

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

(affiliée à l'Organisation Internationale de Normalisation — ISO)

RECOMMANDATION DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC RECOMMENDATION

Publication 468

Première édition — First edition

1974

Méthode de mesure de la résistivité des matériaux métalliques

Method of measurement of resistivity of metallic materials



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembe
Genève, Suisse

33

Révision de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CIEI est constamment revu par la Commission afin d'assurer qu'il reflète bien l'état actuel de la technique.

Les renseignements relatifs à ce travail de révision, à l'établissement des éditions révisées et aux mises à jour peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CIEI et en consultant les documents ci-dessous :

- **Bulletin de la CIEI**
Publié trimestriellement
- **Rapport d'activités de la CIEI**
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CIEI**
Publié annuellement

Terminologie utilisée dans la présente publication

Seuls sont définis ici les termes spéciaux se rapportant à la présente publication.

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la Publication 50 de la CIEI: Vocabulaire Electrotechnique International (V.E.I.), qui est établie sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini, l'index général étant publié séparément. Des détails complets sur le V.E.I. peuvent être obtenus sur demande.

Symboles graphiques et littéraux

Seuls les symboles graphiques et littéraux spéciaux sont inclus dans la présente publication.

Le recueil complet des symboles graphiques approuvés par la CIEI fait l'objet de la Publication 117 de la CIEI.

Les symboles littéraux et autres signes approuvés par la CIEI font l'objet de la Publication 27 de la CIEI.

Publication de la CIEI également sous la responsabilité du Comité d'Etudes N° 58

28 (1925) Spécification internationale d'un cuivre-typé recuit.

Revision of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information on the work of revision, the issue of revised editions and attachment sheets may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
Published quarterly
- **Report on IEC Activities**
Published yearly
- **Catalogue of IEC Publications**
Published yearly

Terminology used in this publication

Only special terms required for the purpose of this publication are defined herein.

For general terminology, readers are referred to IEC Publication 50: International Electrotechnical Vocabulary (I.E.V.), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field, the General Index being published as a separate booklet. Full details of the I.E.V. will be supplied on request.

Graphical and letter symbols

Only special graphical and letter symbols are included in this publication.

The complete series of graphical symbols approved by the IEC is given in IEC Publication 117.

Letter symbols and other signs approved by the IEC are contained in IEC Publication 27.

IEC publication also under the responsibility of Technical Committee No. 58

28 (1925) International standard of resistance for copper.

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

(affiliée à l'Organisation Internationale de Normalisation — ISO)

RECOMMANDATION DE LA CEI**INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION**

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC RECOMMENDATION**Publication 468**

Première édition — First edition

1974

Méthode de mesure de la résistivité des matériaux métalliques

Method of measurement of resistivity of metallic materials



Droits de reproduction réservés — Copyright — all rights reserved

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'autorisation écrite de l'IEC.

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 the publisher.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varemè

Genève, Suisse

Prix Fr. s. **32.50**
Prix S. Fr.

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACÉ	4
Articles	
1. Domaine d'application	6
2. Objet	6
3. Méthode	6
4. Définitions	6
4.1 Résistivité (volumique)	6
4.2 Densitérésistivité	8
4.3 Résistance linéique	8
4.4 Conductivité relative du cuivre-type recuit, en pour-cent	8
5. Unités	8
6. Méthode de référence	10
6.1 Méthode d'essais	10
6.2 Corrections de température	14
6.3 Procès-verbal	16
7. Méthode courante	18
7.1 Méthode d'essais	18
7.2 Corrections de température	18
7.3 Procès-verbal	20
ANNEXE A — Corrections de température	24
ANNEXE B — Analyse des incertitudes	26

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
Clause	
1. Scope	7
2. Object	
3. Method	7
4. Definitions	7
4.1 Volume resistivity	7
4.2 Mass resistivity	9
4.3 Resistance per unit length	9
4.4 Conductivity per cent I.A.C.S.	9
5. Units	9
6. Reference method	11
6.1 Test method	11
6.2 Temperature correction	15
6.3 Report	17
7. Routine method	19
7.1 Test method	19
7.2 Temperature correction	19
7.3 Report	21
APPENDIX A — Temperature correction	25
APPENDIX B — Analysis of uncertainties	27

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MÉTHODE DE MESURE DE LA RÉSISTIVITÉ DES MATÉRIAUX MÉTALLIQUES

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords de la CIEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CIEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CIEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CIEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PRÉFACE

La présente recommandation a été établie par le Comité d'Etudes N° 58 de la CIEI: Méthodes de mesure des propriétés électriques des matériaux métalliques.

La Publication 28 de la CIEI: Spécification internationale d'un cuivre-type recuit, définit ce cuivre-type recuit par sa résistivité, sa masse volumique et les coefficients de dilatation linéaire et de variation de la résistance avec la température, dans tous les cas à la température de 20 °C. Elle spécifie que la conductivité du cuivre industriel doit être exprimée en pour-cent de celle du cuivre-type recuit, et fixe les valeurs de masse volumique et des coefficients de température de la résistivité et de la densité de résistivité du cuivre industriel à employer pour le calcul de la résistivité à une température de référence à partir des données mesurées à une autre température. La présente recommandation donne une méthode pour exprimer la conductivité des spécimens recuits, mais ne répond pas aux besoins d'une méthode d'essais permettant d'obtenir les données nécessaires.

En 1962, le Comité d'Etudes N° 26: Cuivre et alliages de cuivre, de l'Organisation Internationale de Normalisation, a reconnu le besoin d'un accord international sur une recommandation d'une méthode de mesure de la résistivité ou de la conductivité des matériaux de conductivité élevée et a proposé à la Commission Electrotechnique Internationale (CIEI) d'entreprendre les travaux relatifs à cette recommandation. La CIEI a, par la suite, constitué le Comité d'Etudes N° 58. Les travaux relatifs à cette recommandation furent entrepris en 1967.

Des projets ont été discutés lors des réunions tenues à Londres en 1958 et à Washington en 1970. A la suite de ces réunions, un projet final, document 58(Bureau Central)3, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en avril 1971. Des modifications, document 58(Bureau Central)5, ont été soumises à l'approbation des Comités nationaux suivant la Procédure des Deux Mois en août 1972.

Les pays suivants se sont prononcés explicitement en faveur de la publication:

Afrique du Sud	Italie
(République d')	Japon
Allemagne	Pays-Bas
Australie	Portugal
Canada	Royaume-Uni
Danemark	Turquie
Etats-Unis d'Amérique	Union des Républiques
France	Socialistes Soviétiques

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

METHOD OF MEASUREMENT OF RESISTIVITY OF METALLIC MATERIALS

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should accept the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendations and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This recommendation has been prepared by IEC Technical Committee No. 58, Methods of Measurement of Electrical Properties of Metallic Materials.

IEC Publication 28, International Standard of Resistance for Copper, defines this copper standard (I.A.C.S.) in terms of its volume resistivity, density and temperature coefficients of linear expansion and resistance, all at 20 °C. It specifies that the conductivity of commercial copper shall be expressed as a percentage of that of the I.A.C.S., and adopts values for the density and temperature coefficients of volume and mass resistivity of commercial copper to be used in calculating the resistivity at a reference temperature from data measured at some other temperature. This recommendation provides a way to express and report the conductivity of real specimens, but does not meet the need for a test method whereby the necessary data may be obtained.

In 1962, Technical Committee No. 26, Copper and Copper Alloys, of the International Organization for Standardization, recognized the need for international agreement on a recommendation for a test method for the measurement of the resistivity or conductivity of highly conducting materials, and suggested to the International Electrotechnical Commission (IEC) that work on such a recommendation be started. Subsequently, the IEC established Technical Committee No. 58. Work on this recommendation was started in 1967.

Drafts were discussed at the meetings held in London in 1968 and in Washington in 1970. As a result of these meetings, a final draft, document 58(Central Office)3, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in April 1971. Amendments, document 58(Central Office)5, were submitted to the National Committees for approval under the Two Months' Procedure in August 1972.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia
Canada
Denmark
France
Germany
Italy
Japan
Netherlands

Portugal
South Africa
(Republic of)
Turkey
Union of Soviet
Socialist Republics
United Kingdom
United States of America

MÉTHODE DE MESURE DE LA RÉSISTIVITÉ DES MATÉRIAUX MÉTALLIQUES

1. Domaine d'application

La présente recommandation donne des méthodes de détermination de la résistivité et de la densité-résistivité des matériaux métalliques massifs (non câblés) utilisés dans les conducteurs et dans les résistances, et de la résistance linéique des conducteurs massifs (de section uniforme) en matériaux métalliques. Elle donne des spécifications pour les méthodes de référence et les méthodes courantes de mesure de la résistivité des matériaux métalliques. Elle est destinée à satisfaire le besoin de telles méthodes non seulement pour le cuivre, mais également pour l'aluminium et tous les autres métaux et alliages qui peuvent être utilisés comme conducteurs.

2. Objet

Fournir une méthode générale de mesure de la résistivité des matériaux massifs (non câblés) de résistivité comprise entre $0,01 \mu\Omega\cdot\text{m}$ et $2,0 \mu\Omega\cdot\text{m}$ (6-1 200 ohm-circular mil/R), dans des conditions normales.

3. Méthode

La recommandation prévoit deux méthodes: la méthode de référence et la méthode courante. Avec la méthode de référence, l'incertitude totale admise est $\pm 0,25\%$ pour la résistivité (volumique) et $\pm 0,20\%$ pour la densité-résistivité et pour la résistance linéique. Avec la méthode courante, l'incertitude (globale) admise est $\pm 0,65\%$ pour la résistivité (volumique), $\pm 0,45\%$ pour la densité-résistivité et $\pm 0,40\%$ pour la résistance linéique. Chacune des déterminations des grandeurs physiques requises pour le calcul doit être effectuée avec précision et exactitude de sorte que l'incertitude globale, calculée selon la description de l'annexe B, ne dépasse pas les limites susmentionnées. Cela est possible si chaque détermination est effectuée avec précision et exactitude dans les limites d'incertitude indiquées au tableau I. Pour la méthode de référence et la méthode courante, la température de référence est 20°C .

4. Définitions

4.1 Résistivité (volumique)

La résistivité (volumique) est la résistance d'un conducteur de longueur et de section égales à l'unité. Sa valeur à la température de référence t_0 se calcule par la formule suivante:

$$\rho(t_0) = \frac{A(t_0)}{L(t_0)} \cdot R(t_0)$$

où:

$\rho(t_0)$ = résistivité (volumique) à la température de référence t_0

$R(t_0)$ = résistance entre les extrémités de la longueur-étalon du spécimen à la température de référence t_0

$A(t_0)$ = section du spécimen à la température de référence t_0

$L(t_0)$ = longueur-étalon du spécimen à la température de référence t_0

METHOD OF MEASUREMENT OF RESISTIVITY OF METALLIC MATERIALS

1. Scope

This recommendation gives procedures for determining the electrical volume resistivity and mass resistivity of solid (non-stranded) metallic conductor and resistor materials, and the resistance per unit length of solid conductors (of uniform cross-sectional area) of metallic materials. It sets out both reference and routine methods of measuring the resistivity of metallic materials. It is intended to cover the need for such methods not only for copper, but also for aluminium and any other metals and alloys that may be used for conductor purposes.

2. Object

To provide a general method of measuring resistivity of solid (non-stranded) materials with resistivities between $0.01 \mu\Omega\cdot m$ and $2.0 \mu\Omega\cdot m$ (6-1200 ohm-circular mil/ft), under standard conditions.

3. Method

This recommendation provides two methods: reference and routine. For the reference method, the allowed over-all uncertainty is $\pm 0.25\%$ for volume resistivity and $\pm 0.20\%$ for mass resistivity and for resistance per unit length. For the routine method, the allowed over-all uncertainty is $\pm 0.65\%$ for volume resistivity, $\pm 0.45\%$ for mass resistivity and $\pm 0.40\%$ for resistance per unit length. Each of the determinations of the physical quantities required for the calculation shall be made with precision and accuracy such that the over-all uncertainty, calculated as described in Appendix B, does not exceed the limits stated above. This is achieved if the individual determinations are made with precision and accuracy within the limits of uncertainty given in Table I. For both the reference and routine methods, the reference temperature is $20^\circ C$.

4. Definitions

4.1 Volume resistivity

The volume resistivity is defined as the resistance of a conductor of unit length and unit cross-sectional area. Its value at a reference temperature t_0 is calculated from the following formula:

$$\rho(t_0) = \frac{A(t_0)}{L(t_0)} \cdot R(t_0)$$

where:

$\rho(t_0)$ = volume resistivity at the reference temperature t_0

$R(t_0)$ = resistance between the ends of the gauge length of the specimen at the reference temperature t_0

$A(t_0)$ = cross-sectional area of the specimen at the reference temperature t_0

$L(t_0)$ = gauge length of the specimen at the reference temperature t_0

La densité de résistance est la résistance d'un conducteur de longueur et de masse égales à l'unité. Sa valeur à la température de référence t_0 se calcule par la formule suivante:

$$\delta(t_0) = \frac{m}{L_2(t_0)} \cdot \frac{R(t_0)}{L_1(t_0)}$$

où:

$\delta(t_0)$ = densité de résistance à la température de référence t_0

$R(t_0)$ = résistance entre les extrémités de la longueur-étalon du spécimen à la température de référence t_0

m = masse du spécimen

$L_1(t_0)$ = longueur-étalon du spécimen à la température de référence t_0

$L_2(t_0)$ = longueur totale du spécimen à la température de référence t_0

4.3 Résistance linéique

La résistance linéique, $R_L(t_0)$, à la température de référence se calcule par la formule:

$$R_L(t_0) = \frac{R(t_0)}{L_1(t_0)}$$

où:

$R(t_0)$ = résistance entre les extrémités de la longueur-étalon du spécimen à la température de référence t_0

$L_1(t_0)$ = longueur-étalon du spécimen à la température de référence t_0

4.4 Conductivité relative du cuivre-type recuit, en pour-cent

Les valeurs de la résistance et de la densité de résistance pour le cuivre-type recuit conforme à la Spécification Internationale sont définies dans la Publication 28 de la CEI (1925): Spécification internationale d'un cuivre-type recuit, et sont reproduites dans le tableau II. La Publication 28 définit la conductivité du *cuivre recuit industriel*, à la température de 20 °C, en pour-cent de celle du *cuivre-type recuit*, la conductivité étant l'inverse de la résistance. On admet que la masse volumique du cuivre recuit industriel est identique à celle du cuivre-type recuit et, par conséquent, il importe peu que les conductivités se rapportent à la masse ou au volume. Depuis 1925, toutefois, il est devenu d'usage courant de se référer à la conductivité d'autres métaux en fonction du cuivre-type recuit et, étant donné que les masses volumiques peuvent ne pas être identiques à celles du cuivre, il est nécessaire en de tels cas de préciser si la conductivité se rapporte au volume ou à la masse. La conductivité relative du cuivre-type recuit (en volume) ou la conductivité relative du cuivre-type recuit (en masse) est alors définie comme égale à 100 fois le rapport de la valeur définie (résistance ou densité de résistance) dans la Spécification Internationale pour le cuivre-type recuit à la résistance ou densité de résistance du spécimen d'essai dans les mêmes unités.

5. Unités

Dans toute la présente recommandation, on utilise le Système International d'unités (S.I.). Etant donné qu'il est encore courant dans l'industrie de se référer à des unités rattachées au système « foot-pound » ou au système « centimètre-gramme-seconde » (cgs), ces dernières unités sont données entre parenthèses ou en plus, s'il y a lieu.

L'unité de résistance est $\Omega \cdot m^2/m = \Omega \cdot m$. Pour des raisons de commodité, on emploie d'habitude un sous-multiple de l'unité principale, c'est-à-dire $\Omega \cdot mm^2/m$, qui correspond à $\mu\Omega \cdot m$, représentant la résistance, en ohms, d'un conducteur de 1 mm^2 de section et de 1 m de longueur (dans le système « foot-pound », les unités couramment utilisées sont l'ohm-circular mil/ft ou l'ohm-square mil/ft, représentant la résistance, en ohms, d'un conducteur de 1 circular mil ou de 1 square mil de section et de 1 ft de longueur).

L'unité de densité de résistance est $\Omega \cdot kg/m^3$. Pour des raisons de commodité, on emploie d'habitude un sous-multiple de cette unité, c'est-à-dire $\Omega \cdot g/m^3$ (dans le système « foot-pound », l'unité couramment utilisée est $\Omega \cdot lb/mile^3$).

L'unité de résistance linéique est Ω/m (dans le système « foot-pound », $\Omega/mile$ ou parfois Ω/ft).

4.2 Mass resistivity

The mass resistivity is defined as the resistance of a conductor of unit length and unit mass. Its value at a reference temperature t_0 is calculated from the following formula:

$$\delta(t_0) = \frac{m}{\ell_2(t_0)} \cdot \frac{R(t_0)}{\ell_1(t_0)}$$

where:

$\delta(t_0)$ = mass resistivity at the reference temperature t_0

$R(t_0)$ = resistance between the ends of the gauge length of the specimen at the reference temperature t_0

m = mass of the specimen

$\ell_1(t_0)$ = gauge length of the specimen at the reference temperature t_0

$\ell_2(t_0)$ = total length of the specimen at the reference temperature t_0

4.3 Resistance per unit length

The resistance per unit length, $R_L(t_0)$, at the reference temperature is calculated from the formula:

$$R_L(t_0) = \frac{R(t_0)}{\ell_1(t_0)}$$

where:

$R(t_0)$ = resistance between the ends of the gauge length of the specimen at the reference temperature t_0

$\ell_1(t_0)$ = gauge length of the specimen at the reference temperature t_0

4.4 Conductivity per cent I.A.C.S.

The values of volume and mass resistivity for the International Annealed Copper Standards (I.A.C.S.) are defined in IEC Publication 28 (1925), International Standard of Resistance for Copper, and are reproduced in Table II. Publication 28 defines the conductivity of *commercial annealed copper* as a percentage, at 20°C, of that of standard annealed copper, conductivity being the reciprocal of resistivity. It is assumed that the density of commercial annealed copper is the same as that of standard annealed copper, and hence it is immaterial whether the conductivities are mass or volume values. In the years since 1925, however, it has become common practice to refer to the conductivity of other metals in terms of the I.A.C.S. and, since the densities may not be the same as that of copper, it is necessary in these cases to specify the basis of the conductivity, whether volume or mass. Conductivity per cent I.A.C.S. (volume) or conductivity per cent I.A.C.S. (mass) is then defined as 100 times the ratio of defined resistivity (either volume or mass) of the International Annealed Copper Standard to the resistivity of the test specimen in the same units.

5. Units

The International System (S.I.) of units is used throughout this recommendation. Since common commercial practice still makes use of units related to the "foot-pound" system or to the "centimetre-gram-second" (cgs) system, these are given in parentheses or additionally where appropriate.

The unit of volume resistivity is $\Omega \cdot \text{m}^3/\text{m} = \Omega \cdot \text{m}$. For practical reasons, a submultiple unit is commonly used, viz. $\Omega \cdot \text{mm}^3/\text{m}$, which corresponds to $\mu\Omega \cdot \text{m}$, representing the resistance in ohms of a conductor of cross-sectional area 1 mm^2 and length 1 m (in the "foot-pound" system, commonly used units are ohm-circular mil/ft or ohm-square mil/ft, representing the resistance, in ohms, of a conductor of cross-sectional area 1 circular mil or 1 square mil, and length 1 ft).

The unit of mass resistivity is $\Omega \cdot \text{kg}/\text{m}^2$. For practical reasons, a submultiple of this unit is commonly used, viz. $\Omega \cdot \text{g}/\text{m}^2$ (in the "foot-pound" system, a commonly-used unit is $\Omega \cdot \text{lb}/\text{mils}^2$).

The unit of resistance per unit length is Ω/m (in the "foot-pound" system, Ω/mile or sometimes Ω/ft).

6. Méthode de référence

6.1 Méthode d'essais

6.1.1 Appareil de mesure de la résistance

On applique une méthode à quatre bornes pour des spécimens d'une résistance de 10 Ω au plus, tandis que, pour des spécimens d'une résistance supérieure à 10 Ω , on peut appliquer une méthode faisant usage d'un circuit à deux bornes.

6.1.2 Spécimen d'essai

6.1.2.1 Forme

Le spécimen d'essai peut être d'une forme quelconque avec des côtés lisses et rectilignes et de section sensiblement uniforme, tel que fil, ruban, tige, barre ou tube. Chaque fois que cela est possible, il doit avoir la section totale du matériau qu'il représente, de sorte que l'uniformité de la section puisse être déterminée avec précision. Par l'expression « sensiblement uniforme » employée ci-dessus, on entend que l'écart type relatif d'au moins cinq mesures effectuées à des intervalles égaux sur la longueur-étalon ne dépasse pas 1 %.

Dans les cas où il est nécessaire de déterminer la masse linéique d'un spécimen, on doit veiller à ce que les extrémités du spécimen soient plates, perpendiculaires à l'axe longitudinal, et dépourvues d'ébarbures, de bavures et d'arêtes arrondies.

Si le spécimen d'essai est découpé dans la matière en vrac, on doit veiller à ce que les propriétés du matériau ne soient pas notablement altérées lors de sa préparation. Ainsi, la déformation plastique peut écrouir un matériau et tendre à accroître la résistivité, tandis que l'échauffement a tendance à recuire le matériau en entraînant une diminution de la résistivité.

6.1.2.2 Caractéristiques

Le spécimen d'essai doit présenter les caractéristiques suivantes:

1. Une résistance d'au moins 0,000 01 Ω (10 $\mu\Omega$) dans la longueur-étalon entre les prises de potentiel.
2. Une longueur-étalon d'au moins 0,3 m ou 1 ft.
3. Les autres dimensions doivent être compatibles avec les limites de l'appareil.
4. Aucune fissure, ni défaut de surface visibles à l'œil nu normal pour les spécimens dont la plus grande dimension transversale est de 1 mm (0,04 in) ou plus, ou avec un grossissement de 20 fois pour les spécimens plus petits. La surface doit être pratiquement dépourvue de toute trace de calamine, saleté et graisse, notamment aux endroits où on applique les prises de courant et de potentiel. Si un nettoyage est nécessaire, il doit être fait avant la mesure des dimensions du spécimen.
5. Ni jonctions, ni épissures.

6.1.3 Manie opératoire

6.1.3.1 Résistance

Les mesures de résistance doivent être effectuées dans un appareil pour lequel l'incertitude globale est de l'ordre de + 0,15 %, y compris celle résultant de l'étalonnage de l'étalon de référence, celle résultant de la comparaison du spécimen d'essai avec cet étalon, celle résultant des tensions de contact et des f.é.m. des thermocouples et celle résultant de l'échauffement du spécimen par le courant de mesure. Si on utilise des prises de potentiel, elles doivent être constituées de couteaux bien tranchants, parallèles entre eux et perpendiculaires à l'axe longitudinal du spécimen, ou de pointes d'aiguilles aiguës. La longueur-étalon à la température de mesure, $L(t)$, entre les prises de potentiel doit être déterminée à $\pm 0,05$ % près. La distance entre chaque prise de potentiel et la prise de courant correspondante ne doit pas être inférieure à 1,5 fois la longueur périphérique du spécimen. Lorsqu'on emploie un pont double de Kelvin (Thomson), la résistance de la traverse (entre l'étalon de référence et le spécimen d'essai) doit être nettement inférieure à celle de l'étalon de référence ou du spécimen d'essai à moins que l'on utilise une méthode de compensation par conducteur, appropriée, ou qu'il ne soit établi que les rapports entre bobine et conducteur sont suffisamment équilibrés pour que la variation de la résistance de la traverse ne diminue pas la précision de pont au-dessous des limites spécifiées.

6. Reference method

6.1 Test method

6.1.1 Apparatus for resistance measurement

A four-terminal method shall be used with specimens of resistance of 10 Ω or less, while with specimens of resistance greater than 10 Ω , a two-terminal method may be used.

6.1.2 Test specimen

6.1.2.1 Form

The test specimen may take the form of any shape possessing smooth, straight sides and of substantially uniform cross-sectional area, such as wire, strip, rod, bar or tube. Wherever possible, it shall be the full cross-section of the material it represents, such that the uniformity of the cross-section can be accurately determined. "Substantially uniform", as used above, means that the relative standard deviation of five or more measurements made at equal intervals along the gauge length would not exceed 1%.

In cases where it is required to determine the mass per unit length of a specimen, care shall be taken that the ends of the specimen are flat, perpendicular to the longitudinal axis, and free from burrs, flashes and radiused edges.

If the test specimen is cut from material in bulk, care shall be taken that the properties of the material are not appreciably altered in preparing it. Thus, plastic deformation may work-harden a material and tend to raise the resistivity, while heating tends to anneal the material with a consequent reduction in resistivity.

6.1.2.2 Characteristics

The test specimen shall have the following characteristics:

1. A resistance of not less than 0.000 01 Ω (10 $\mu\Omega$) in the gauge length between potential contacts.
2. A gauge length of at least 0.3 m or 1 ft.
3. Other dimensions suitable to the limitations of the apparatus.
4. No surface cracks or defects visible to the unaided normal eye for specimens whose largest transverse dimension is 1 mm (0.04 in) or more, or under 20 times magnification for smaller specimens. The surface shall be substantially free from scale, dirt and grease, particularly where current and potential contacts are to be made. Cleaning, if necessary, should be done before measuring the dimensions of the specimen.
5. No joints or splices.

6.1.3 Procedure

6.1.3.1 Resistance

Resistance measurements shall be made in an apparatus for which the over-all uncertainty is within $\pm 0.15\%$ including that from the calibration of the reference standard, that from the comparison of the test specimen to this standard, that from contact potentials and thermal e.m.f.'s and that from heating of the specimen by the measuring current. Where potential contacts are used, they should consist of substantially sharp knife edges, parallel to each other and perpendicular to the long axis of the specimen, or of sharp needle points. The gauge length at the measurement temperature, $l_g(t)$, between potential contacts shall be determined to an accuracy of $\pm 0.05\%$. The distance from each potential contact to the corresponding current contact shall be not less than 1.5 times the cross-sectional perimeter of the specimen. When a form of Kelvin (Thomson) double bridge is used, the yoke resistance (between reference standard and test specimen) shall be appreciably smaller than that of either the reference standard or the test specimen, unless a suitable lead compensation method is used, or it is known that the coil and lead ratios are sufficiently balanced so that variation in yoke resistance will not decrease the bridge accuracy below stated requirements.

L'incertitude due aux tensions de contact et aux forces électromotrices des thermocouples peut être réduite dans les mesures avec pont à courant continu si on fait la moyenne des lectures obtenues avec le courant circulant dans les deux sens, et en prenant des points d'équilibrage tels qu'aucune impulsion ne soit observée dans le détecteur lorsque la manette de courant est fermée. Il est souhaitable, en tout cas, d'effectuer un certain nombre de mesures (par exemple 5) et de prendre la valeur moyenne de ces mesures comme valeur mesurée de la résistance.

Pour vérifier si la chaleur produite par le courant de mesure provoque un échauffement excessif, on doit effectuer une série de mesures supplémentaires, en augmentant de 40 % le courant de mesure. Si la moyenne de ces mesures supplémentaires dépasse de plus de 0,06 % celle des mesures effectuées avec le courant plus faible, l'échauffement doit être considéré comme excessif. On doit effectuer de nouvelles mesures avec un courant suffisamment faible, de sorte qu'une augmentation de 40 % ne provoque pas d'échauffement excessif.

On doit mesurer les températures du spécimen et de l'étalon et les contrôler à un degré d'incertitude comme suit; dans chaque cas, le produit de cette incertitude par le coefficient de température de la résistance ne doit pas dépasser 0,04 %. On doit utiliser, si nécessaire, des bains liquides pour garantir l'homogénéité et le contrôle de la température. On doit laisser s'écouler un temps suffisant entre la détermination de la température et la mesure pour éviter toute dérive en dehors des limites admissibles d'incertitude, décrites ci-dessus. La température du spécimen et de l'étalon de référence doit être comprise entre 15 °C et 25 °C.

6.1.3.2 Section

On doit déterminer la section à une température comprise entre 15 °C et 25 °C avec une incertitude ne dépassant pas $\pm 0,15\%$. Si le spécimen a une section de forme simple permettant de calculer facilement la section à partir des dimensions linéaires transversales, la section peut être obtenue en tant que valeur moyenne calculée à partir d'au moins cinq séries de mesures effectuées à des intervalles à peu près égaux sur la longueur-étalon du spécimen. L'écart type de la valeur moyenne, rapporté à la valeur moyenne même, ne doit pas dépasser 0,15 %.

Si le spécimen n'a pas une section de forme simple, ou si l'incertitude sur la section moyenne déterminée à partir de mesures directes des dimensions transversales dépasse 0,15 %, la section doit être déterminée à partir de la masse, de la longueur totale et de la masse volumique du spécimen d'essai, par la formule:

$$A(t) = \frac{m}{L(t) d_s(t)}$$

où m est la masse, $L(t)$ la longueur totale à la température t , et $d_s(t)$ la masse volumique du spécimen à la température t . La masse et la longueur totale doivent être déterminées à $\pm 0,05\%$ près, et la masse volumique à $\pm 0,12\%$ près.

6.1.3.3 Masse

On effectue, si nécessaire, une correction de la poussée de l'air de façon à réduire l'erreur d'une pesée dans l'air au-dessous de la limite ci-dessus, par la formule:

$$m = \frac{m_A d_s (d_w - d_A)}{d_w (d_s - d_A)}$$

où m_A est la masse apparente déterminée par pesée, et d_s , d_w et d_A respectivement les masses volumiques du spécimen, des poids et de l'air (1,2 kg/m³). L'incertitude sur toutes les déterminations de la masse ne doit pas être supérieure à $\pm 0,05\%$.

6.1.3.4 Masse volumique

Si la masse volumique du spécimen n'est pas connue avec une incertitude de 0,12 % ou moins, elle doit être déterminée soit à partir du spécimen, soit à partir d'un échantillon du même matériau connu pour avoir une masse volumique égale à celle du spécimen, dans les limites d'incertitude spécifiées. Dans chaque cas, on doit peser l'échantillon dans l'air et dans un liquide de masse volumique connue à la température de mesure, qui doit être choisie de façon à réduire au minimum les erreurs dues aux courants de convection. On calcule la masse volumique de l'échantillon par la formule:

$$d_s = \frac{m_A d_L(t) - m_L(t) d_A}{m_A - m_L(t)}$$

où m_A et $m_L(t)$ sont les masses apparentes déterminées dans l'air et dans le liquide, et d_A et $d_L(t)$ respectivement les masses volumiques de l'air (1,2 kg/m³) et du liquide, à la température t .

Uncertainty due to contact potentials and thermal electromotive force may be reduced in d.c. bridge measurements by averaging readings taken with the current in opposite directions and by taking balance points to be such that no impulse is observed in the detector when the current key is closed. It is desirable, at any rate, to make a number of repeat measurements (e.g. 5) and to take the mean value of these for the measured resistance.

To test whether heat generated by the measuring current causes an excessive temperature rise, an additional set of measurements shall be made with the measuring current increased by 40%. If the mean of these additional measurements exceeds that of those made with the lower current by more than 0.06%, the temperature rise shall be considered to be excessive. New measurements shall be made at a current sufficiently low, such that an increase by 40% does not cause an excessive rise.

The temperatures of the specimen and the standard shall be measured and controlled to within an uncertainty determined as follows: the product of this uncertainty and the temperature coefficient of resistance in each case shall not exceed 0.04%. If necessary, liquid baths shall be used to ensure homogeneity and control of the temperature. Sufficient time shall be allowed between establishing the temperature and making the measurement to ensure that the temperature during measurement does not drift outside the limits of uncertainty just described. The temperatures of the specimen and reference standard shall both lie within the range 15 °C to 25 °C.

6.1.3.2 Cross-sectional area

The cross-sectional area shall be determined at a temperature within the range 15 °C to 25 °C with an uncertainty of not more than $\pm 0.15\%$. If the specimen has a simple cross-section such that the area may reasonably be calculated from the linear cross-sectional dimensions, then the cross-sectional area may be obtained as the mean value calculated from at least five sets of measurements made at approximately equal intervals along the gauge length of the specimen. The standard deviation of the mean value, relative to the mean value itself, shall not exceed 0.15%.

In case the specimen does not have a simple cross-section, or if the uncertainty in the mean cross-sectional area as determined from direct measurements of cross-sectional dimensions exceeds 0.15%, then the cross-sectional area shall be determined from the mass, total length and density of the test specimen, according to the formula:

$$A(t) = \frac{m}{L(t) \rho(t)}$$

where m is the mass, $L(t)$ is the total length at temperature t , and $\rho(t)$ the density of the specimen at temperature t . The mass and total length shall be determined to within an uncertainty of $\pm 0.05\%$, and the density to within $\pm 0.12\%$.

6.1.3.3 Mass

A correction for the buoyancy of the air shall be made whenever necessary to reduce the error of a weighing in air to below the above limit, according to the formula:

$$m = \frac{m_A d_s (d_w - d_A)}{d_w (d_s - d_A)}$$

where m_A is the apparent mass as determined by the weighing, and d_s , d_w and d_A are the densities of the specimen, the weights and the air (1.2 kg/m³) respectively. The uncertainty in all mass determinations shall be not greater than $\pm 0.05\%$.

6.1.3.4 Density

When the density of the specimen is not known with an uncertainty of 0.12% or less, it shall be determined either from the specimen or from a sample of the same material known to have a density equal to that of the specimen, to within the specified uncertainty. In either case, the sample shall be weighed in air and in a liquid of density known at the measurement temperature, which shall be chosen to minimize errors due to convection currents. The sample density shall be calculated with the formula:

$$d_s = \frac{m_A d_L(t) - m_L(t) d_A}{m_A - m_L(t)}$$

where m_A and $m_L(t)$ are the apparent masses as determined in air and liquid, and d_A and $d_L(t)$ are the densities of air (1.2 kg/m³) and liquid, respectively, at temperature t .

Lorsqu'on applique cette méthode pour déterminer la masse volumique, l'incertitude sur la section est fonction de l'incertitude sur m_L multipliée par (d_L/d_L) , et sur m_L multipliée par $(d_L - d_L)/d_L$, où d_L est la masse volumique du spécimen et d_L celle du liquide. Par conséquent, les incertitudes admissibles sont spécifiées en pourcentage des inverses de ces grandeurs.

La masse volumique du liquide doit être connue à $\pm 0,08\%$ près, et l'uniformité et le contrôle de la température du liquide doivent garantir que cette limite n'est pas dépassée. Le fil maintenant l'échantillon de masse volumique en suspension dans le liquide doit être aussi mince que possible, et un prolongement de ce fil doit pouvoir être immergé dans le même liquide pendant la pesée dans l'air pour éliminer les effets de la tension superficielle. Sinon, si le fil a un diamètre supérieur à 0,05 mm, on doit effectuer deux pesées avec des fils dont les diamètres sont dans le rapport de 1 à 2, et leur différence ne doit pas dépasser 0,01 $d_L/(d_L - d_L)\%$ de la masse apparente du spécimen dans le liquide. Si on utilise de l'eau comme liquide, on doit ajouter au plus 0,03 % par poids d'un agent de mouillage approprié, et on doit veiller à éliminer rigoureusement toutes les bulles d'air de la surface du spécimen. Les mesures de la masse dans l'air s'effectuent avec une incertitude ne dépassant pas $\pm 0,04 (d_L/d_L)\%$, et dans le liquide avec une incertitude ne dépassant pas $\pm 0,08 d_L/(d_L - d_L)\%$.

6.2 Corrections de température

Lorsque les valeurs de la résistance électrique, de la résistance linéique ou de la résistivité à une température donnée doivent être déduites de mesures effectuées à une autre température, il convient de tenir compte du fait que c'est non seulement la résistance mais également les dimensions linéaires qui varient en fonction de la température. En règle générale, les valeurs mesurées à une température de laboratoire, t , doivent être ramenées à une température de référence, t_0 ; dans la présente recommandation, cette température est de 20 °C. Dans les formules des paragraphes 6.2.1 à 6.2.4 ci-dessous, le produit de la différence de température $(t - t_0)$ par l'incertitude sur le coefficient de température ne doit pas dépasser 0,04 %.

6.2.1 Résistance

En admettant que la résistance d'un spécimen varie linéairement avec la température, on a

$$R(t_0) = \frac{R(t)}{1 + [\alpha_R(t_0)] \cdot (t - t_0)}$$

où:

$R(t)$ = résistance du spécimen à la température t , mesurée entre les bornes solidement fixées au spécimen

$R(t_0)$ = résistance du spécimen à la température de référence t_0 , mesurée entre ces mêmes bornes

$\alpha_R(t_0)$ = coefficient de température de la résistance à la température de référence t_0

6.2.2 Résistance linéique

Si la résistance $R(t)$ et la longueur-étalon $L(t)$ d'un spécimen sont toutes deux mesurées à la température t , la résistance linéique à la température de référence t_0 est déterminée avec suffisamment de précision par la formule:

$$R_L(t_0) = \frac{R(t)}{1 + [\alpha_R(t_0) + \gamma] \cdot (t - t_0)}$$

où:

$R_L(t)$ = résistance linéique du spécimen à la température t , et

γ = coefficient de température de dilatation linéaire

6.2.3 Résistivité (volumique)

Si la résistance $R(t)$, la longueur-étalon $L(t)$, et la section $A(t)$ d'un spécimen sont toutes trois mesurées à la même température t , la résistivité (volumique) à la température de référence t_0 est définie avec suffisamment de précision par la formule:

$$\rho(t_0) = \frac{\rho(t)}{1 + [\alpha_R(t) + \gamma] \cdot (t - t_0)}$$

où:

$\rho(t)$ = résistivité (volumique) du spécimen à la température t .

When this method of determining the density is used, the uncertainty introduced into the cross-sectional area depends upon the uncertainty in m_A multiplied by (d_s/d_L) , and in ρ_L multiplied by $(d_s - d_L)/d_L$, where d_s is the density of the specimen and d_L that of the liquid. Therefore, the allowable uncertainties are specified as percentages of the reciprocals of these quantities.

The density of the liquid shall be known to within an uncertainty of $\pm 0.03\%$, and the uniformity and control of the liquid temperature shall be such as to ensure that this limit is not exceeded. The wire suspending the density sample in the liquid shall be as thin as possible, and an extension of the wire shall be allowed to dip into the same liquid while weighing in air to eliminate surface tension effects. Otherwise, if the wire exceeds 0.05 mm in diameter, two weighings shall be made with wire diameters differing by a factor of 2, and their difference shall not exceed $0.01 d_L/(d_s - d_L)\%$ of the apparent mass of the specimen in the liquid. Where water is used as the liquid, not more than 0.03% by weight of a suitable wetting agent should be added, and care exercised to remove substantially all air bubbles from the surface of the specimen before weighing. Measurements of mass in air shall be made with an uncertainty not greater than $\pm 0.04 (d_L/d_s)\%$, and in liquid with an uncertainty not greater than $\pm 0.08 d_L/(d_s - d_L)\%$.

6.2 Temperature correction

When values of electrical resistance, resistance per unit length, or resistivity at one temperature have to be deduced from measurements made at some other temperature, due regard should be given to the fact that not only resistance, but linear dimensions, change with temperature. Usually, values measured at laboratory temperature t shall be converted to the reference temperature t_0 , in this recommendation specified to be 20 °C. In the formulae in Sub-clauses 6.2.1 to 6.2.4 below, the product of the temperature difference $(t - t_0)$ with the uncertainty in the temperature coefficient shall not exceed 0.04%.

6.2.1 Resistance

Assuming that the resistance of a specimen varies linearly with temperature, then

$$R(t_0) = \frac{R(t)}{1 + [\alpha_R(t_0)] \cdot (t - t_0)}$$

where:

- $R(t)$ = resistance of the specimen at temperature t , measured between terminals rigidly fixed to it
- $R(t_0)$ = resistance of the specimen at the reference temperature t_0 , measured between the same terminals
- $\alpha_R(t_0)$ = temperature coefficient of resistance at the reference temperature t_0

6.2.2 Resistance per unit length

If the resistance $R(t)$ and the gauge length $L(t)$ of a specimen are both measured at temperature t , the resistance per unit length at the reference temperature t_0 is with sufficient accuracy:

$$R_p(t_0) = \frac{R_p(t)}{1 + [\alpha_R(t_0) + \gamma] \cdot (t - t_0)}$$

where:

- $R_p(t)$ = resistance per unit length of the specimen at the temperature t , and
- γ = temperature coefficient of linear expansion

6.2.3 Volume resistivity

If the resistance $R(t)$, gauge length $L(t)$, and cross-sectional area $A(t)$ of a specimen are all measured at the same temperature t , the volume resistivity at the reference temperature t_0 is with sufficient accuracy:

$$\rho(t_0) = \frac{\rho(t)}{1 + [\alpha_R(t_0) + \gamma] \cdot (t - t_0)}$$

where:

- $\rho(t)$ = volume resistivity of the specimen at temperature t

6.2.4 Densité de résistivité

Si la résistance $R(t)$, la longueur étalon $\ell_1(t)$, la longueur totale $\ell_2(t)$ et la masse d'un spécimen sont toutes mesurées à la température t , la densité de résistivité à la température de référence t_0 est définie avec suffisamment de précision par la formule:

$$\delta(t_0) = \frac{\delta(t)}{1 - [\alpha_R(t_0) \cdot 2\gamma] \cdot (t - t_0)}$$

où:

$\delta(t)$ — densité de résistivité du spécimen à la température t

6.2.5 Dimensions linéaires et section

Si la mesure de la longueur totale du spécimen et de la section sont effectuées à une température t' , différente de la température t à laquelle sont mesurées la résistance et la longueur-étalon, il peut être nécessaire de ramener ces dimensions, de t' à t . Les formules correspondantes sont:

$$\ell_2(t) = \ell_2(t') [1 - \gamma \cdot (t - t')]$$

$$A(t) = A(t') [1 + 2\gamma \cdot (t - t')]$$

6.2.6 Observations générales

Pour la plupart des matériaux, le coefficient de température de dilatation linéaire, γ , est une grandeur bien inférieure au coefficient de température de la résistance, $\alpha_R(t_0)$. Pour de faibles valeurs de la différence de température $(t - t_0)$, il peut être inutile, dans ces cas-là, d'introduire γ dans les formules ci-dessus.

6.3 Procès-verbal

a) Le procès-verbal doit comprendre les indications suivantes:

1. Identification du spécimen d'essai.
2. Type de matériau.
3. Longueur-étalon moyenne du spécimen, nombre de mesures et écart type sur cette longueur à la température d'essai.
4. Section moyenne du spécimen, nombre de mesures et écart type sur cette section à la température d'essai.
5. Méthode appliquée pour mesurer la résistance, c'est-à-dire méthode de référence ou méthode courante, conformément à cette recommandation.
6. Température d'essai.
7. Résistance moyenne du spécimen, nombre de mesures et écart type sur cette résistance à la température d'essai.
8. Valeur calculée de la résistivité (volumique) ou de la résistance linéique, à la température de 20 °C.
9. Valeurs des coefficients de température utilisés pour effectuer les corrections de température de la résistance linéique, la longueur du spécimen et la section.
10. Traitements mécaniques et thermiques précédents (étant donné que la résistivité d'un matériau peut dépendre de ces traitements, ils doivent être spécifiés chaque fois qu'ils sont connus).

b) Le procès-verbal peut comprendre les éléments suivants, sur demande explicitement formulée:

1. Tableau des mesures individuelles des dimensions linéaires transversales, ainsi que la section calculée pour chaque série de mesures; ou si la section moyenne a été déterminée par pesée, indication de la longueur du spécimen, de la masse dans l'air et dans le liquide, si ce dernier est utilisé, de la masse volumique des poids, de la masse volumique de liquide, si ce dernier est utilisé, de la masse volumique du spécimen, de la section ainsi calculée et de la température à laquelle ces mesures ont été effectuées. Si la masse volumique a été déterminée sur un échantillon différent du spécimen, il convient de le noter.
2. Tableau des mesures individuelles de la résistance.

6.2.4 Mass resistivity

If the resistance $R(t)$, gauge length $l_1(t)$, total length $l_2(t)$ and mass of a specimen are all measured at the same temperature t , mass resistivity at the reference temperature t_0 is with sufficient accuracy:

$$\delta(t_0) = \frac{\delta(t)}{1 + [\alpha_R(t_0) - 2\gamma] \cdot (t - t_0)}$$

where:

$\delta(t)$ = mass resistivity of the specimen at temperature t

6.2.5 Linear dimensions and cross-sectional area

If the measurement of the total specimen length and cross-sectional area are made at a temperature t' , different from the temperature t at which resistance and gauge length are measured, it may be necessary to correct these dimensions from t' to t . The appropriate formulae are:

$$l_2(t) = l_2(t') [1 + \gamma \cdot (t - t')]$$

$$A(t) = A(t') [1 - 2\gamma \cdot (t - t')]$$

6.2.6 General comments

For most materials, the temperature coefficient of linear expansion, γ , is a much smaller quantity than is the temperature coefficient of resistance, $\alpha_R(t_0)$. For small values of the temperature difference, $(t - t_0)$, it may not be necessary to include γ in the formulae above in such cases.

6.3 Report

a) The report shall include the following:

1. Identification of test specimen.
2. Kind of material.
3. Average gauge length of specimen, the number of determinations and standard deviation of such length at the temperature of test.
4. Average cross-sectional area of specimen, the number of determinations and standard deviation of such area at the temperature of test.
5. Method used to measure resistance, i.e. reference or routine method in accordance with this recommendation.
6. Temperature of test.
7. The average resistance of the specimen, the number of determinations and standard deviation of such resistance at the temperature of test.
8. The calculated value of resistivity or resistance per unit length at 20 °C.
9. Values of the temperature coefficients used to perform the temperature corrections of the resistance per unit length, specimen length and cross-sectional area.
10. Previous mechanical and thermal treatments (since the resistivity of a material may depend upon them, they shall be stated whenever the information is available).

b) The report may include the following items if specifically requested:

1. A table of the individual measurements of transverse linear dimensions, (together with the calculated cross-sectional area for each set of measurements; or if the mean cross-sectional area was determined by weighing, a record of specimen length, mass in air and in liquid if used, density of the weights, density of the liquid if used, density of the specimen, cross-sectional area so calculated and the temperature at which these measurements were made. Where the density was determined on a sample other than the specimen, this should be noted.
2. A table of individual measurements of resistance.

7. Méthode courante

7.1 Méthode d'essais

7.1.1 Appareil de mesure de la résistance

On applique une méthode à quatre bornes pour les spécimens d'une résistance d'au plus 1 Ω, tandis qu'une méthode à deux bornes peut être appliquées pour les spécimens d'une résistance supérieure à 1 Ω.

7.1.2 Spécimen d'essai

Pour l'essentiel, c'est le même qu'au paragraphe 6.1.2, à part l'allégement suivant apporté au critère de section « sensiblement uniforme », à savoir que l'écart type relatif d'au moins cinq mesures effectuées à des intervalles égaux sur la longueur-étalon ne dépasse pas 2 %.

7.1.3 Mode opératoire

7.1.3.1 Résistance

On mesure la résistance dans un appareil dont l'incertitude globale est d'au plus $\pm 0,30\%$. La longueur-étalon entre les prises de potentiel doit être mesurée avec une incertitude non supérieure à $\pm 0,10\%$. L'étalon de référence et le spécimen d'essai, à moins d'être immergés dans les bains d'huile, doivent être maintenus dans une enceinte à l'abri des courants d'air dans le laboratoire pendant au moins 1 h avant les essais. La température de l'air dans l'enceinte, ou des bains d'huile si on en fait usage, doit être mesurée avec une incertitude inférieure à 0,1 °C. La température d'essai doit être comprise entre 10 °C et 35 °C. Les incertitudes dues à la l.é.m. des thermocouples, aux prises de potentiel et à l'échauffement du spécimen par effet joule peuvent être réduites au minimum conformément aux données du paragraphe 6.1.3.1.

7.1.3.2 Section

On détermine la section à une température comprise entre 10 °C et 35 °C, l'erreur n'étant pas supérieure à $\pm 0,50\%$. Si le spécimen a une section de forme simple, on peut la déterminer comme la moyenne de deux valeurs calculées à partir des dimensions linéaires correspondantes mesurées à chaque extrémité de la longueur-étalon.

Si les deux valeurs de la section déterminées ci-dessus à partir des dimensions linéaires diffèrent de plus de 0,70 % ou si la section n'est pas de forme simple, celle-ci doit être déterminée à partir de la masse, de la longueur et de la masse volumique du spécimen, conformément au paragraphe 6.1.3.2 ci-dessus. Les incertitudes ne doivent pas dépasser $\pm 0,10\%$ pour la masse, $\pm 0,20\%$ pour la longueur et $\pm 0,45\%$ pour la masse volumique.

7.1.3.3 Masse

On effectue, si nécessaire, une correction de la poussée de l'air pour rester dans les limites d'incertitudes spécifiées.

7.1.3.4 Masse volumique

La masse volumique du spécimen ou du matériau dont on sait qu'il possède la même masse volumique dans les limites d'incertitudes spécifiées doit être déterminée, le cas échéant, avec une incertitude non supérieure à $\pm 0,45\%$. On applique la méthode de pesée hydrostatique décrite au paragraphe 6.1.3.4. L'incertitude sur la masse volumique du liquide ne doit pas être supérieure à $\pm 0,20\%$ et l'uniformité et le contrôle de la température du liquide doivent permettre d'assurer cette condition. La mesure de la masse dans l'air doit être effectuée avec une incertitude non supérieure à $\pm 0,30 (d_L/d_s)\%$; dans le liquide, l'erreur ne doit pas être supérieure à $\pm 0,30 d_L/(d_s - d_L)\%$. Si le fil auquel est suspendu le spécimen dans le liquide a un diamètre supérieur à 0,15 mm, on effectue deux pesées avec des fils dont les diamètres sont dans le rapport de 1 à 2, et leur différence ne doit pas dépasser $0,10 d_L/(d_s - d_L)\%$ de la masse apparente du spécimen dans le liquide, à moins que les effets de la tension superficielle soient éliminés en laissant un prolongement du fil immergé dans le liquide lors de la pesée dans l'air.

7.2 Corrections de température

On applique des corrections de température conformément au paragraphe 6.2. Le produit de la différence de température ($t - t_0$) par l'incertitude sur le coefficient de température utilisé ne doit pas dépasser 0,15 %. Il convient

7. Routine method

7.1 Test method

7.1.1 Apparatus for resistance measurement

A four-terminal method shall be used for specimens of resistance of 1 Ω or less, while a two-terminal method may be used for specimens of resistance greater than 1 Ω .

7.1.2 Test specimen

Essentially the same as in Sub-clause 6.1.2, except that the criterion for "substantially uniform" cross-sectional area is relaxed to the extent that the relative standard deviation of five or more measurements made at equal intervals along the gauge length would not exceed 2%.

7.1.3 Procedure

7.1.3.1 Resistance

The resistance shall be measured in an apparatus for which the over-all uncertainty is within $\pm 0.30\%$. The gauge length between potential contacts shall be measured with an uncertainty not greater than $\pm 0.10\%$. The reference standard and test specimen, unless immersed in oil baths, shall be maintained in a draught-free enclosure in the laboratory for at least 1 h before testing. The temperature of the air in the enclosure, or of the oil baths, if any, shall be measured with an uncertainty less than 0.4 °C. The test temperature shall lie within the range 10 °C to 35 °C. Uncertainty due to thermal e.m.f.'s, contact potentials and joule heating of the specimen may be minimized as described in Sub-clause 6.1.3.1.

7.1.3.2 Cross-sectional area

The cross-sectional area shall be determined at a temperature within the range 10 °C to 35 °C, with an uncertainty not greater than $\pm 0.50\%$. If the specimen has a simple cross-section, the area may be obtained as the mean of two values calculated from the appropriate linear dimensions measured at each end of the gauge length.

If the two values of area as determined above from the linear dimensions differ by more than 0.70% or if the cross-section is not simple, then the cross-sectional area shall be determined from the mass, length and density of the specimen, as described in Sub-clause 6.1.3.2 above. The uncertainties shall not exceed $\pm 0.10\%$ for the mass, $\pm 0.20\%$ for the length and $\pm 0.45\%$ for the density.

7.1.3.3 Mass

Corrections for the buoyancy of the air shall be made if necessary to stay within the specified uncertainties.

7.1.3.4 Density

The density of the specimen or of material known to possess the same density (to within the specified uncertainty shall be determined, where necessary, to within an uncertainty not greater than $\pm 0.45\%$. The hydrostatic weighing method shall be used, as discussed in Sub-clause 6.1.3.4. The uncertainty in the density of the liquid shall be not greater than $\pm 0.20\%$ and the uniformity and control of the liquid temperature shall be such as to ensure this condition. Measurement of the mass in air shall be made with an uncertainty not greater than $\pm 0.30 (d_1/d_0)\%$; in the liquid, the error shall not exceed $\pm 0.30 d_1/(d_0 - d_L)\%$. If the wire suspending the specimen in the liquid exceeds 0.15 mm in diameter, two weighings shall be made with wires of which the diameters are in the ratio of 1 to 2, and their difference shall not exceed $0.10 d_1/(d_0 - d_L)\%$ of the apparent mass of the specimen in the liquid, unless surface tension effects are eliminated by allowing an extension of the wire to dip into the liquid when weighing in air.

7.2 Temperature correction

Temperature corrections shall be performed as discussed in Sub-clause 6.2. The product of the temperature difference $(t - t_0)$ and the uncertainty in the temperature coefficient used shall not exceed 0.15%. Note that under

de noter que, dans des conditions courantes d'essais, la différence de température ($t - t_0$) peut être suffisamment importante pour qu'il soit nécessaire de conserver le coefficient de température de dilatation linéaire dans les formules du paragraphe 6.2.

7.3 Procès-verbal

Le procès-verbal doit être conforme aux données du paragraphe 6.3, à l'exception, toutefois, qu'il suffit de noter les points qui s'appliquent au cas considéré ou qui sont importants.

TABLEAU I

Limites d'incertitude

	Méthode de référence	Méthode courante
Longueur-étalon	+ 0,05%	± 0,10%
Résistance	± 0,15%	± 0,30%
Section	± 0,15%	± 0,50%
En cas d'emploi de masse volumique connue du spécimen:		
Masse dans l'air	± 0,05%	± 0,10%
Longueur du spécimen	± 0,05%	± 0,20%
Masse volumique du spécimen	+ 0,12%	± 0,45%
En cas de pesée hydrostatique:		
Masse dans l'air	+ 0,04 d_L/d_L^0 %	± 0,30 d_L/d_L^0 %
Masse dans le liquide	± 0,08 $d_L/d_L^0 - d_L^0$ %	± 0,30 $d_L/d_L^0 - d_L^0$ %
Masse volumique du liquide	+ 0,01%	± 0,20%
Incertitude due à la température	± 0,06%	± 0,25%
Contrôle de la température	± 0,02% (0,1 °C)	± 0,15% (0,4 °C)
Correction de température	± 0,04%	± 0,15%
Valeurs:		
Résistivité (volumique)	+ 0,25%	+ 0,65%
Densitérésistivité	± 0,20%	± 0,45%
Résistance linéique	± 0,30%	± 0,40%

TABLEAU II

Valeurs de résistivité équivalentes pour le cuivre-type recuit *

Conductivité relative, à 20 °C, du cuivre-type recuit, en pour-cent	100,00
<i>Résistivité (volumique)</i>	
Ohm-mètre	$1,7241 \times 10^{-8}$
Microhm-mètre	0,017 241
Ohm-circulaire mil/ft	10,371
Microhm-inch	0,678 79
<i>Densitérésistivité</i>	
Ohm-kilogramme/mètre ³	$1,5328 \times 10^{-4}$
Ohm-gramme/mètre ³	0,153 28
Ohm-pound/inche ³	875,20

* Conformément à la Publication 28 de la CIE.

routine testing conditions, the temperature difference ($t - t_0$) may be large enough to require retaining the temperature coefficient of linear expansion in the formulae of Sub-clause 6.2.

7.3 Report

The report shall be as described in Sub-clause 6.3, except that only those items that apply to the particular case, or are of significance, need be reported.

TABLE I

Limits of uncertainty

	Reference method	Routine method
Gauge length	± 0.05%	+ 0.10%
Resistance	± 0.15%	+ 0.30%
Cross-sectional area	+ 0.15%	± 0.50%
Using known specimen density:		
Mass in air	± 0.05%	+ 0.10%
Specimen length	± 0.05%	+ 0.20%
Specimen density	± 0.15%	± 0.45%
Using hydrostatic weighing:		
Mass in air	± 0.04 d_L/d_s %	± 0.30 d_L/d_s %
Mass in liquid	± 0.08 $d_L(d_s - d_L)$ %	± 0.30 $d_L(d_s - d_L)$ %
Liquid density	± 0.08%	± 0.20%
Temperature-induced uncertainty	± 0.06%	± 0.25%
Temperature control	+ 0.04% (0.1 °C)	+ 0.15% (0.4 °C)
Temperature correction	+ 0.04%	+ 0.15%
Totals:		
Volume resistivity	+ 0.25%	+ 0.65%
Mass resistivity	± 0.20%	± 0.45%
Resistance per unit length	± 0.20%	± 0.40%

TABLE II

*Equivalent resistivity values for International Annealed Copper Standard**

Conductivity at 20 °C, per cent I.A.C.S.		100.00
<i>Volume resistivity</i>		
Ohm-metre		1.7241 × 10 ⁻⁸
Microhm-metre		0.017 241
Ohm-circular mil/ft		10.371
Microhm-inch		0.678 79
<i>Mass resistivity</i>		
Ohm-kilogram/metre ³		1.5328 × 10 ⁻⁴
Ohm-gram/metre ³		0.153 28
Ohm-pound/inch ³		875.20

* In accordance with I.E.C. Publication 2R.

TABLEAU III

Valeurs choisies des propriétés du cuivre et de l'aluminium à 20 °C

Publications de la CIEI	25	105	111	121
Matériaux	Cu	Al	Al	Al
Notes	1	2	3	4
Résistivités (volumiques), $\rho(t_0)$, $10^{-8} \Omega \cdot m$	1,7241	2,90	2,8264	2,80
Coefficients de température de la résistance, $\alpha_R(t_0)$, $10^{-4}/^{\circ}C$	3,93	3,93	4,03	4,07
Coefficients de température de dilatation linéaire, γ , $10^{-6}/^{\circ}C$	1,7	2,3	2,3	2,3
Coefficients de température de la résistivité (volumique), α , $10^{-11} \Omega \cdot m / ^{\circ}C$ (note 5)	6,8	11,46	11,46	11,46
Masses volumiques, $d_t(t_0)$, $10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	8,89	2,703	2,703	2,703

Notes 1. Cuivre-type recuit. Les valeurs du coefficient de température de la résistivité (volumique), du coefficient de température de dilatation linéaire et de la masse volumique sont également admises pour le cuivre recuit industriel.

2. Aluminium de pureté industrielle pour barres de connexion. La résistivité (volumique) indiquée est une valeur maximale.
3. Fils en aluminium étroit industriel pour conducteurs électriques. La résistivité (volumique) indiquée est à la fois une valeur normale et une valeur maximale.
4. Fils en aluminium recuit industriel pour conducteurs électriques. La résistivité (volumique) indiquée est une valeur maximale.
5. Les valeurs du coefficient de température de la résistivité (volumique) sont calculées (voir annexe A) à partir des valeurs indiquées dans les publications de la CIEI citées pour le coefficient de température de la résistance, la résistivité (volumique) et le coefficient de température de dilatation linéaire.

TABLE III

Selected values of properties of copper and aluminium at 20 °C

IEC Publications	28	105	111	121
Material	Cu	Al	Al	Al
Note	1	2	3	4
Volume resistivity, $\rho(t_0)$, $10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$	1.7241	2.90	2.8264	2.80
Temperature coefficient of resistance, $\alpha_R(t_0)$, $10^{-3}/^\circ\text{C}$	3.93	3.93	4.03	4.07
Temperature coefficient of linear expansion, γ , $10^{-6}/^\circ\text{C}$	1.7	2.3	2.3	2.3
Temperature factor of volume resistivity, α , $10^{-11}\Omega\cdot\text{m}/^\circ\text{C}$ (Note 5)	6.8	11.46	11.46	11.46
Density, $d_d(t_0)$, $10^6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$	8.89	2.703	2.703	2.703

Notes 1. Standard annealed copper. The values for the temperature factor of volume resistivity, temperature coefficient of linear expansion and density are accepted also for commercial annealed copper.

2. Commercial-purity aluminium busbar material. The volume resistivity given is a maximum.

3. Commercial hard-drawn aluminium electrical conductor wire. The volume resistivity given is taken as both the standard value and the maximum.

4. Commercial annealed aluminium electrical conductor wire. The volume resistivity given is a maximum.

5. The values for the temperature factor of volume resistivity have been calculated (see Appendix A) from the values given in the IEC publications cited for the temperature coefficient of resistance, volume resistivity and temperature coefficient of linear expansion.

ANNEXE A

CORRECTIONS DE TEMPÉRATURE

La pratique habituelle décrite au paragraphe 6.2 consiste à employer le coefficient de température de la résistance pour calculer la résistivité (volumique) à la température de référence t_0 . Toutefois, on peut trouver certains avantages à utiliser une autre méthode en variante. Si ϵ , coefficient de température de la résistivité, est défini par l'équation

$$\rho(t_s) = \rho(t_r) + \epsilon \cdot (t_s - t_r),$$

on constate que ϵ a pratiquement la même valeur pour tous les alliages de cuivre couramment utilisés et une autre valeur commune aux alliages d'aluminium. Si la résistance et les dimensions sont mesurées à la température t_s et si la résistivité (volumique) $\rho(t_r)$ est calculée, on peut faire les corrections à la température de référence t_0 , avec une précision suffisante en utilisant directement la formule ci-dessus avec les valeurs de ϵ définies au tableau III.

Il convient également de noter que le coefficient de température de la résistance, à 20 °C, $\alpha_R(t_0)$, est lié à ϵ par la formule :

$$\alpha_R(t_0) = \frac{\epsilon}{\rho(t_0)} - \gamma$$

APPENDIX A

TEMPERATURE CORRECTION

The usual practice, as set forth in Sub-clause 6.2, is to use the temperature coefficient of resistance in computing the volume resistivity at the reference temperature t_0 . However, some advantages may be gained by use of an alternate procedure. If α , the temperature factor of volume resistivity, is defined by the equation

$$\rho(t_0) = \rho(t_1) [1 + \alpha(t_1 - t_0)],$$

it is found that α has almost the same value for all commonly used copper alloys and another common value for aluminium alloys. If the resistance and dimensions are measured at temperature t , and the volume resistivity $\rho(t)$ calculated, then the temperature correction to the reference temperature t_0 may be possible with sufficient precision using the above formula directly with the values for α found in Table III.

It may also be noted that the temperature coefficient of resistance at 20 °C, $\alpha_R(t_0)$, is related to α by the formula:

$$\alpha_R(t_0) = \frac{R}{\rho(t_0)} - \gamma$$

ANNEXE B

ANALYSE DES INCERTITUDES

La résistance du spécimen, $R(t_0)$, est obtenue à partir d'une résistance-étalon par une technique de mesure de rapport qui introduit une équation de la forme:

$$\frac{R_x}{R_s} = \frac{Z_A}{Z_B} = N_{AB}, \text{ rapport mesuré,}$$

où:

R_x = résistance inconnue

R_s = résistance-étalon

Z_A, Z_B = impédances dans les bras d'équilibrage du pont.

Dans ce qui suit, on admet que la résistance et la longueur varient linéairement en fonction de la température dans les portées considérées. Au moment de la mesure, le spécimen (résistance $R_x = R(t)$) est à la température t , et la résistance-étalon (résistance $R_s(t')$) est à une température t' , légèrement différente. Si la résistance-étalon est définie à une température de référence t_0 , qui n'est pas nécessairement la même que la température de référence pour la résistivité ρ , on a:

$$R_s(t') = R_s(t_0) [1 + \alpha_s \cdot (t' - t_0)],$$

où α_s est le coefficient de variation de la résistance en fonction de la température de la résistance-étalon.

Puis:

$$R(t) = N_{AB} R_s(t') = N_{AB} R_s(t_0) [1 + \alpha_s \cdot (t' - t_0)].$$

Pour obtenir la meilleure précision, il est préférable que $t = t_0$ et $t' = t_0$.

La résistivité (volumique) est donnée par la formule:

$$\rho(t) = \frac{A(t)}{L(t)} N_{AB} R_s(t_0) [1 + \alpha_s \cdot (t' - t_0)].$$

L'incertitude relative sur ρ , calculée sous la forme:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left\{ \sum_i \left[\Delta X_i \frac{\partial \rho}{\partial X_i} \right]^2 \right\}^{1/2},$$

où X_i est la $i^{\text{ème}}$ caractéristique, connue ou mesurée, et ΔX_i la valeur de l'incertitude sur X_i , est avec une très bonne approximation:

$$\frac{\Delta \rho(t)}{\rho(t)} \approx \left\{ \left[\frac{\Delta A}{A} \right]^2 + \left[\frac{\Delta L}{L} \right]^2 + \left[\frac{\Delta N_{AB}}{N_{AB}} \right]^2 + \left[\frac{\Delta R_s(t_0)}{R_s(t_0)} \right]^2 + \left[(t' - t_0) \cdot \Delta \alpha_s \right]^2 + [\alpha_s \cdot \Delta t']^2 \right\}^{1/2}.$$

Etant donné que:

$$\begin{aligned} \rho(t_0) &= \rho(t) - \rho \cdot (t_0 - t), \\ \frac{\Delta \rho(t_0)}{\rho(t_0)} &\approx \left\{ \left[\frac{\Delta \rho(t)}{\rho(t)} \right]^2 + \left[\frac{\Delta \rho}{\rho(t)} (t_0 - t) \right]^2 + \left[\frac{\rho}{\rho(t)} \Delta t \right]^2 \right\}^{1/2} \\ &\approx \left\{ \left[\frac{\Delta A}{A} \right]^2 + \left[\frac{\Delta L}{L} \right]^2 + \left[\frac{\Delta N_{AB}}{N_{AB}} \right]^2 + \left[\frac{\Delta R_s(t_0)}{R_s(t_0)} \right]^2 + \left[(t' - t_0) \cdot \Delta \alpha_s \right]^2 + [\alpha_s \cdot \Delta t']^2 + \left[\frac{\Delta \rho}{\rho(t)} (t_0 - t) \right]^2 + \left[\frac{\rho}{\rho(t)} \Delta t \right]^2 \right\}^{1/2}. \end{aligned}$$

APPENDIX B

ANALYSIS OF UNCERTAINTIES

The resistance of the specimen, $R(t_0)$, is obtained from a resistance standard by a ratio measurement technique which introduces an equation of the form:

$$\frac{R_x}{R_s} = \frac{Z_A}{Z_B} = N_{AB}, \text{ measured ratio.}$$

where:

R_x = unknown resistance,

R_s = standard resistance,

Z_A, Z_B = impedances in the balancing arms of the bridge.

In the following, it is assumed that resistance and length are varying linearly with temperature within the ranges considered. At the time of measurement, the specimen (resistance $R_x = R(t)$) has the temperature t , and the standard resistor (resistance $R_s(t')$) has the slightly different temperature t' . If the standard resistor is certified at a reference temperature t_0 , not necessarily the same as the reference temperature for resistivity t_0 , then

$$R_s(t') = R_s(t_0) [1 + \alpha_s \cdot (t' - t_0)],$$

where α_s is the temperature coefficient of resistance of the standard resistor.

Then:

$$R(t) = N_{AB} R_s(t') = N_{AB} R_s(t_0) [1 + \alpha_s \cdot (t' - t_0)].$$

For maximum accuracy, it is preferable that $t = t_0$ and $t' = t_0$.

The volume resistivity is given by

$$\rho(t) = \frac{A(t)}{L(t)} N_{AB} R_s(t_0) [1 + \alpha_s \cdot (t' - t_0)].$$

The relative uncertainty in ρ , calculated as:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left\{ \sum_i \left[\Delta X_i \frac{\partial \rho}{\partial X_i} \right]^2 \right\}^{1/2}$$

where X_i represents the i th characteristic, known or measured, and ΔX_i is the magnitude of the uncertainty of X_i , is to a very good approximation:

$$\frac{\Delta \rho(t)}{\rho(t)} \approx \left\{ \left[\frac{\Delta A}{A} \right]^2 + \left[\frac{\Delta L}{L} \right]^2 + \left[\frac{\Delta N_{AB}}{N_{AB}} \right]^2 + \left[\frac{\Delta R_s(t_0)}{R_s(t_0)} \right]^2 + \left[(t' - t_0) \cdot \Delta \alpha_s \right]^2 + [\alpha_s \cdot \Delta t']^2 \right\}^{1/2}$$

Since:

$$\begin{aligned} \rho(t_0) &= \rho(t) \cdot (1 + \alpha \cdot (t_0 - t)), \\ \frac{\Delta \rho(t_0)}{\rho(t_0)} &\approx \left\{ \left[\frac{\Delta \rho(t)}{\rho(t)} \right]^2 + \left[\frac{\Delta \alpha}{\alpha} (t_0 - t) \right]^2 + \left[\frac{\Delta t}{\rho(t)} \right]^2 \right\}^{1/2} \\ &\approx \left\{ \left[\frac{\Delta A}{A} \right]^2 + \left[\frac{\Delta L}{L} \right]^2 + \left[\frac{\Delta N_{AB}}{N_{AB}} \right]^2 + \left[\frac{\Delta R_s(t_0)}{R_s(t_0)} \right]^2 + \left[(t' - t_0) \cdot \Delta \alpha_s \right]^2 + [\alpha_s \cdot \Delta t']^2 + \left[\frac{\Delta \rho}{\rho(t)} (t_0 - t) \right]^2 + \left[\frac{\Delta t}{\rho(t)} \right]^2 \right\}^{1/2} \end{aligned}$$

Des formules analogues sont valables pour la densité résistivité et la résistance linéique :

$$\frac{\Delta \rho(t_0)}{\rho(t_0)} \approx \left\{ \left[\frac{\Delta m}{m} \right]^2 + \left[\frac{\Delta l_1}{l_1} \right]^2 + \left[\frac{\Delta l_2}{l_2} \right]^2 + \left[\frac{\Delta N_{AB}}{N_{AB}} \right]^2 + \left[\frac{\Delta R_s(t_0)}{R_s(t_0)} \right]^2 + \left[(t' - t_0) \cdot \Delta \alpha_s \right]^2 + [\alpha_s \cdot \Delta t']^2 + \left[(t_0 - t) \cdot \Delta \beta'(t_0) \right]^2 + [\beta'(t_0) \cdot \Delta t]^2 \right\}^{1/2}$$

où $\beta'(t_0)$ est défini par :

$$\beta'(t_0) = \beta(t) [1 + \beta'(t_0) \cdot (t_0 - t)]^{-1};$$

$$\frac{\Delta R_s(t_0)}{R_s(t_0)} \approx \left\{ \left[\frac{\Delta l_1}{l_1} \right]^2 + \left[\frac{\Delta N_{AB}}{N_{AB}} \right]^2 + \left[\frac{\Delta R_s(t_0)}{R_s(t_0)} \right]^2 + \left[(t' - t_0) \cdot \Delta \alpha_s \right]^2 + [\alpha_s \cdot \Delta t']^2 + \left[(t_0 - t) \cdot \Delta (\alpha_R(t_0) - \gamma) \right]^2 + [(\alpha_R(t_0) - \gamma) \cdot \Delta t]^2 \right\}^{1/2}$$

Dans ces formules, $\Delta A/A$, $\Delta l_1/l_1$, $\Delta l_2/l_2$ et $\Delta m/m$ sont respectivement les incertitudes relatives sur la section mesurée, la longueur-étalon, la longueur totale du spécimen et la masse. $(\Delta N_{AB}/N_{AB})$ est l'incertitude relative résultant de la qualité du pont et de la précision de la mesure, $\Delta R_s(t_0)/R_s(t_0)$ est l'incertitude relative sur l'étalement de la résistance-étalon à sa température de référence t_0 et $(t' - t_0) \cdot \Delta \alpha_s$ est l'incertitude relative sur la résistance de l'étalon à la température t' à laquelle il est maintenu pendant la mesure de la résistance, résultant de la correction sur la température de l'étalon, pour passer de t_0 à t' . Pris ensemble

$$\left\{ \left[\frac{\Delta N_{AB}}{N_{AB}} \right]^2 + \left[\frac{\Delta R_s}{R_s} \right]^2 + \left[(t' - t_0) \cdot \Delta \alpha_s \right]^2 \right\}^{1/2}$$

est l'incertitude relative désignée sous le nom de « Résistance » dans le tableau I.

Les autres termes de ces formules sont les incertitudes relatives comprises dans « l'incertitude due à la température » figurant dans le tableau I. Par l'expression « Contrôle de la température », figurant dans ce tableau, on entend la grandeur

$$\left\{ [\alpha_s \cdot \Delta t']^2 + [K \cdot \Delta t]^2 \right\}^{1/2}$$

où K est $\rho(t)$ pour la résistivité (volumique), β' pour la densité résistivité, et $[\alpha_R(t_0) - \gamma]$ pour la résistance linéique représentant l'effet d'incertitude dans la mesure de la température. Le terme « Correction de température » du tableau est $\left\{ [(t_0 - t) \cdot \Delta \rho(t)]^2 \right\}^{1/2}$ pour la résistivité (volumique), $\left\{ [(t_0 - t) \cdot \Delta \beta'(t_0)]^2 \right\}^{1/2}$ pour la densité résistivité et $\left\{ [(t_0 - t) \cdot \Delta (\alpha_R(t_0) - \gamma)]^2 \right\}^{1/2}$ pour la résistance linéique et représente, dans chaque cas, l'incertitude résultant de la correction pour passer de la température de mesure t à la température de référence t_0 .

Incertitude sur la mesure de la section

La section d'un spécimen varie légèrement sur toute sa longueur. L'incertitude résultant de cette variation peut être définie à partir de mesures répétées à intervalles réguliers sur la longueur d'essai du spécimen.

Soit $A(x)$ la section au point x sur la longueur d'essai du spécimen.

Soit $A(x) = A_m [1 + f(x)]$, avec $|f(x)| \ll 1$ où A_m est la moyenne de $A(x)$ et :

$$A_m = \frac{1}{l} \int_0^l A(x) dx,$$

$$\int_0^l f(x) dx = 0.$$

Or, la résistance est donnée par la formule :

$$R = \rho \int_0^l \frac{dx}{A(x)} \approx \frac{\rho l}{A_m} \left\{ 1 + \frac{1}{l} \int_0^l [f(x)]^2 dx \right\}.$$

Similar formulae will hold for the mass resistivity and the resistance per unit length:

$$\frac{\Delta s(t_0)}{s(t_0)} \approx \left\{ \left[\frac{\Delta m}{m} \right]^2 + \left[\frac{\Delta l_1}{l_1} \right]^2 + \left[\frac{\Delta l_2}{l_2} \right]^2 + \left[\frac{\Delta N_{AR}}{N_{AR}} \right]^2 + \left[\frac{\Delta R_s(t_2)}{R_s(t_2)} \right]^2 + \left[(t' - t_2) \cdot \Delta \alpha_s \right]^2 + \left[\alpha_s \cdot \Delta t' \right]^2 + \left[(t_2 - t) \cdot \Delta \beta'(t_0) \right]^2 + \left[\beta'(t_0) \cdot \Delta t \right]^2 \right\}^{1/2}$$

where $\beta'(t_0)$ is defined by:

$$\beta(t_0) = \beta(t) [1 + \beta'(t_0) \cdot (t_0 - t)]^{-1};$$

$$\frac{\Delta R_s'(t_0)}{R_s'(t_0)} \approx \left\{ \left[\frac{\Delta l_1}{l_1} \right]^2 + \left[\frac{\Delta N_{AR}}{N_{AR}} \right]^2 + \left[\frac{\Delta R_s(t_2)}{R_s(t_2)} \right]^2 + \left[(t' - t_2) \cdot \Delta \alpha_s \right]^2 + \left[\alpha_s \cdot \Delta t' \right]^2 + \left[(t_0 - t) \cdot \Delta(\alpha_R(t_0) - \gamma) \right]^2 + \left[(\alpha_R(t_0) - \gamma) \cdot \Delta t \right]^2 \right\}^{1/2}$$

In these formulae, $\Delta A/A$, $\Delta l_1/l_1$, $\Delta l_2/l_2$ and $\Delta m/m$ are the relative uncertainties in the measured cross-sectional area, gauge length, total specimen length and mass, respectively. $(\Delta N_{AR}/N_{AR})$ is the relative uncertainty arising from the quality of the bridge and the precision of the measurement, $\Delta R_s(t_2)/R_s(t_2)$ is the relative uncertainty in the calibration of the resistance standard at its reference temperature t_2 and $(t' - t_2) \cdot \Delta \alpha_s$ is the relative uncertainty in the resistance of the standard at the temperature t' at which it is held during the resistance measurement, arising from the correction of the temperature of the standard from t_2 to t' . Taken together,

$$\left\{ \left[\frac{\Delta N_{AR}}{N_{AR}} \right]^2 + \left[\frac{\Delta R_s}{R_s} \right]^2 + \left[(t' - t_2) \cdot \Delta \alpha_s \right]^2 \right\}^{1/2}$$

is the relative uncertainty labelled "Resistance" in Table I.

The rest of the terms in these formulae are the relative uncertainties included in "Temperature-induced uncertainty" in Table I. Under "Temperature control" in the table is the quantity

$$\left\{ \left[\alpha_s \cdot \Delta t' \right]^2 + \left[K \cdot \Delta t \right]^2 \right\}^{1/2}$$

where K is $\alpha/g(t)$ for the volume resistivity, β' for the mass resistivity, and $[\alpha_R(t_0) - \gamma]$ for the resistance per unit length, representing the effect of uncertainty in the temperature measurement. The "Temperature correction" term in the table is $\left\{ \left[(t_0 - t) \cdot \Delta \alpha/g(t) \right]^2 \right\}^{1/2}$ for the volume resistivity, $\left\{ \left[(t_0 - t) \cdot \Delta \beta'(t_0) \right]^2 \right\}^{1/2}$ for the mass resistivity and $\left\{ \left[(t_0 - t) \cdot \Delta(\alpha_R(t_0) - \gamma) \right]^2 \right\}^{1/2}$ for the resistance per unit length, and in each case represents the uncertainty induced by the correction from measurement temperature t to reference temperature t_0 .

Cross-section measurement uncertainty

The cross-section of a specimen varies somewhat along its length. The uncertainty introduced by this variation can be estimated from repeated measurements made at regular intervals along the test length of the specimen.

Let $A(x)$ be the cross-sectional area at a position x along the test length of the specimen.

Let $A(x) = A_m [1 + f(x)]$, with $|f(x)| \ll 1$ where A_m is the mean value of $A(x)$ and

$$A_m = \frac{1}{l} \int_0^l A(x) dx,$$

$$\int_0^l f(x) dx = 0.$$

Now the resistance is given by:

$$R = \rho \int_0^l \frac{dx}{A(x)} \approx \frac{\rho}{A_m} \left\{ l + \frac{1}{l} \int_0^l [f(x)]^2 dx \right\}.$$

Si on effectue n mesures de la section à des intervalles égaux sur la longueur d'essai, on a :

$$\bar{A} = \sum_{i=1}^n A(x_i)/n$$

où $A(x_i)$ représente la $i^{\text{ème}}$ mesure, \bar{A} est une estimation de A_m et

$$c^2 = (1/A_m^2) \sum_{i=1}^n [A(x_i) - \bar{A}]^2 / (n - 1)$$

est une estimation de :

$$\sigma^2 A_m^2 = (1/l^2) \int_0^l [f(x)]^2 dx$$

où σ^2 est la variance de $A(x)$.

Ainsi, en seconde approximation, la section à utiliser pour le calcul de la résistivité (volumique) est :

$$A = \bar{A} / (1 + c^2).$$

L'incertitude relative sur cette section peut être prise égale à l'écart type de la moyenne, relatif à A_m :

$$\frac{\Delta A}{A} = S_m \equiv \frac{c}{\sqrt{n}}$$

Pour les essais de référence, $\Delta A/A$ est spécifié comme étant non supérieur à $\pm 0,15\%$. Si on effectue $n = 5$ mesures de la section, le terme correctif c^2 dans l'expression reliant A à A_m est de l'ordre de $0,001\%$ et est de ce fait négligeable. Pour les essais courants, où $\Delta A/A$ peut atteindre $\pm 0,50\%$, le terme correctif est de l'ordre de $0,005\%$ et est également négligeable. Par conséquent, la valeur moyenne, A_m , des n mesures peut être utilisée pour calculer la résistivité (volumique), l'incertitude étant considérée comme l'écart type sur la moyenne, rapporté à la valeur moyenne.

Lorsque la section est déterminée à partir de la masse volumique, de la masse et de la longueur de l'échantillon, A_m est obtenu directement :

$$m = d_s \int_0^l A(x) dx = d_s l A_m$$

où m est la masse et d_s la masse volumique du spécimen.

Dans ce cas, l'incertitude sur la détermination de A_m se compose des incertitudes provenant des mesures de la masse (m), de la longueur (l) et de la masse volumique (d_s) :

$$\frac{\Delta A}{A} = \left\{ \left[\frac{\Delta m}{m} \right]^2 + \left[\frac{\Delta l}{l} \right]^2 + \left[\frac{\Delta d_s}{d_s} \right]^2 \right\}^{1/2}$$

La masse volumique du spécimen peut être déterminée en comparant les masses apparentes, déterminées par pesée dans l'air et dans un liquide d'essai, tel que l'eau. Dans ce cas

$$d_s = \frac{m_A d_L - m_L d_A}{m_A - m_L} \approx \frac{m_A \cdot d_L}{m_A - m_L}$$

où m_A et m_L sont respectivement les masses apparentes dans l'air et dans le liquide, et d_L la masse volumique du liquide. Les incertitudes se combinent pour donner :

$$\frac{\Delta A}{A} = \left\{ \left[\left(\frac{d_L}{d_s} \right) \frac{\Delta m_A}{m_A} \right]^2 + \left[\left(\frac{d_s - d_L}{d_L} \right) \frac{\Delta m_L}{m_L} \right]^2 + \left[\frac{\Delta d_L}{d_L} \right]^2 + \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 \right\}^{1/2}$$

Une évaluation distincte du terme correctif, utilisant n mesures des dimensions à intervalles égaux, serait nécessaire pour garantir que le spécimen est « sensiblement uniforme » au sens du paragraphe 6.1.2.1 de l'essai.

If n measurements of the cross-sectional area are made at equal intervals along the test length, then:

$$\bar{A} = \sum_{i=1}^n A(x_i) / n$$

where $A(x_i)$ denotes the i th measurement, \bar{A} is an estimate of A_m and

$$s^2 = (1/A_m^2) \sum_{i=1}^n [A(x_i) - \bar{A}]^2 / (n - 1)$$

is an estimate of

$$\sigma^2 / A_m^2 = (1/l^2) \int_0^l [f(x)]^2 dx$$

where σ^2 is the variance of $A(x)$.

Thus, to a second approximation, the cross-sectional area to use in calculating the volume resistivity is:

$$A = \bar{A} / (1 + c^2)$$

The relative uncertainty in this cross-sectional area can be taken as the standard deviation of the mean, relative to A_m :

$$\frac{\Delta A}{A} = S_m = \frac{c}{\sqrt{n}}$$

For reference tests, $\Delta A/A$ is specified as not greater than $\pm 0.15\%$. If $n = 5$ measurements of the cross-sectional area are made, the correction term c^2 in the expression relating A and A_m is of the order of 0.001% and is therefore not significant. For routine tests, where $\Delta A/A$ may be as large as $\pm 0.50\%$, the correction term is of the order of 0.005% and again is not significant. Therefore, the mean value, A_m , of the n measurements may be used in calculating the volume resistivity, with the uncertainty taken as the standard deviation of the mean, relative to the mean value.

When the cross-sectional area is determined from density, mass and length of the specimen, A_m is obtained directly:

$$m = d_s \int_0^l A(x) dx = d_s l A_m$$

where m is the mass and d_s the density of the specimen.

In this case, the uncertainty in determining A_m is composed of uncertainties contributed from the measurements of mass (m), length (l) and density (d_s):

$$\frac{\Delta A}{A} = \left\{ \left[\frac{\Delta m}{m} \right]^2 + \left[\frac{\Delta l}{l} \right]^2 + \left[\frac{\Delta d_s}{d_s} \right]^2 \right\}^{1/2}$$

The specimen density may be determined by comparing the apparent masses, determined by weighing in air and in a test liquid, such as water. In this case

$$d_s = \frac{m_A d_L - m_L d_A}{m_A - m_L} \approx \frac{m_A \cdot d_L}{m_A - m_L}$$

where m_A and m_L are the apparent masses in air and in the liquid, respectively, and d_L is the density of the liquid. The uncertainties combine to produce:

$$\frac{\Delta A}{A} = \left\{ \left[\left(\frac{d_L}{d_s} \right) \frac{\Delta m_A}{m_A} \right]^2 + \left[\left(\frac{d_A \cdot d_L}{d_s} \right) \frac{\Delta m_L}{m_L} \right]^2 + \left[\frac{\Delta d_L}{d_L} \right]^2 + \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 \right\}^{1/2}$$

A separate estimate of the correction term, using n equally-spaced measurements of the dimensions, would be necessary to ensure that the specimen is "substantially uniform" in the sense of Sub-clause 6.1.2.1 of the test.