

Dimensions in millimetres



IEC 1598/11

Figure A.2 – An example of the extensometer provided with balance weight and vertical specimen axis

NOTE Further information about extensometers is obtainable from the Japanese National Committee of IEC/TC90, ISTE, 10-13, Shinonome 1-chome Koto-ku, Tokyo 135-0062, Japan, Tel 81-3-3536-7214, Fax 81-3-3536-7318, e-mail Koki TSUNODA <tc90tsunoda@istec.or.jp>

Since the superconductive composite wire is covered with a soft copper, a scratch in the surface of the specimen made as it is mounted can be a starting point of fracture. Care should therefore be taken when handling the specimen.

A.5 Insulating coating

The coating on the surface of the test specimen should be removed using an appropriate organic solvent that would not damage the specimen. If the coating material is not dissolved by the organic solvent, a mechanical method should be used with care to prevent the copper from being damaged. If the coating is not removed, it affects the strength to only a small extent. For example, tensile strength decreases by less than 3 % for a low-strength wire which has a high copper ratio of 7. The coating is not designed as a structural component. An

analysis of measurement as a three-component composite, i.e. copper, Nb-Ti and insulating coating, is too complicated to conduct. Therefore this test method covers a bare wire in order to maintain the level of uncertainty.

A.6 Cross-sectional area

Where even lower uncertainty is required, the cross-sectional area may be obtained by correcting the radius of the corner of the rectangular wire finished by dies, using the value given on the manufacturing specifications. For rolling or Turk's-head finish, the radius of the corner is not controlled and a correction is made using a microphotograph of the cross-section.

A.7 Gripping force

A weak gripping force results in slippage and a strong gripping force can break the gripped surface. Care should therefore be used when adjusting the gripping force.

A.8 Uncertainty

The Japanese National Committee of IEC TC90 fulfilled the domestic RRT in 1996 by contributions of eight research groups [1] in order to evaluate only the coefficient of variation of experimental data on moduli of elasticity and 0,2 % proof strengths [2], but not their uncertainties. It is, however, not possible to deduce their uncertainties at the present time, because their original data have been insufficient to evaluate uncertainties. Only the way to know the uncertainty is to evaluate it by using the numerical computation based on type B statistics as the procedure is given in Annex C and its results are described in Clause 9 of the main text.

Empirical facts with respect to the scattering source of measured values are described in the following. The modulus of elasticity E_0 determined under the loading curve was found to be always smaller than the modulus E_a under unloading. The reason is attributed to the following handling issues: the bending of the wire specimen, the misalignment of sample gripping with respect to the load axis and a weak grip, and so on. Also, it is pointed out that the copper component is in a plastic state at room temperature before the test, depending on a degree of thermal contraction during cooling from the heat treating temperature. As a whole, the initial loading curve with non-linearity causes the result of $E_0 < E_a$.

The German National Committee of IEC TC90 reported that the modulus of elasticity can be determined with small uncertainty when adopting an initial linear loading at zero-offset. This low uncertainty was achieved by using two light extensometers (Figure A.1) which enabled the cancelling of the possible initial bending effects and ensured a high degree of linearity for the zero-offset loading line.

Care must be taken while handling specimens in order not to induce strain to the copper component. Otherwise, the 0,2 % proof strength of the composite due to yielding of the copper component would increase due to work hardening. Allowable pre-loading limit should be taken into consideration in this fact.

The second type of 0,2 % proof strength $R_{p0,2C}$ is the quantity determined with the lowest uncertainty, that should serve only as reference. Care must, however, be taken to ensure an existence of a straight portion in the stress-strain curve after the point A in Figure 1

A.9 Reference documents of Annex A

- [1] SHIMADA, M., HOJO, M., MORIAI, H. and OSAMURA, K. *Jpn. Cryogenic Eng*, 1998, 33, p. 665.
- [2] OSAMURA, K., NYILAS, A., SHIMADA, M., MORIAI, H., HOJO, M., FUSE T. and SUGANO, M. *Adv. Superconductivity*, 1999, XI, p.1515.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-6:2011

Annex B (informative)

Uncertainty considerations

B.1 Overview

In 1995, a number of international standards organizations, including IEC, decided to unify the use of statistical terms in their standards. It was decided to use the word “uncertainty” for all quantitative (associated with a number) statistical expressions and eliminate the quantitative use of “precision” and “accuracy.” The words “accuracy” and “precision” could still be used qualitatively. The terminology and methods of uncertainty evaluation are standardized in the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [1]¹.

It was left to each TC to decide if they were going to change existing and future standards to be consistent with the new unified approach. Such change is not easy and creates additional confusion, especially for those who are not familiar with statistics and the term uncertainty. At the June 2006 TC 90 meeting in Kyoto, it was decided to implement these changes in future standards.

Converting “accuracy” and “precision” numbers to the equivalent “uncertainty” numbers requires knowledge about the origins of the numbers. The coverage factor of the original number may have been 1, 2, 3, or some other number. A manufacturer’s specification that can sometimes be described by a rectangular distribution will lead to a conversion number of $1/\sqrt{3}$. The appropriate coverage factor was used when converting the original number to the equivalent standard uncertainty. The conversion process is not something that the user of the standard needs to address for compliance to TC 90 standards, it is only explained here to inform the user about how the numbers were changed in this process. The process of converting to uncertainty terminology does not alter the user’s need to evaluate their measurement uncertainty to determine if the criteria of the standard are met.

The procedures outlined in TC 90 measurement standards were designed to limit the uncertainty of any quantity that could influence the measurement, based on the Convener’s engineering judgment and propagation of error analysis. Where possible, the standards have simple limits for the influence of some quantities so that the user is not required to evaluate the uncertainty of such quantities. The overall uncertainty of a standard was then confirmed by an interlaboratory comparison.

B.2 Definitions

Statistical definitions can be found in three sources: the GUM, the International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM)[2], and the NIST Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results (NIST)[3]. Not all statistical terms used in this standard are explicitly defined in the GUM. For example, the terms “relative standard uncertainty” and “relative combined standard uncertainty” are used in the GUM (5.1.6, Annex J), but they are not formally defined in the GUM (see [3]).

B.3 Consideration of the uncertainty concept

Statistical evaluations in the past frequently used the coefficient of variation (COV) which is the ratio of the standard deviation and the mean (N.B. the COV is often called the relative standard deviation). Such evaluations have been used to assess the precision of the

¹ Figures in square brackets refer to the reference documents in Clause B.5 of this Annex.

measurements and give the closeness of repeated tests. The standard uncertainty (SU) depends more on the number of repeated tests and less on the mean than the COV and therefore in some cases gives a more realistic picture of the data scatter and test judgment. The example below (see Tables B.1 to B.6) shows a set of electronic drift and creep voltage measurements from two nominally identical extensometers using same signal conditioner and data acquisition system. The $n = 10$ data pairs are taken randomly from the spreadsheet of 32 000 cells. Here, extensometer number one (E_1) is at zero offset position whilst extensometer number two (E_2) is deflected to 1 mm. The output signals are in volts.

Table B.1 – Output signals from two nominally identical extensometers

Output signal [V]	
E_1	E_2
0,001 220 70	2,334 594 73
0,000 610 35	2,334 289 55
0,001 525 88	2,334 289 55
0,001 220 70	2,334 594 73
0,001 525 88	2,334 594 73
0,001 220 70	2,333 984 38
0,001 525 88	2,334 289 55
0,000 915 53	2,334 289 55
0,000 915 53	2,334 594 73
0,001 220 70	2,334 594 73

Table B.2 – Mean values of two output signals

Mean ($\bar{X}$) [V]	
E_1	E_2
0,001 190 19	2,334 411 62

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad [\text{V}] \quad (\text{B.1})$$

Table B.3 – Experimental standard deviations of two output signals

Experimental standard deviation (s) [V]	
E_1	E_2
0,000 303 48	0,000 213 381

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad [\text{V}] \quad (\text{B.2})$$

Table B.4 – Standard uncertainties of two output signals

Standard uncertainty (u) [V]	
E_1	E_2
0,000 095 97	0,000 067 48

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad [\text{V}] \quad (\text{B.3})$$

Table B.5 – Coefficient of Variations of two output signals

Coefficient of variation (COV) [%]	
E_1	E_2
25,498 2	0,009 1

$$\text{COV} = \frac{s}{\bar{X}} \quad (\text{B.4})$$

The standard uncertainty is very similar for the two extensometer deflections. In contrast the coefficient of variation COV is nearly a factor of 2 800 different between the two data sets. This shows the advantage of using the standard uncertainty which is independent of the mean value.

B.4 Uncertainty evaluation example for TC 90 standards

The observed value of a measurement does not usually coincide with the true value of the measurand. The observed value may be considered as an estimate of the true value. The uncertainty is part of the "measurement error" which is an intrinsic part of any measurement. The magnitude of the uncertainty is both a measure of the metrological quality of the measurements and improves the knowledge about the measurement procedure. The result of any physical measurement consists of two parts: an estimate of the true value of the measurand and the uncertainty of this "best" estimate. The GUM, within this context, is a guide for a transparent, standardized documentation of the measurement procedure. One can attempt to measure the true value by measuring "the best estimate" and using uncertainty evaluations which can be considered as two types: Type A uncertainties (repeated measurements in the laboratory in general expressed in the form of Gaussian distributions) and Type B uncertainties (previous experiments, literature data, manufacturer's information, etc. often provided in the form of rectangular distributions).

The calculation of uncertainty using the GUM procedure is illustrated in the following example:

- a) The user must derive in a first step a mathematical measurement model in form of identified measurand as a function of all input quantities. A simple example of such a model is given for the uncertainty of a force measurement using a load cell:

Force as measurand = W (weight of standard as expected) + d_W (manufacturer's data) + d_R (repeated checks of standard weight/day) + d_{Re} (reproducibility of checks at different days).

Here the input quantities are: the measured weight of standard weights using different balances (Type A), manufacturer's data (Type B), repeated test results using the digital electronic system (Type B), and reproducibility of the final values measured on different days (Type B).

- b) The user should identify the type of distribution for each input quantity (e.g. Gaussian distributions for Type A measurements and rectangular distributions for Type B measurements).

- c) Evaluate the standard uncertainty of the Type A measurements,

$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}}$ where, s is the experimental standard deviation and n is the total number of measured data points.

- d) Evaluate the standard uncertainties of the Type B measurements:

$u_B = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot d_w^2 + \dots}$ where, d_w is the range of rectangular distributed values

- e) Calculate the combined standard uncertainty for the measurand by combining all the standard uncertainties using the expression:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

In this case, it has been assumed that there is no correlation between input quantities. If the model equation has terms with products or quotients, the combined standard uncertainty is evaluated using partial derivatives and the relationship becomes more complex due to the sensitivity coefficients [4, 5].

- f) Optional – the combined standard uncertainty of the estimate of the referred measurand can be multiplied by a coverage factor (e. g. 1 for 68 % or 2 for 95 % or 3 for 99 %) to increase the probability that the measurand can be expected to lie within the interval.
- g) Report the result as the estimate of the measurand $\pm$ the expanded uncertainty, together with the unit of measurement, and, at a minimum, state the coverage factor used to compute the expanded uncertainty and the estimated coverage probability.

To facilitate the computation and standardize the procedure, use of appropriate certified commercial software is a straightforward method that reduces the amount of routine work [6, 7]. In particular, the indicated partial derivatives can be easily obtained when such a software tool is used. Further references for the guidelines of measurement uncertainties are given in [3, 8, and 9].

B.5 Reference documents of Annex B

- [1] ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM 1995)
- [2] ISO/IEC Guide 99:2007, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms* (VIM)
- [3] TAYLOR, B.N. and KUYATT, C.E. *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*. NIST Technical Note 1297, 1994
- [4] KRAGTEN, J. Calculating standard deviations and confidence intervals with a universally applicable spreadsheet technique. *Analyst*, 1994, 119, 2161-2166
- [5] EURACHEM / CITAC Guide CG 4 Second edition:2000, *Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement*
- [6] Available at http://www.gum.dk/e-wb-home/gw_home.html (cited 2011-04-04)
- [7] Available at <http://www.isgmax.com/> (cited 2011-04-04)
- [8] CHURCHILL, E., HARRY, H.K., and COLLE, R. *Expression of the Uncertainties of Final Measurement Results*. NBS Special Publication 644 (1983)
- [9] JAB NOTE Edition 1:2003, *Estimation of Measurement Uncertainty (Electrical Testing / High Power Testing)*.

Annex C (informative)

Specific examples related to mechanical tests

These are specific examples to illustrate techniques of uncertainty estimation. The inclusion of these examples does not imply that users must complete a similar analysis to comply with the standard. However, the portions that estimate the uncertainty of each individual influence quantity (load, displacement, wire diameter and gauge length) need to be evaluated by the user to determine if they meet the specified uncertainty limits in the standard.

These two examples are not meant to be exhaustive. They do not include all possible sources of error, such as friction, bent/straightened wire, and removal of insulation, misaligned grips, and strain rate. These additional sources may or may not be negligible.

C.1 Uncertainty of the modulus of elasticity

In Figure C1, the original stress versus strain raw data of a NbTi rectangular wire (1,45 mm × 0,97 mm) is given. These measurements were carried out during the course of an international round robin test in 1999. Figure C.1 (a) shows the loading of the wire up to unloading at around 2 % strain, while Figure C.1 (b) displays points taken during the initial loading up to 50 MPa and the line fit to these data. The computed slope of the trend line is 101 531 MPa (the slope is expand with a factor of 100 due to unit percentage of abscissa) as given in Figure C.1 (b) with a squared correlation coefficient of 0,999 01.

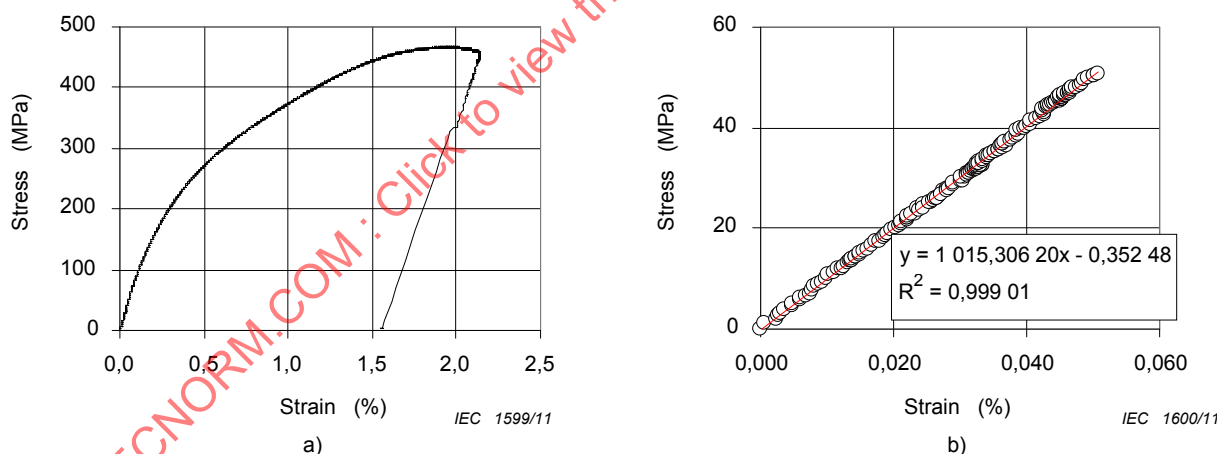


Figure C.1 a) shows the measured stress versus strain curve of the rectangular cross section NbTi superconducting wire. Figure C.1 b) shows the initial part of the curve and the regression analysis to determine modulus of elasticity. The slope of the line should be multiplied by 100 to convert the percentage strain to strain, so that the units of modulus of elasticity will be MPa.

Figure C.1 – Measured stress versus strain curve of the rectangular cross section NbTi wire and the initial part of the curve

The standard uncertainty estimation of modulus of elasticity for this wire can be processed in following way. The determined modulus of elasticity during mechanical loading is a function of six variables

$$E = f(P, \Delta L, W, T, L_G, b), \quad (\text{C.1})$$

each having its own specific uncertainty contribution. The model equation is

$$E = \frac{P \cdot L_G}{W \cdot T \cdot \Delta L} + b \quad (C.2)$$

where

- E = modulus of elasticity, MPa;
- P = load, N;
- ΔL = deflected extensometer length in zero offset region for the selected load portion, mm
- W = width of superconducting wire, mm;
- T = thickness of superconducting wire, mm;
- L_G = length of extensometer at start of the loading, mm;
- b = estimated deviation from the experimentally obtained modulus of elasticity, MPa.

The actual experimental values are necessary for the standard uncertainty calculation. Using the data of Figure C.1 b) the value of deflected extensometer length can be estimated. Here, a stress of 50 MPa is selected and by using the calculated modulus of elasticity given in Figure C.1 b) the value of ΔL can be established using the equations,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad \text{and} \quad \Delta L = \varepsilon \cdot L_G, \quad (C.3)$$

where

- $\varepsilon = 4,924 \ 6 \times 10^{-4}$;
- $\Delta L = 7,389 \ 16 \times 10^{-3}$ mm;
- $\sigma = 50$ MPa;
- $L_G = 15$ mm;
- $W = 1,45$ mm;
- $T = 0,97$ mm.

In Equation (C.3) ε is the strain and σ is the stress.

Furthermore, with

$$P = \sigma \cdot W \cdot T \quad (C.4)$$

the force P can be calculated as $P = 70,325$ N

In the case of a round wire, wire diameter D is used instead of W and T . Thus, $W \cdot T$ should be replaced by $\pi D^2/4$ in Equation(C.2) and Equation (C.4).

C.2 Evaluation of Sensitivity Coefficients

The combined standard uncertainty associated with model Equation (C.2) is:

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial P}\right)^2 u_1^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial \Delta L}\right)^2 u_2^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial W}\right)^2 u_3^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)^2 u_4^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial L_G}\right)^2 u_5^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial b}\right)^2 u_6^2} \quad (C.5)$$

where u_i ($i=1, 2, \dots, 6$) are described later in C. 3. The partial differential terms are the so-called sensitivity coefficients. By substituting the experimental values in each derivative, the sensitivity coefficients c_i can be calculated as follows:

$$\text{For } c_1: \quad c_1 = \frac{\partial}{\partial P} \left(\frac{L_G \cdot P}{W \cdot T \cdot \Delta L} \right) = \frac{L_G}{W \cdot T \cdot \Delta L} = 1,444 \times 10^3 \text{ mm}^{-2} \quad (\text{C.6})$$

$$\text{For } c_2: \quad c_2 = \frac{\partial}{\partial \Delta L} \left(\frac{L_G \cdot P}{W \cdot T \cdot \Delta L} \right) = -\frac{L_G \cdot P}{W \cdot T \cdot \Delta L^2} = -1,374 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3} \quad (\text{C.7})$$

$$\text{For } c_3: \quad c_3 = \frac{\partial}{\partial W} \left(\frac{L_G \cdot P}{W \cdot T \cdot \Delta L} \right) = -\frac{L_G \cdot P}{W^2 \cdot T \cdot \Delta L} = -7,002 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3} \quad (\text{C.8})$$

$$\text{For } c_4: \quad c_4 = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{L_G \cdot P}{W \cdot T \cdot \Delta L} \right) = -\frac{L_G \cdot P}{W \cdot T^2 \cdot \Delta L} = -1,047 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3} \quad (\text{C.9})$$

$$\text{For } c_5: \quad c_5 = \frac{\partial}{\partial L_G} \left(\frac{L_G \cdot P}{W \cdot T \cdot \Delta L} \right) = \frac{P}{W \cdot T \cdot \Delta L} = 6,769 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3} \quad (\text{C.10})$$

Sensitivity coefficient c_6 is unity (1) owing to the differentiation of Equation C.2 with respect to quantity b .

Using the above sensitivity coefficients, the combined standard uncertainty u_c is finally given by:

$$u_c = \sqrt{(c_1)^2 \cdot (u_1)^2 + (c_2)^2 \cdot (u_2)^2 + (c_3)^2 \cdot (u_3)^2 + (c_4)^2 \cdot (u_4)^2 + (c_5)^2 \cdot (u_5)^2 + (c_6)^2 \cdot (u_6)^2} \quad (\text{C.11})$$

where the square of each sensitivity coefficient is multiplied by the square of the standard uncertainty of individual variables as given in the model Equation (C.2).

C.3 Combined standard uncertainties of each variable

The standard uncertainties u_i in Equation (C.11) are the combined standard uncertainties of force (P), deflected length (ΔL), width of wire (W), thickness of wire (T), and gauge length (L_G). In this clause, each combined standard uncertainty will be estimated according to the available data.

The combined standard uncertainty u_1 for force P is composed of statistical distributions of Type A and Type B. In general, the force is measured with commercially available load cells. The bulk of load cell manufacturers, however, do not give information about uncertainties in their specifications. The given accuracies, along with other information obtained from the data sheets, must be first converted into standard uncertainties prior to the determination of combined standard uncertainty u_1 . Typically these manufacturer's specifications are viewed as limits to a rectangular distribution of errors. The standard uncertainty associated with the rectangular distribution is the limit divided by $\sqrt{3}$.

For the measurements given in Figure C.1, the following information for the load cell was available.

Table C.1 – Load cell specifications according to manufacturer's data sheet

Load cell capacity, <i>N</i>	Accuracy class tension / compression %	Temperature coefficient of zero <i>S %/K</i>	Temperature coefficient of sensitivity <i>S %/K</i>	Creep for 30 min <i>S %</i>
5 000	0,25	0,25	0,07	0,07

According to this specification, the data should be converted to standard uncertainty values before combining them. These data are treated as Type B uncertainties. The temperature range between 30 °C and 10 °C ($\Delta T = 20$ °C) has been selected to reflect allowable laboratory conditions.

The variables are as follows:

- Accuracy class: $T_{class} = 0,25 \%$
- Temperature coefficient of zero balance: $T_{CoefZero} = (0,25 \times 20) \%$
- Temperature coefficient of sensitivity: $T_{CoefSens} = (0,07 \times 20) \%$
- Creep for 30 min: $T_{creep} = 0,07 \%$

The following equation describes the measurement of load and includes the four sources of error from Figure C.1:

$$P = u_P + T_{class} + T_{coefzero} + T_{coefsens} + T_{creep} \quad (C.12)$$

where u_P is the true value of load.

The percentage specifications are converted to load units based on the measured value of $P = 70,325$ N obtained from the stress versus strain curve. The resulting values are converted to standard uncertainties assuming a rectangular distribution so that the combined standard uncertainty for the load cell is:

$$u_1 = \sqrt{\left(\frac{T_{class} \cdot 70,325}{100 \cdot \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{T_{CoefZero} \cdot 70,325}{100 \cdot \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{T_{CoefSens} \cdot 70,325}{100 \cdot \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{T_{creep} \cdot 70,325}{100 \cdot \sqrt{3}}\right)^2} \quad (C.13)$$

$$u_1 = 2,11 \text{ N} \quad (C.14)$$

Tables C.2 to C.5 summarize uncertainty calculations of displacement, wire width, wire thickness, and gauge length. These calculations are similar to those previously demonstrated for force.

Table C.2 – Uncertainties of displacement measurement

Displacement, mm	Type A Gaussian distribution. Creep and noise contribution $u_A = s / \sqrt{n}$ according Annex B 3 $2 V = 1 \text{ mm}$ $(0,0003 \text{ V}/2) / \sqrt{10} \text{ mm}$	Type A distribution obtained from data scatter of Figure C.1b) $u_A = s / \sqrt{182} \text{ mm}$
7,389 16 Ten to the minus 3	0,000 05	0,000 004 82
$u_2 = \sqrt{0,000 05^2 + 0,000 004 82^2} = 0,000 05 \text{ mm}$		

Table C.3 – Uncertainties of wire width measurement

Wire width, mm	Type A Gaussian distribution. Five repeated measurement with micrometer device $u_A = s / \sqrt{n}$ (0,001 3) / $\sqrt{5}$ mm	Half width of rectangular distribution according manufacture data sheet accuracy of +/- 4 μm $u_B = d_w / \sqrt{3}$ mm
1,45	0,000 58	0,002 3
$u_3 = \sqrt{0,000\ 58^2 + 0,002\ 3^2} = 0,002\ 3\ \text{mm}$		

Table C.4 – Uncertainties of wire thickness measurement

Wire thickness, mm	Type A Gaussian distribution. Five repeated measurement with micrometer device $u_A = s / \sqrt{n}$ (0,001 1) / $\sqrt{5}$ mm	Half width of rectangular distribution according manufacture data sheet accuracy of +/- 4 μm $u_B = d_w / \sqrt{3}$ mm
0,97	0,000 49	0,002 3
$u_4 = \sqrt{0,000\ 49^2 + 0,002\ 3^2} = 0,002\ 3\ \text{mm}$		

To measure the gauge length of the extensometer, a stereo microscope was used with a resolution of 20 μm .

Table C.5 – Uncertainties of gauge length measurement

Gauge length, mm	Type A Gaussian distribution. Five repeated measurement with micrometer device $u_A = s / \sqrt{n}$ (0,002) / $\sqrt{5}$ mm	Half width of rectangular distribution according manufacture data sheet accuracy of +/-20 μm $u_B = d_w / \sqrt{3}$ mm
12	9×10^{-4}	0,011
$u_5 = \sqrt{0,000\ 9^2 + 0,001\ 1^2} = 0,011\ \text{mm}$		

Finally, the uncertainty in the slope of the fitted stress versus strain curve given in Figure C.1 b) is estimated. The maximum half width difference between the measured stress values and the calculated stress values using the trend line equation from Figure C.1b) results in +/- 0,528 MPa. Using this value with gauge length ($L_G = 15\ \text{mm}$) and extensometer deflection value ($\Delta L = 0,007\ 389\ 16\ \text{mm}$), a Type B uncertainty for the modulus of elasticity can be estimated. Rearranging Equation (C.3) results in the simple equation:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon ; E = \sigma \cdot \frac{L_G}{\Delta L} \quad (\text{C.15})$$

The Type B uncertainty of the measured modulus of elasticity of the Figure C.1 b) is

$$u_b = \frac{0,528 \text{ MPa} \cdot 15 \text{ mm}}{0,00738916 \text{ mm} \cdot \sqrt{3}} = 619 \text{ MPa} \quad (\text{C.16})$$

The final combined standard uncertainty, taking into account the result of Equation (C.16) and using the sensitivity coefficients for the five variables in Equation (C.11), results in:

$$u_c = \sqrt{(1,444 \times 10^3)^2 \cdot (2,11)^2 + (-1,374 \times 10^7)^2 \cdot (0,00005)^2 + (-7,002 \times 10^4)^2 \cdot (0,0023)^2 +} \quad (\text{C.17})$$

$$+ (-1,047 \times 10^5)^2 \cdot (0,0023)^2 + (6,769 \times 10^3)^2 \cdot (0,011)^2 + (1)^2 \cdot (619)^2}$$

$$u_c = 972 \text{ MPa} \quad (\text{C.18})$$

or

$$E = 101 \text{ GPa} \pm 1 \text{ GPa} \quad (\text{C.19})$$

C.4 Uncertainty of 0,2 % proof strength $R_{p0,2}$

The 0,2 % proof strength $R_{p0,2}$ should be determined by the parallel shifting of the modulus of elasticity zero offset line to the 0,2 % strain position along the abscissa and computing the intersection of this line with the original stress versus strain curve. If the fitted modulus of elasticity line has a different origin than zero, the offset from zero should be also considered. The regression equation in Figure C.1 b) has an x-axis offset of:

$$\text{Offset strain at zero stress} = \frac{0,35248}{1015,3062} = 3,471 \times 10^{-4} \% \quad (\text{C.20})$$

Thus, the shifted position of the line along the abscissa is not exactly 0,200 00 % but 0,200 35 %. Table 6 shows the computation of stress using the regression line with and without the uncertainty contribution from Equation (C.18).

Table C.6 – Calculation of stress at 0 % and at 0,1 % strain using the zero offset regression line as determined in Figure C.1b.

Description	Regression line equation with uncertainty contribution at ε % strain	Stress at $\varepsilon = 0$ % strain, MPa	Stress at $\varepsilon = 0,1$ % strain, MPa
Baseline modulus of elasticity	$1\,015,306 \cdot \varepsilon - 0,352\,5$	- 0,353	101,2
Modulus of elasticity with + 0,97 GPa uncertainty contribution (upper line)	$1\,025,026 \cdot \varepsilon - 0,352\,5$	- 0,353	102,2
Modulus of elasticity with – 0,97 GPa uncertainty contribution (lower line)	$1\,005,586 \cdot \varepsilon - 0,352\,5$	- 0,353	100,2

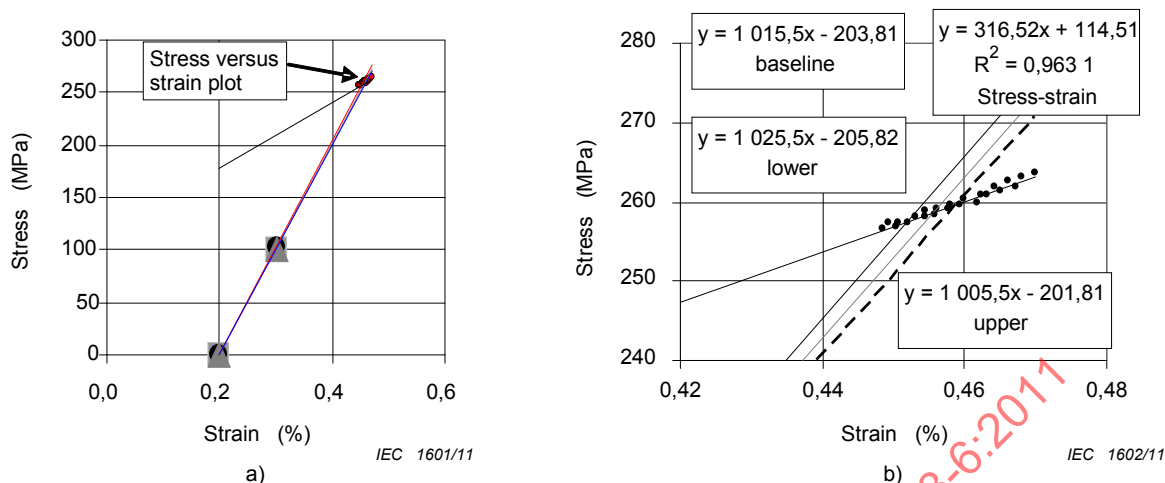


Figure C.2 – 0,2 % offset shifted regression line, the raw stress versus strain curve and the original raw data of stress versus strain

Figure C.2a shows the 0,2 % offset shifted regression line and the two lines using plus and minus uncertainty contributions relative to the base line. Four points are necessary to construct the three lines; one common point at zero stress and three calculated stress values at 0,1 % strain as shown in Table C.6, however, the corresponding strain values need to be shifted by 0,2 %. In Figure C.2a the raw stress versus strain curve is also plotted around the region where the three lines intersect the raw data. Figure C.2b shows the original raw data of stress versus strain in an enlarged view and the shifted lines according to the computations of Table C.6. The linear regression equation of stress-strain function is also given in this Figure C.2b.

In Table C.6 the selected stresses at 0 % strain and at 0,1 % strain are arbitrarily chosen for the purpose of obtaining two distinct points to determine the shifted lines in Figure C.2. The offset shift value obtained from Equation (C.19) is added to the values of 0 % strain and 0,1 % strain.

Table C.7 lists the linear regression equations after shifting the lines as determined in Figure C.2 b.

Table C.7 – Linear regression equations computed for the three shifted lines and for the stress versus strain curve in the region where the lines intersect

Description of equations	Linear regression equation ^a
Linear part of stress versus strain curve (see Figure 2 a)	$y = 316,5 \cdot x + 114,5$
Shifted modulus of elasticity baseline	$y = 1\,015,5 \cdot x - 203,8$
Modulus of elasticity with + 0,97 GPa uncertainty contribution (shifted upper line)	$y = 1\,005,5 \cdot x - 201,8$
Modulus of elasticity with – 0,97 GPa uncertainty contribution (shifted lower line)	$y = 1\,025,5 \cdot x - 205,8$

^a x is here the strain in % and y the stress in MPa.

Finally, using the equations of Table C.7, the three intersection points are computed and the stresses at these points are determined. Table C.8 shows the computation and resulting

intersection values. The reported value of proof strength is the stress of the intersection of the first line (shifted zero offset) with the stress versus strain curve. The remaining two values of stress at the intersection represent estimated error bounds for the proof strength. The error bounds are based on the uncertainty of the modulus of elasticity slope (Equation (C.18)).

Table C.8 – Calculation of strain and stress at the intersections of the three shifted lines with the stress strain curve

Description	Equation set for strain and stress calculation at intersections	Strain at intersection, %	Stress at intersection, MPa
Shifted baseline (mean)	$(-203,8-114,5) / (316,5-1\ 015,5)$	0,455 365	
	$316,5 \cdot 0,455\ 365 + 114,5$		258,6
Shifted upper line	$(-201,8-114,5) / (316,5-1\ 005,5)$	0,459 071	
	$316,5 \cdot 0,459\ 071 + 114,5$		259,8
Shifted lower line	$(-205,8-114,5) / (316,5-1\ 025,5)$	0,451 763	
	$316,5 \cdot 0,451\ 763 + 114,5$		257,5

The standard uncertainty of the proof strength is a Type B determination, and can be estimated using:

$$\text{Uncertainty Type B: } u_B = -\frac{259,8 - 257,5}{\sqrt{3}} = 0,664 \text{ MPa} \quad (\text{C.21})$$

The scatter of the raw data shown in Figure C.2b should also be considered in the final uncertainty estimate. Table C.9 shows the measured stress versus strain data of Figure C.2b. In addition, column 3 of Table C.9 gives the computed stress using the linear fit to the data in the region of interest. Finally, columns 4 shows the differences between measured and computed data.

Table C.9 – Measured stress versus strain data and the computed stress based on a linear fit to the data in the region of interest

Strain %	Stress MPa	Calculated according regression equation, MPa	Difference calculated observed MPa
0,4494	257,25	256,76	0,4896
0,4485	256,52	256,46	0,0603
0,4507	257,47	257,15	0,3203
0,4505	256,80	257,09	–0,289 6
0,4530	258,09	257,90	0,193 3
0,4521	257,38	257,60	–0,222 4
0,4546	258,86	258,40	0,463 2
0,4544	258,08	258,33	–0,250 4
0,4561	259,07	258,87	0,204 7
0,4559	258,27	258,82	–0,551 0
0,4580	259,60	259,48	0,123 8
0,4578	259,04	259,40	–0,357 0
0,4600	260,40	260,11	0,287 6
0,4594	259,52	259,91	–0,393 0
0,4623	260,91	260,84	0,069 6
0,4617	259,85	260,66	–0,806 8
0,4644	261,88	261,49	0,387 6
0,4633	260,87	261,15	–0,283 7
0,4661	262,63	262,03	0,602 7
0,4651	261,36	261,72	–0,360 3
0,4680	263,12	262,63	0,491 3
0,4673	261,90	262,40	–0,504 0
0,4699	263,53	263,23	0,303 1

The extreme differences between the computed and measured stress from the 4th column of Table 9 are:

$$-0,806\ 8\ \text{MPa and } +0,602\ 7\ \text{MPa} \quad (\text{C.22})$$

The extreme differences represent observed limits to random error which can be converted to a standard uncertainty using:

$$\text{Uncertainty Type B: } u_B = -\frac{0,602\ 7 - (-0,806\ 8)}{\sqrt{3}} = 0,813\ 8\ \text{MPa} \quad (\text{C.23})$$

Combined standard uncertainty for 0,2 % proof strength is given:

$$\text{Combined uncertainty: } u_c = \sqrt{0,813\ 8^2 + 0,664^2} = 1,05\ \text{MPa} \quad (\text{C.24})$$

Thereafter, the 0,2 % proof strength result is given as:

$$0,2\ \text{offset proof strength: } R_{p02} = 258,6\ \text{MPa} \quad +/\!- \ 1,05\ \text{MPa} \quad (\text{C.25})$$

Bibliography

IEC 61788-5, *Superconductivity – Part 5: Matrix to superconductor volume ratio measurement – Copper to superconductor volume ratio of Cu/Nb-Ti composite superconductors*

ISO 3611:2010, *Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional measuring equipment: Micrometers for external measurements –Design and metrological characteristics*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-6:2011

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-6:2017

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	36
INTRODUCTION	38
1 Domaine d'application	39
2 Références normatives	39
3 Termes et définitions	39
4 Principe	40
5 Appareillage	40
5.1 Conformité	40
5.2 Machine d'essai	40
5.3 Extensomètre	41
6 Préparation de l'éprouvette	41
6.1 Redressement de l'éprouvette	41
6.2 Longueur de l'éprouvette	41
6.3 Retrait de l'isolation	41
6.4 Détermination de la surface de section (S_0)	41
7 Conditions d'essai	41
7.1 Serrage de l'éprouvette	41
7.2 Préchargement et réglage de l'extensomètre	41
7.3 Vitesse d'essai	42
7.4 Essai	42
8 Calcul des résultats	44
8.1 Résistance à la traction (R_m)	44
8.2 Charge d'épreuve à 0,2 % ($R_{p0,2A}$ et $R_{p0,2B}$)	44
8.3 Module d'élasticité (E_0 et E_a)	44
9 Incertitude	44
10 Rapport d'essai	45
10.1 Eprouvette	45
10.2 Résultats	45
10.3 Conditions d'essai	45
Annex A (informative) Informations supplémentaires concernant les Articles 1 à 10	46
Annex B (informative) Considérations relatives à l'incertitude	51
Annex C (informative) Exemples spécifiques concernant les essais mécaniques	56
Bibliographie	66
Figure 1 – Courbe contrainte-déformation et définition du module d'élasticité et des charges d'épreuve à 0,2 %	43
Figure A.1 – Exemple d'extensomètre léger, où R1 et R3 indiquent le rayon du coin	47
Figure A.2 – Exemple d'extensomètre muni d'une masse d'équilibrage et d'un axe d'éprouvette vertical	48
Figure C.1 – Courbe de contrainte mesurée en fonction de la déformation du fil supraconducteur de NbTi de section transversale rectangulaire et partie initiale de la courbe	56
Figure C.2 – Ligne de régression décalée de 0,2 %, courbe brute de contrainte en fonction de la déformation et données brutes d'origine de contrainte en fonction de la déformation	62

Tableau B.1 – Signaux de sortie de deux extensomètres nominalement identiques.....	52
Tableau B.2 – Valeurs moyennes de deux signaux de sortie.....	52
Tableau B.3 – Ecart-types expérimentaux de deux signaux de sortie	53
Tableau B.4 – Incertitudes-types de deux signaux de sortie.....	53
Tableau B.5 – Coefficient de variation de deux signaux de sortie.....	53
Tableau C.1 – Caractéristiques du dynamomètre en fonction des fiches de caractéristiques du fabricant.....	59
Tableau C.2 – Incertitudes de mesure de déplacement.....	60
Tableau C.3 – Incertitudes de mesure de largeur de fil	60
Tableau C.4 – Incertitudes de mesure de l'épaisseur de fil.....	60
Tableau C.5 – Incertitudes de mesure de longueur entre repères	61
Tableau C.6 – Calcul de la contrainte à 0 % et de la déformation à 0,1 % en utilisant la ligne de régression de décalage nul déterminée à la Figure C.1b).	62
Tableau C.7 – Equations de régression linéaire calculée d'après les trois lignes décalées et pour la courbe de contrainte en fonction de la déformation dans la région où les lignes se coupent	63
Tableau C.8 – Calcul de la déformation et de la contrainte aux intersections des trois lignes décalées avec la courbe contrainte-déformation	63
Tableau C.9 – Données mesurées de contrainte en fonction de la déformation et contrainte calculée basée sur une adaptation linéaire aux données dans la région d'intérêt	64

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 6: Mesure des propriétés mécaniques – Essai de traction à température ambiante des supraconducteurs composites de Cu/Nb-Ti

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI 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 la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI 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 la CEI. La CEI 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 la CEI, 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 la CEI, 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 la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, 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 la CEI peuvent faire l'objet de droits de brevet. La CEI 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 CEI 61788-6 a été établie par le comité d'études 90 de la CEI: Supraconductivité.

Cette troisième édition annule et remplace la deuxième édition parue en 2008, dont elle constitue une révision technique.

Cette édition contient les modifications techniques significatives suivantes par rapport à l'édition précédente:

- un exemple spécifique d'estimation d'incertitude concernant les essais mécaniques a été ajouté en Annexe C.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
90/267/FDIS	90/278/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.

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

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

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 la CEI sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A 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

Les fils de composites supraconducteurs de Cu/Nb-Ti actuellement utilisés sont un matériau composite multifilament avec une matrice qui agit comme stabilisateur et support, dans laquelle sont incorporés des filaments supraconducteurs ultrafins. On utilise comme matériau supraconducteur un alliage de 40 % à 55 % en masse de Nb et de Ti, tandis qu'on utilise comme matériau de matrice du cuivre exempt d'oxygène et de l'aluminium de haute pureté. Les composites supraconducteurs du commerce ont une forte densité de courant et une faible section de surface. La principale application des composites supraconducteurs est la construction d'aimants supraconducteurs. Pendant la fabrication de l'aimant, des contraintes complexes sont appliquées à ses enroulements et, lorsqu'il est excité, une force électromagnétique importante est appliquée aux fils supraconducteurs en raison de sa forte densité de courant. Il est donc indispensable de déterminer les propriétés mécaniques des fils supraconducteurs dont sont constitués les enroulements.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-6:2011

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 6: Mesure des propriétés mécaniques – Essai de traction à température ambiante des supraconducteurs composites de Cu/Nb-Ti

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61788 spécifie une méthode d'essai détaillant les modes opératoires d'essai de traction à exécuter sur des fils composites supraconducteurs de Cu/Nb-Ti à température ambiante.

Cet essai est utilisé pour mesurer le module d'élasticité, la charge d'épreuve à 0,2 % du composite due à la déformation du composant de cuivre et à la résistance à la traction.

La valeur du pourcentage d'allongement après fracture et le second type de charge d'épreuve à 0,2 % due à la déformation du composant en Nb-Ti ne servent que de référence (voir Articles A.1 et A.2).

L'échantillon spécifié par le présent mode opératoire d'essai a une section transversale circulaire ou rectangulaire avec une surface de 0,15 mm² à 2 mm² et un rapport volumique entre le cuivre et le supraconducteur de 1,0 à 8,0 et sans revêtement isolant.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application 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).

CEI 60050-815, *Vocabulaire Electrotechnique International – Partie 815: Supraconductivité*

ISO 376, *Matériaux métalliques – Étalonnage des instruments de mesure de force utilisés pour la vérification des machines d'essais uniaxiaux*

ISO 6892-1, *Matériaux métalliques – Essai de traction – Partie 1: Méthode d'essai à température ambiante*

ISO 7500-1, *Matériaux métalliques – Vérification des machines pour essais statiques uniaxiaux – Partie 1: Machines d'essai de traction/compression – Vérification et étalonnage du système de mesure de force*

ISO 9513, *Matériaux métalliques – Étalonnage des extensomètres utilisés lors d'essais uniaxiaux*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les définitions données dans la CEI 60050-815 et l'ISO 6892-1, ainsi que les suivantes, s'appliquent.

3.1

contrainte de traction

force de traction divisée par la surface de section originale à tout moment durant l'essai

3.2

résistance à la traction

R_m

contrainte de traction correspondant à la force d'essai maximale

NOTE Le symbole σ_{UTS} est couramment utilisé à la place de R_m .

3.3

longueur entre repères d'un extensomètre

longueur de la partie parallèle de l'éprouvette utilisée pour la mesure de l'allongement au moyen d'un extensomètre

3.4

distance entre pinces

L_g

longueur comprise entre les pinces qui maintiennent une éprouvette en position avant de démarrer l'essai

3.5

charge d'épreuve à 0,2 %

$R_{p0,2}$ (voir Figure 1)

valeur de contrainte pour laquelle le composant de cuivre se déforme de 0,2 %

NOTE 1 La contrainte désignée, $R_{p0,2A}$ ou $R_{p0,2B}$, correspond respectivement au point A ou B de la Figure 1. Cette résistance est considérée comme une charge d'épreuve à 0,2 % représentative du composite. Le deuxième type de charge d'épreuve à 0,2 % est défini comme la charge d'épreuve à 0,2 % du composite lorsque le composant en Nb-Ti se déforme de 0,2 %, valeur correspondant au point C de la Figure 1, comme décrit en complément à l'Annexe A (voir Article A.2).

NOTE 2 Le symbole $\sigma_{0,2}$ est couramment utilisé à la place de $R_{p0,2}$.

3.6

module d'élasticité

E

gradient de la partie rectiligne de la courbe contrainte-déformation dans la région de déformation élastique

4 Principe

L'essai consiste à déformer une éprouvette au moyen d'une force de traction, généralement jusqu'à la fracture, dans le but de déterminer les propriétés mécaniques définies à l'Article 3.

5 Appareillage

5.1 Conformité

La machine d'essai et l'extensomètre doivent respectivement être conformes à l'ISO 7500-1 et à l'ISO 9513. L'étalonnage doit satisfaire à l'ISO 376. Les exigences spéciales de la présente norme sont présentées ici.

5.2 Machine d'essai

Un système de régulation de machine d'essai de traction fournissant une vitesse de traction constante doit être utilisé. Les pinces doivent avoir une structure et une résistance appropriées à l'éprouvette et doivent être construites de manière à réaliser une liaison

efficace avec la machine d'essai de traction. Les faces des pinces doivent être limées ou moletées ou sinon rugueuses, de façon que l'éprouvette ne glisse pas sur celles-ci durant l'essai. Le serrage peut être du type à vis ou pneumatique ou actionné de manière hydraulique.

5.3 Extensomètre

La masse de l'extensomètre doit être inférieure ou égale à 30 g, de façon à ne pas influencer sur les propriétés mécaniques du fil supraconducteur. On doit également prendre soin d'éviter l'application de moments de flexion à l'éprouvette (voir Article A.3).

6 Préparation de l'éprouvette

6.1 Redressement de l'éprouvette

Lorsqu'une éprouvette prélevée sur une bobine doit être redressée, on doit utiliser une méthode ayant aussi peu d'influence que possible sur le matériau.

6.2 Longueur de l'éprouvette

La longueur totale de l'éprouvette doit être la distance intérieure entre les pinces à laquelle s'ajoute la longueur des pinces. La distance intérieure entre les pinces doit être au moins de 60 mm, comme l'exige l'installation de l'extensomètre.

6.3 Retrait de l'isolation

Si la surface de l'éprouvette est recouverte d'un matériau isolant, ce revêtement doit être enlevé. On doit utiliser une méthode chimique ou mécanique, en prenant soin de ne pas endommager la surface de l'éprouvette (voir Article A.4).

6.4 Détermination de la surface de section (S_0)

Un micromètre ou un autre appareil de mesure de dimension doit être utilisé pour obtenir la surface de section de l'éprouvette après avoir enlevé le dépôt d'isolation. La surface de section d'un fil circulaire doit être calculée en utilisant la moyenne arithmétique des deux diamètres orthogonaux. La surface de section d'un fil rectangulaire doit être obtenue à partir du produit de son épaisseur par sa largeur. Les corrections à effectuer pour les coins de la surface de section doivent être déterminées par consultation entre les parties concernées (voir Article A.5).

7 Conditions d'essai

7.1 Serrage de l'éprouvette

L'éprouvette doit être montée sur les pinces de la machine d'essai de traction. A ce moment, l'éprouvette et l'axe du chargement en traction doivent se trouver sur la même ligne droite. Du papier abrasif peut être inséré en tant que matériau d'amortissement pour empêcher les surfaces serrées de l'éprouvette de glisser et de se fracturer (voir Article A.6).

7.2 Préchargement et réglage de l'extensomètre

S'il existe du jeu dans l'éprouvette lorsque celle-ci est montée, une force d'un dixième au maximum de la charge d'épreuve à 0,2 % du composite doit être appliquée pour absorber le jeu avant de monter l'extensomètre. Lors du montage de l'extensomètre, on doit prendre soin d'empêcher la déformation de l'éprouvette. L'extensomètre doit être monté au centre entre les pinces, en alignant la direction de mesure avec la direction de l'axe de l'éprouvette. Après installation, le chargement doit être annulé.

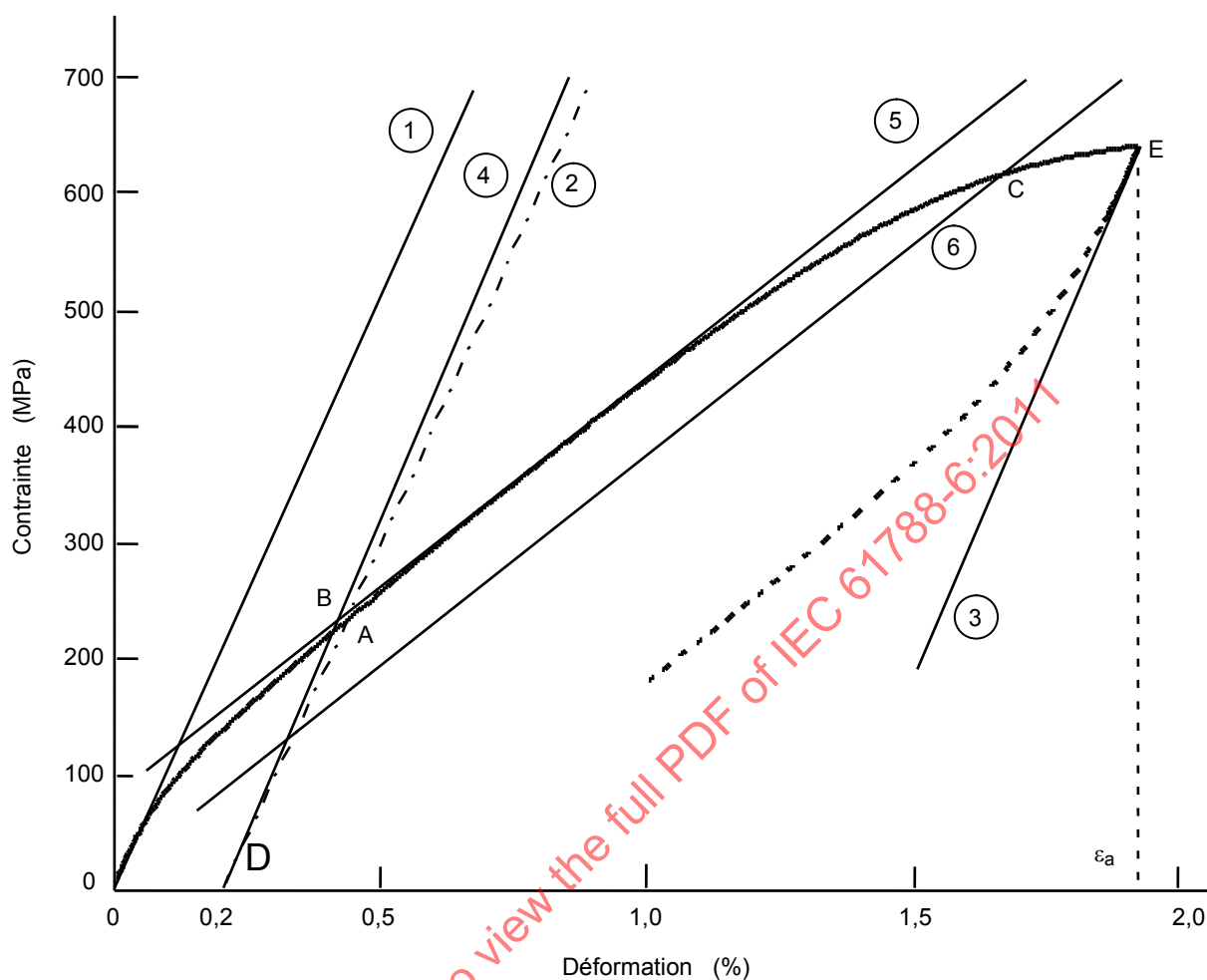
7.3 Vitesse d'essai

La vitesse de déformation doit être de $10^{-4}/s$ à $10^{-3}/s$ pendant l'essai utilisant l'extensomètre. Après retrait de l'extensomètre, la vitesse de déformation peut être accrue jusqu'à un maximum de $10^{-3}/s$.

7.4 Essai

La machine d'essai de traction doit être démarrée après que la vitesse de traction a été réglée au niveau spécifié. Les signaux de l'extensomètre et du dynamomètre doivent être tracés respectivement en abscisse et en ordonnée, comme représenté sur la Figure 1. Lorsque la déformation totale a atteint approximativement 2 %, réduire la force approximativement de 10 % et enlever ensuite l'extensomètre. L'étape de retrait de l'extensomètre peut être omise dans le cas où l'extensomètre est suffisamment robuste pour ne pas être endommagé par la déformation totale et le choc de fracture de cet essai. A ce moment, on doit prendre soin d'éviter d'appliquer une force inutile à l'éprouvette. Augmenter ensuite à nouveau le chargement jusqu'au niveau précédent et poursuivre l'essai jusqu'à la fracture de l'éprouvette. La mesure doit être renouvelée si un glissement ou une fracture se produit sur les surfaces serrées de l'éprouvette.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-6



IEC 1597/11

Légende

- ① Ligne de chargement initiale
- ② Ligne décalée de 0,2%, parallèle à la ligne de chargement initiale
- ③ Ligne de déchargement
- ④ Ligne décalée de 0,2%, parallèle à la ligne de déchargement
- ⑤ Seconde partie linéaire de la ligne de chargement
- ⑥ Ligne décalée de 0,2%, parallèle à la seconde ligne de chargement linéaire

NOTE 1 Lorsque la déformation totale a atteint ~2 % (point E), la charge est réduite de 10 % et l'extensomètre est enlevé si nécessaire. La charge est ensuite de nouveau augmentée.

NOTE 2 La pente de la ligne de chargement initiale est habituellement plus petite que celle de la ligne de déchargement. Deux lignes peuvent ensuite être tracées à partir du point de décalage à 0,2 % sur l'abscisse pour obtenir une charge d'épreuve à 0,2 % du composite due à la déformation du composant de cuivre. Le point A est obtenu à partir de la ligne de chargement initiale, et le point B est obtenu à partir de la ligne de déchargement. Le point C est le second type de charge d'épreuve à 0,2 % du composite lorsque le composant de Nb-Ti se déforme.

Figure 1 – Courbe contrainte-déformation et définition du module d'élasticité et des charges d'épreuve à 0,2 %

8 Calcul des résultats

8.1 Résistance à la traction (R_m)

La résistance à la traction R_m doit être la force maximale divisée par la surface de section originale du fil avant chargement.

8.2 Charge d'épreuve à 0,2 % ($R_{p0,2A}$ et $R_{p0,2B}$)

La charge d'épreuve à 0,2 % du composite due à la déformation du composant de cuivre est déterminée de deux manières à partir des courbes contrainte-déformation de chargement et de déchargement, comme représenté à la Figure 1. La charge d'épreuve à 0,2 % sous un chargement de $R_{p0,2A}$ doit être déterminée comme suit: la partie linéaire initiale en chargement de la courbe contrainte-déformation est déplacée de 0,2 % sur l'axe de déformation (ligne de décalage de 0,2 % sous chargement), et le point A auquel cette droite coupe la courbe contrainte-déformation doit être défini comme la charge d'épreuve à 0,2 % sous chargement. La charge d'épreuve à 0,2 % du composite sous déchargement de $R_{p0,2B}$ doit être déterminée comme suit: la partie linéaire sous déchargement doit être déplacée parallèlement au point de déformation décalé de 0,2 %. L'intersection de cette ligne avec la courbe contrainte-déformation détermine le point B qui doit être défini comme la charge d'épreuve à 0,2 %. La mesure doit être écartée si la charge d'épreuve à 0,2 % du composite est inférieure à trois fois la précharge spécifiée en 7.2.

Chaque charge d'épreuve à 0,2 % doit être calculée en utilisant la formule (1) indiquée ci-dessous:

$$R_{p0,2i} = F_i / S_0 \quad (1)$$

où

$R_{p0,2i}$ est la charge d'épreuve à 0,2 % (MPa) en chaque point;

F_i est la force (N) en chaque point;

S_0 est la surface en section originale (en millimètres carrés) de l'éprouvette;

En outre, $i = A$ et B .

8.3 Module d'élasticité (E_o et E_a)

Le module d'élasticité doit être calculé en utilisant la formule suivante et la partie rectiligne, soit de la courbe de chargement initiale, soit de la courbe de déchargement.

$$E = \Delta F (1 + \varepsilon_a) / (S_0 \Delta \varepsilon) \quad (2)$$

où

E est le module d'élasticité (MPa);

ΔF sont les incréments (N) de la force correspondante;

$\Delta \varepsilon$ est l'incrément de la déformation correspondant à ΔF ;

ε_a est la déformation juste après déchargement, comme représenté sur la Figure 1.

E est désigné par E_o lorsqu'on utilise la courbe de chargement initiale ($\varepsilon_a = 0$), et par E_a lorsqu'on utilise la courbe de déchargement ($\varepsilon_a \neq 0$).

9 Incertitude

Sauf spécification contraire, les mesures doivent être effectuées dans une plage de températures allant de 280 K à 310 K. Une cellule de mesure de force avec une incertitude-type composée ne dépassant pas 0,5 % doit être utilisée. Un extensomètre avec une incertitude-type composée ne dépassant pas 0,5 % doit être utilisé. L'appareil de mesure de

dimension doit avoir une incertitude-type composée ne dépassant pas 0,1 %. Les incertitudes-types composées cibles sont définies par la procédure RSS (somme des racines carrées, *root square sum*), qui est indiquée à l'Annexe B.

Il n'existe pas de données expérimentales fiables concernant les incertitudes sur les modules d'élasticité et les charges d'épreuve à 0,2 %, comme mentionné à l'Article A.7. D'autre part, comme décrit à l'Annexe C, leurs incertitudes peuvent être évaluées à partir des conditions expérimentales dont les parties sont indiquées ci-dessus, telles que l'incertitude de la cellule de mesure de force. En conséquence, on s'attend à ce que les incertitudes élargies relatives ($k=2$) pour le module d'élasticité, E_o et la charge d'épreuve à 0,2 %, $R_{p0,2A}$ soient respectivement de 2,0 % ($N=1$) et 0,78 % ($N=1$), où N indique la durée des essais répétés.

NOTE Les incertitudes mentionnées dans le présent texte, s'il est utilisé dans le but d'une évaluation pratique, doivent être envisagées selon les considérations spécifiques avec les précautions détaillées, comme indiqué à l'Annexe B.

10 Rapport d'essai

10.1 Eprouvette

- a) Nom du fabricant de l'éprouvette
- b) Classification et/ou symbole
- c) Numéro de lot

Les informations suivantes doivent être rapportées si nécessaire.

- d) Matières premières ainsi que leur composition chimique
- e) Forme en section transversale et dimension du fil
- f) Diamètre de filament
- g) Nombre de filaments
- h) Pas de torsade des filaments
- i) Rapport entre cuivre et supraconducteur

10.2 Résultats

- a) Résistance à la traction (R_m)
- b) Charges d'épreuve à 0,2 % ($R_{p0,2A}$ et $R_{p0,2B}$)
- c) Module d'élasticité (E_o et E_a avec ε_a)

Les informations suivantes doivent être rapportées si nécessaire.

- d) Second type de charge d'épreuve à 0,2 % ($R_{p0,2C}$)
- e) Pourcentage d'allongement après fracture (A)

10.3 Conditions d'essai

- a) Vitesse de traction
- b) Distance entre pinces
- c) Température

Les informations suivantes doivent être rapportées si nécessaire.

- d) Fabricant et modèle de la machine d'essai
- e) Fabricant et modèle d'extensomètre
- f) Méthode de serrage

Annex A (informative)

Informations supplémentaires concernant les Articles 1 à 10

A.1 Généralités

Cette annexe fournit des informations de référence concernant les facteurs variables pouvant avoir une influence importante sur les méthodes d'essai de traction, ainsi que certaines précautions à observer lorsqu'on utilise la présente norme.

A.2 Pourcentage d'allongement après fracture (A)

Dans les fils supraconducteurs de Cu/NbTi, il existe une différence de résistance entre le cuivre et le NbTi, et le fil est souvent déformé en ondes par le choc de fracture. Il est difficile dans ce cas de déterminer précisément l'allongement après fracture en utilisant la méthode d'aboutement. Ainsi, il convient que la mesure d'allongement après fracture ne serve que de référence. Le mouvement de la traverse peut être utilisé pour rechercher la valeur approchée de l'allongement après fracture, au lieu d'utiliser la méthode d'aboutement, comme indiqué ci-dessous. Pour utiliser cette méthode, la position de la traverse à la fracture doit être enregistrée. Utiliser la formule suivante pour obtenir l'allongement après fracture, donné en pourcentage.

$$A = 100 (L_u - L_c) / L_c \quad (\text{A.1})$$

où

A est le pourcentage d'allongement après fracture;

L_c est la distance initiale entre traverses;

L_u est la distance entre traverses après fracture.

A.3 Second type de charge d'épreuve à 0,2 % ($R_{p0,2C}$)

Le second type de charge d'épreuve à 0,2 %, auquel le composant de Nb-Ti se déforme, est défini raisonnablement en se basant sur la règle du mélange pour le composite bimétallique incluant des filaments continus. Comme indiqué sur la Figure 1, il convient que la contrainte $R_{p0,2C}$ correspondant au point C, auquel la partie rectiligne de la courbe de chargement après le point A est déplacé de 0,2 % sur l'axe de déformation, coupe la courbe contrainte-déformation. La partie rectiligne appropriée est habituellement observée à partir des fils supraconducteurs de Cu/Nb-Ti du commerce, car la composante de cuivre présente une déformation plastique avec un comportement linéaire. La courbe contrainte-déformation ne présente souvent aucune ligne droite, mais elle est arrondie pour certains fils lorsqu'ils présentent un rapport élevé cuivre/absence de cuivre et sont fortement écrouis. Il a été mis en évidence de façon empirique que l'aspect arrondi est observé lorsque le facteur k ci-dessous est inférieur à 0,4:

$$k = (R_m - R_{p0,2A}) / R_{p0,2A} \quad (\text{A.2})$$

$R_{p0,2C}$ constitue l'un des paramètres importants décrivant la propriété mécanique du matériau composite du point de vue scientifique, mais son utilisation n'est pas toujours demandée au sens ingénierie.

A.4 Extensomètre

Lorsqu'on utilise un type particulier d'extensomètre qui est fixé avec une pièce d'écartement inamovible pour déterminer la longueur entre repères, celui-ci peut provoquer un problème durant le déchargement du fil jusqu'à une force nulle. Pour éviter une force de compression sur la pièce d'écartement, la longueur réelle entre repères doit être réglée durant l'installation avec un jeu suffisant. Si le jeu après déchargement n'est pas négligeable, il doit être inclus dans le calcul des valeurs de déformation.

Si l'éprouvette est mince et que l'extensomètre est relativement lourd, tout moment de flexion provoqué par le poids de l'extensomètre peut contraindre l'éprouvette, ce qui peut avoir pour conséquence la déformation de l'éprouvette. Pour l'éviter, un extensomètre léger avec une masse d'équilibrage doit être soigneusement fixé. En variante, il est également acceptable d'utiliser un extensomètre suffisamment léger sans masse d'équilibrage. La Figure A.1 représente un extensomètre réalisé en alliage de Ti, avec une masse totale d'environ 3 g. Sa légèreté est telle que même une utilisation unique sans masse d'équilibrage peut fournir une incertitude suffisante selon le mode opératoire de la présente norme. La Figure A.2 représente l'un des extensomètres les plus légers disponibles dans le commerce, avec une masse totale de 31 g, avec masse d'équilibrage. Un essai interlaboratoires (RRT, *round robin test*) l'utilisant a été effectué au Japon, et de bons résultats ont été obtenus. Les résultats ont été utilisés pour élaborer la présente Norme internationale.

Dimensions en millimètres

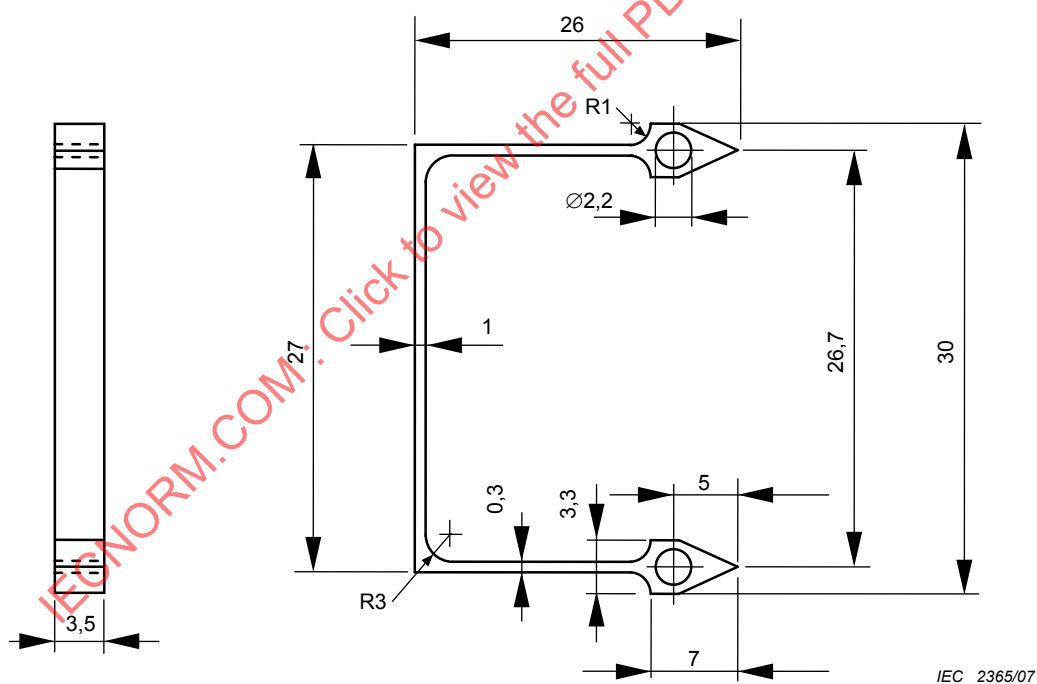
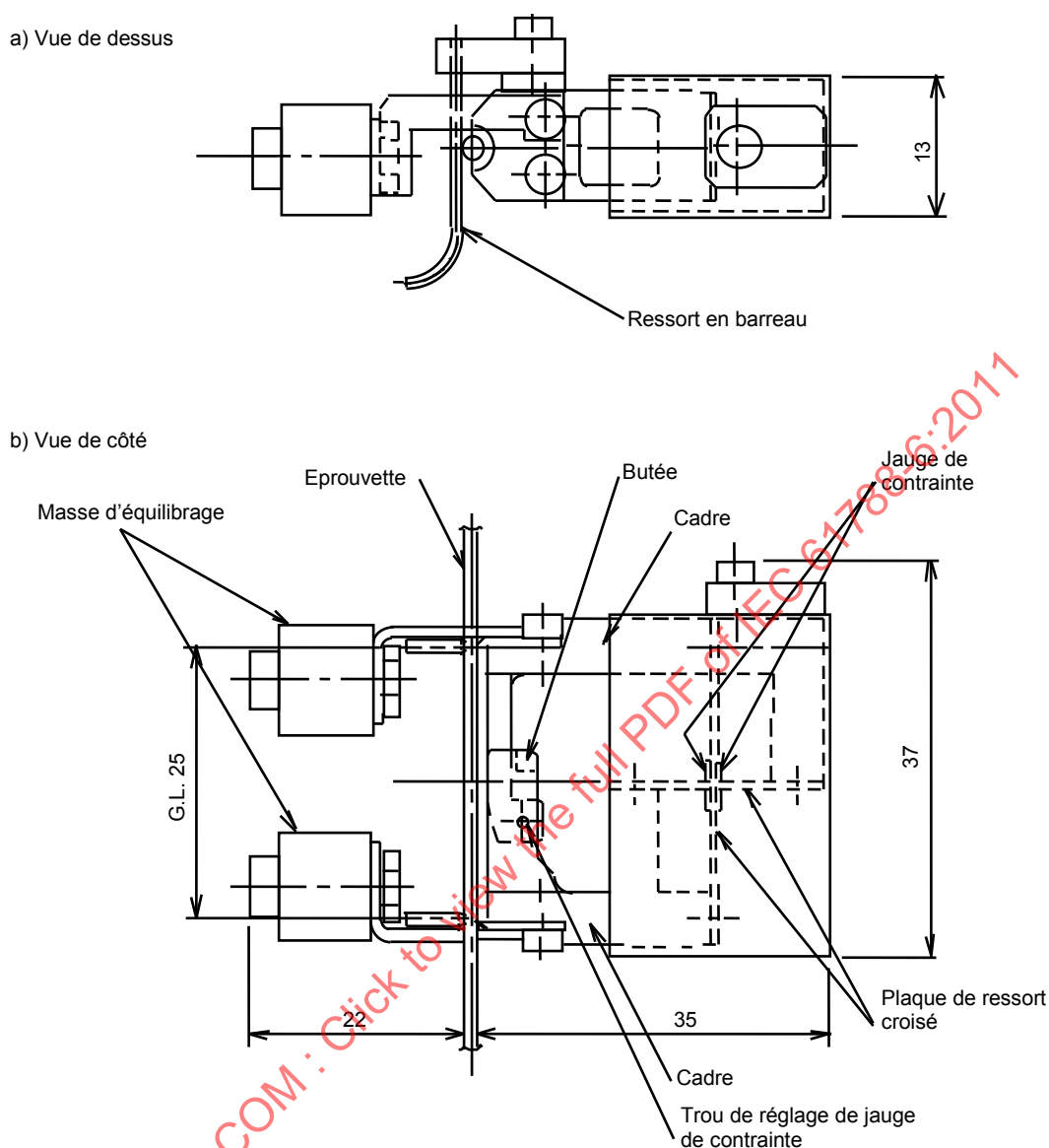


Figure A.1 – Exemple d'extensomètre léger,
où R1 et R3 indiquent le rayon du coin

Dimensions en millimètres



IEC 1598/11

Figure A.2 – Exemple d'extensomètre muni d'une masse d'équilibrage et d'un axe d'éprouvette vertical

NOTE D'autres informations concernant les extensomètres peuvent être obtenues auprès du Comité National Japonais du CE 90 de la CEI, ISTECH, 10-13, Shinonome 1-chome Koto-ku, Tokyo 135-0062, Japon, Tél 81-3-3536-7214, Fax 81-3-3536-7318, e-mail Koki TSUNODA <tc90tsunoda@istec.or.jp>

Puisque le fil supraconducteur composite est recouvert de cuivre mou, une rayure sur la surface de l'éprouvette effectuée lorsque celle-ci est montée peut constituer le point de départ d'une fracture. Il convient donc de manipuler l'éprouvette avec soin.

A.5 Revêtement isolant

Il convient de retirer le revêtement de la surface de l'éprouvette en utilisant un solvant organique approprié qui n'endommage pas l'éprouvette. Si le matériau de recouvrement n'est pas dissous par le solvant organique, il convient d'utiliser une méthode mécanique avec soin pour éviter d'endommager le cuivre. Si le revêtement n'est pas enlevé, il n'a qu'une faible influence sur la résistance. Par exemple, la résistance à la traction diminue de moins de 3 % pour un fil de faible résistance ayant un taux de cuivre élevé de 7. Le revêtement n'est pas

conçu comme un composant structurel. Une analyse de mesure comme composite à trois composants, à savoir du cuivre, du Nb-Ti et un revêtement isolant, est trop compliquée à effectuer. Cette méthode d'essai concerne donc un fil nu, afin de maintenir le niveau d'incertitude.

A.6 Surface de section

Lorsqu'une incertitude encore plus faible est requise, la surface de section peut être obtenue en corrigeant le rayon du coin du fil rectangulaire fini par des filières, en utilisant la valeur fournie sur les caractéristiques du fabricant. Pour un laminage ou un fini en tête de turc, le rayon du coin n'est pas contrôlé et une correction est effectuée en utilisant une microphotographie de la section transversale.

A.7 Force de serrage

Une faible force de serrage a pour conséquence un glissement et une force de serrage importante peut provoquer la rupture de la surface serrée. Il convient donc de régler la force de serrage avec soin.

A.8 Incertitude

Le comité national japonais du comité d'études 90 de la CEI a satisfait à l'essai interlaboratoires en 1996 par les contributions de huit groupes de recherche [1] pour évaluer uniquement le coefficient de variation des données expérimentales sur les modules d'élasticité et les charges d'épreuve à 0,2 % [2], mais pas leurs incertitudes. Il n'est toutefois pas possible de déduire leurs incertitudes à l'heure actuelle, car leurs données originales étaient insuffisantes pour évaluer les incertitudes. La seule façon de connaître l'incertitude est de l'évaluer en utilisant le calcul numérique basé sur les statistiques de Type B car le mode opératoire est donné à l'Annexe C, et ses résultats sont décrits à l'Article 9 du texte principal.

Les faits empiriques concernant la source de dispersion des valeurs mesurées sont décrits ci-dessous. Le module d'élasticité E_0 déterminé sous la courbe de chargement s'est révélé être toujours inférieur au module E_a sous déchargement. La raison en est attribuée aux problèmes de manipulation suivants: la courbure de l'éprouvette de fil, le désalignement du serrage de l'échantillon par rapport à l'axe de la charge et un faible serrage, et ainsi de suite. On souligne également que le composant de cuivre est dans un état plastique à température ambiante avant l'essai, en fonction du degré de contraction thermique durant le refroidissement à partir de la température de traitement à chaud. Dans son ensemble, la courbe de chargement initiale avec une non-linéarité donne le résultat suivant: $E_0 < E_a$.

Le comité national allemand du comité d'études 90 de la CEI a rapporté que le module d'élasticité peut être déterminé avec une faible incertitude lorsqu'on adopte un chargement linéaire initial avec un décalage nul. Cette faible incertitude a été obtenue en utilisant deux extensomètres légers (Figure A.1), permettant l'annulation des effets de courbure initiale possibles et assurant un haut degré de linéarité pour la ligne de chargement avec décalage nul.

La manipulation des éprouvettes doit s'effectuer avec soin pour ne pas induire de déformation du composant de cuivre. Sinon, la charge d'épreuve à 0,2 % du composite due à la déformation du composant de cuivre augmenterait en raison de l'écrouissage. Il convient à cet égard de prendre en considération la limite de préchargement admissible.

Le second type de charge d'épreuve à 0,2 %, $R_{p0,2C}$, est la grandeur déterminée avec l'incertitude la plus faible dont il convient qu'elle ne serve que de référence. On doit toutefois prendre soin à s'assurer de l'existence d'une partie rectiligne dans la courbe contrainte-déformation après le point A sur la Figure 1.

A.9 Documents de référence de l'Annexe A

- [1] SHIMADA, M., HOJO, M., MORIAI, H. and OSAMURA. K. *Jpn. Cryogenic Eng*, 1998, 33, p. 665.
- [2] OSAMURA, K., NYILAS, A., SHIMADA, M., MORIAI, H., HOJO, M., FUSE T. and SUGANO, M. *Adv. Superconductivity*, 1999, XI, p.1515.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-6:2011

Annex B (informative)

Considérations relatives à l'incertitude

B.1 Vue d'ensemble

Un certain nombre d'organisations internationales de normalisation, incluant la CEI, ont décidé en 1995 d'uniformiser l'utilisation des termes statistiques dans leurs normes. Il a été décidé d'utiliser le terme « incertitude » pour toutes les expressions statistiques quantitatives (associées à un nombre) et d'éliminer l'utilisation quantitative des termes « précision » et « exactitude ». Les termes « exactitude » et « précision » peuvent toujours être utilisés d'une manière qualitative. La terminologie et les méthodes d'évaluation d'incertitude sont normalisées dans le « Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure » (GUM) [1] ¹.

On a laissé à chaque comité d'études le soin de décider de modifier les normes existantes et futures de manière à être cohérentes avec la nouvelle approche uniformisée. Un tel changement n'est pas aisé et crée une confusion supplémentaire, en particulier pour les personnes qui ne sont pas familiarisées avec les statistiques et le terme incertitude. Lors de la réunion du comité d'études 90 à Kyoto en juin 2006, il a été décidé de mettre en œuvre ces changements dans les futures normes.

La conversion des nombres d'« exactitude » et de « précision » en nombres équivalents d'« incertitude » nécessite la connaissance des origines des nombres. Le facteur d'élargissement du nombre d'origine peut avoir été 1, 2, 3 ou un autre nombre. Une spécification d'un fabricant pouvant parfois être décrite par une répartition rectangulaire conduit à un nombre de conversion de $1/\sqrt{3}$. Le facteur de recouvrement approprié a été utilisé lors de la conversion du nombre d'origine en incertitude-type équivalente. Le processus de conversion n'est pas une opération que l'utilisateur de la norme doit traiter pour la conformité avec les normes du comité d'études 90, il n'est expliqué ici que pour informer l'utilisateur de la façon dont les nombres ont été modifiés dans ce processus. Le processus de conversion en terminologie d'incertitude ne modifie pas la nécessité pour les utilisateurs d'évaluer leur incertitude de mesure pour déterminer si les critères de la norme sont satisfaits.

Les modes opératoires décrits dans les normes de mesure du comité d'études 90 ont été conçus pour limiter l'incertitude de toute grandeur pouvant avoir une influence sur la mesure, en se fondant sur l'estimation d'ingénierie du responsable et sur la propagation de l'erreur d'analyse. Dans la mesure du possible, les normes ont des limites simples pour l'influence de certaines grandeurs, de sorte qu'il n'est pas demandé à l'utilisateur d'évaluer l'incertitude de ces grandeurs. L'incertitude globale d'une norme a ensuite été confirmée par une comparaison interlaboratoires.

B.2 Définitions

On peut trouver des définitions statistiques dans trois sources: le GUM (Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure), le VIM (Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés) [2] et le NIST Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results [3]. Tous les termes de statistique utilisés dans la présente norme ne sont pas explicitement définis dans le GUM. Par exemple, les termes « incertitude-type relative » et « incertitude-type composée relative » sont utilisés dans le GUM (Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure) (5.1.6, Annexe J), mais ils ne sont pas formellement définis dans le GUM (voir [3]).

¹ Les nombres entre crochets se réfèrent aux documents de référence de l'Article B.5 de la présente annexe.

B.3 Considérations relatives au concept d'incertitude

Précédemment, les évaluations statistiques utilisaient fréquemment le coefficient de variation (COV, *coefficient of variation*), qui est le rapport entre l'écart-type et la moyenne (N.B. le COV est souvent appelé écart-type relatif). On utilisait ces évaluations pour estimer la précision des mesures et fournir l'étroitesse des essais répétés. L'incertitude-type (SU, *standard uncertainty*) dépend davantage du nombre d'essais répétés et moins de la moyenne que le COV et, en conséquence, elle fournit dans certains cas une image plus réaliste de la dispersion des données et de l'estimation de l'essai. L'exemple ci-dessous (voir les Tableaux B.1 à B.6) représente un ensemble de mesures électroniques de dérive et de tension de fluage de deux extensomètres nominalement identiques utilisant le même dispositif de conditionnement de signal et le même système d'acquisition de données. Les $n = 10$ paires de données sont prélevées de manière aléatoire sur la feuille de calcul de 32 000 cellules. Ici, l'extensomètre numéro un (E_1) est dans la position de décalage nul, tandis que l'extensomètre numéro deux (E_2) est dévié de 1 mm. Les signaux de sortie sont en volts.

Tableau B.1 – Signaux de sortie de deux extensomètres nominalement identiques

Signal de sortie [V]	
E_1	E_2
0,001 220 70	2,334 594 73
0,000 610 35	2,334 289 55
0,001 525 88	2,334 289 55
0,001 220 70	2,334 594 73
0,001 525 88	2,334 594 73
0,001 220 70	2,333 984 38
0,001 525 88	2,334 289 55
0,000 915 53	2,334 289 55
0,000 915 53	2,334 594 73
0,001 220 70	2,334 594 73

Tableau B.2 – Valeurs moyennes de deux signaux de sortie

Moyenne ($\bar{X}$) [V]	
E_1	E_2
0,001 190 19	2,334 411 62

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad [\text{V}] \quad (\text{B.1})$$

Tableau B.3 – Ecart-types expérimentaux de deux signaux de sortie

Ecart-type expérimental (s) [V]	
E_1	E_2
0,000 303 48	0,000 213 381

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \quad [\text{V}] \quad (\text{B.2})$$

Tableau B.4 – Incertitudes-types de deux signaux de sortie

Incertitude-type (u) [V]	
E_1	E_2
0,000 095 97	0,000 067 48

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad [\text{V}] \quad (\text{B.3})$$

Tableau B.5 – Coefficient de variation de deux signaux de sortie

Coefficient de variation (COV) [%]	
E_1	E_2
25,498 2	0,009 1

$$\text{COV} = \frac{s}{\bar{X}} \quad (\text{B.4})$$

L'incertitude-type est très semblable pour les déviations des deux extensomètres. Par opposition, le coefficient de variation COV diffère d'un facteur de presque 2 800 entre les deux ensembles de données. Ceci montre l'avantage d'utiliser l'incertitude-type qui est indépendante de la valeur moyenne.

B.4 Exemple d'évaluation d'incertitude pour les normes du comité d'études 90

La valeur d'une mesure observée ne coïncide habituellement pas avec la valeur vraie du mesurande. La valeur observée peut être considérée comme une estimation de la valeur vraie. L'incertitude fait partie de l'« erreur de mesure », qui est une partie intrinsèque de toute mesure. L'amplitude de l'incertitude est une mesure de la qualité métrologique des mesures et améliore également la connaissance du mode opératoire de la mesure. Le résultat de toute mesure physique est habituellement constitué de deux parties: une estimation de la valeur vraie du mesurande et l'incertitude de cette « meilleure » estimation. Dans ce contexte, le GUM (Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure) est un guide d'une documentation normalisée transparente du mode opératoire de mesure. On peut tenter de mesurer la valeur vraie en mesurant « la meilleure estimation » et en utilisant des évaluations d'incertitude pouvant être considérées de deux types: les incertitudes de Type A (mesures répétées en laboratoire exprimées généralement sous forme de distributions gaussiennes) et les incertitudes de Type B (expériences antérieures, données documentées, informations du fabricant, etc., souvent fournies sous la forme de distributions rectangulaires).

Le calcul d'incertitude utilisant le mode opératoire du GUM (Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure) est illustré dans l'exemple suivant:

- a) Dans une première étape, l'utilisateur doit déterminer un modèle de mesure mathématique sous forme de mesurande identifié en fonction de toutes les grandeurs d'entrée. Un exemple simple d'un tel modèle est donné pour l'incertitude d'une mesure de force utilisant un dynamomètre:

Force comme mesurande = W (poids de l'étalon comme prévu) + d_W (données du fabricant) + d_R (contrôles répétés de poids étalon/jour) + d_{Re} (reproductibilité des contrôles, des jours différents).

Les grandeurs d'entrée sont ici: le poids mesuré des poids étalons en utilisant différentes balances (Type A), les données du fabricant (Type B), les résultats d'essais répétés en utilisant le système électronique numérique (Type B), et la reproductibilité des valeurs finales mesurées des jours différents (Type B).

- b) Il convient que l'utilisateur identifie le type de distribution pour chaque grandeur d'entrée (par exemple, distributions gaussiennes pour les mesures de Type A et distributions rectangulaires pour les mesures de Type B).
- c) Evaluer l'incertitude-type des mesures de Type A,

$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}}$ où, s est l'écart-type expérimental et n est le nombre total de points de données mesurés.

- d) Evaluer les incertitudes-types des mesures de Type B:

$u_B = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot d_W^2 + \dots}$ où, d_W est la gamme de valeurs distribuées rectangulaires

- e) Calculer l'incertitude-type composée pour le mesurande en combinant toutes les incertitudes-types à l'aide de l'expression suivante:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

On suppose dans ce cas qu'il n'y a aucune corrélation entre les grandeurs d'entrée. Si l'équation modèle comporte des termes avec des produits ou des quotients, l'incertitude-type composée est évaluée en utilisant des dérivées partielles, et la relation devient plus complexe en raison des coefficients de sensibilité [4, 5].

- f) Facultatif – l'incertitude-type composée de l'estimation du mesurande de référence peut être multipliée par un facteur d'élargissement (par exemple, 1 pour 68 %, 2 pour 95 % ou 3 pour 99 %), pour augmenter la probabilité pour espérer que le mesurande appartienne à l'intervalle.
- g) Rapporter le résultat sous forme de l'estimation du mesurande $\pm$ l'incertitude élargie, avec l'unité de mesure et, au minimum, l'état du facteur d'élargissement utilisé pour calculer l'incertitude élargie et la probabilité de couverture estimée.

Pour faciliter le calcul et normaliser le mode opératoire, l'utilisation d'un logiciel commercial certifié approprié constitue une méthode directe allégeant la quantité de travail de routine [6, 7]. En particulier, on peut obtenir facilement les dérivées partielles indiquées avec un tel outil logiciel. D'autres références pour les lignes directrices des incertitudes de mesure sont données en [3, 8 et 9].