

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

RECOMMANDATION DE LA C.E.I.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

I.E.C. RECOMMENDATION

Publication 26

Edition révisée — Revised edition

1925

Spécification internationale d'un cuivre-type recuit

International standard of resistance for copper



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varambè
Genève, Suisse

Prix Fr. s. 9.—
Pices Fr.

PREFACE TO FIRST EDITION.

The electrical industry has repeatedly felt the need of a resistance standard for copper. Until quite recently there has been a lack of uniformity in the values adopted in the different countries as the standard for annealed copper, arising in the main from the varying interpretation of Matthiessen's original work for the British Association Electrical Standards Committee in 1864, on which ultimately the various values were based. Although the differences have not been very great they have been sufficiently large to prevent the various national tables for copper wires being entirely comparable.

The idea of adopting an international standard for copper was first suggested at the Chicago Congress of 1893, but the proposal unfortunately fell to the ground. During 1917, however, on the initiative of the American Institute of Electrical Engineers, the Bureau of Standards, of Washington, undertook certain experimental work, the results of which are published in the Bulletin of the Bureau for 1917, Volume 7, No. 19. On the conclusion of this experimental work the international aspect of the matter was considered by the various National Laboratories.

The National Committee of the United States of America also brought the subject to the notice of the I.E.C., and in May, 1912, certain definite propositions, based on the experiments carried out by the different National Laboratories, were considered by a Special Committee of the I.E.C. then sitting in Paris. These propositions were subsequently circulated to the various National Committees of the I.E.C., and at Zurich, in January, 1913, they were agreed to in principle, Dr. R. T. Glazebrook, C.B. (*Director of the National Physical Laboratory of London*) and Prof. Paul Janet (*Director of the Laboratoire central d'Electricité of Paris*) kindly undertaking to prepare the final wording of the different clauses in consultation with the Bureau of Standards, of Washington, and the Physikalisch-Technische Reichsanstalt, of Berlin.

At the Plenary Meeting of the I.E.C. held in Berlin in September, 1913, at which twenty-four nations were represented, the final recommendations, which were presented in person by Prof. Dr. E. Warburg (*President of the Physikalisch-Technische Reichsanstalt of Berlin*), were ratified.

LONDON, March, 1914

PREFACE TO SECOND EDITION.

The purpose of this edition is not to change in any way the substance of the original recommendations but only to re-state them in a manner which renders them free from ambiguity or the possibility of misconstruction.

The recommendations as given in this report have been approved by the Directors of the National Laboratories of London, Paris and Washington. Through the good offices of the President of the Swiss Committee this revised report has been reviewed by Prof. Dr. E. Warburg.

LONDON, March, 1925.

*J. H. Dellinger—"Temperature coefficient of the resistance of copper."
F. A. Wolff and J. H. Dellinger—"Electrical conductivity of commercial copper."

PRÉFACE DE LA PREMIÈRE ÉDITION.

A plusieurs reprises le besoin d'une spécification pour le cuivre s'est fait sentir dans l'industrie électrique. Jusqu'à une époque toute récente, il y a eu manque d'uniformité dans les valeurs adoptées par les différentes nations comme spécification du cuivre-typé reçu; ce manque d'uniformité était dû en grande partie aux divers interprétations données aux recherches de Matthiessen faites pour la British Association (Comité d'étalonnage électrique) en 1864, et qui servaient en réalité de base pour le choix des diverses valeurs adoptées. Bien que les différences ne fussent pas très grandes, elles étaient suffisamment importantes pour empêcher les tables pour les fils de cuivre des divers pays, d'être entièrement comparables.

L'idée d'adopter une spécification internationale pour le cuivre fut d'abord suggérée au Congrès de Chicago en 1893, mais malheureusement la proposition n'eut pas de suite. Pendant l'année 1911, cependant, sur l'initiative de l'American Institute of Electrical Engineers, le Bureau of Standards de Washington entreprit certaines recherches expérimentales dont les résultats furent publiés dans le Bulletin du Bureau pour 1911, Volume 7, No. 1.^o A la suite de ces recherches, les divers Laboratoires nationaux étudièrent la question au point de vue international.

Le Comité national des États-Unis d'Amérique attirait aussi l'attention de la C.E.I. sur ce sujet et, en mai 1912, certaines propositions définies, basées sur les expériences faites par les différents Laboratoires nationaux furent examinées par un des Comités spéciaux de la C.E.I. siégeant à Paris. On fit ultérieurement parvenir ces propositions aux divers Comités nationaux de la C.E.I. et à Zurich, en janvier 1913, elles furent acceptées en principe. M. le Dr. R. T. Glazebrook, C.B. (*Directeur du National Physical Laboratory de Londres*) et M. le Prof. Paul Janet (*Directeur du Laboratoire central d'Électricité de Paris*) eurent l'obligeance d'entreprendre la rédaction finale des différentes propositions d'accord avec le Bureau of Standards de Washington et la Physikalisch-Technische Reichsanstalt de Berlin.

À Berlin, en septembre 1913, vingt-quatre pays étant représentés, les recommandations, dans leur rédaction finale, présentées par M. le Prof. Dr. E. Warburg (*Président de la Physikalisch-Technische Reichsanstalt de Berlin*), furent ratifiées par la C.E.I. dans sa Réunion plénière.

LONDRES, mars, 1914.

PRÉFACE DE LA DEUXIÈME ÉDITION.

L'objet de cette seconde édition n'est pas de changer le fond des recommandations primitives mais seulement d'en modifier la forme afin d'éviter toute ambiguïté ou possibilité de confusion.

Les recommandations telles qu'elles sont données dans ce rapport ont été approuvées par les Directeurs des Laboratoires nationaux de Londres, Paris et Washington. Grâce à l'entremise du Président du Comité suisse ce rapport fut soumis à l'examen de M. le Prof. Dr. E. Warburg.

LONDRES, mars, 1925.

* J. H. Dellinger—“Coefficient de variation de la résistance du cuivre avec la température.”
F. A. Wolff et J. H. Dellinger—“Conductivité électrique du cuivre commercial.”

International Electrotechnical Commission.

International Standard of Resistance for Copper.

Definitions:—

(a) A metal being taken in the form of a wire of any length and of uniform section, the *volume resistivity* of this metal is the product of its resistance and its section divided by its length.

(b) The *mass resistivity* of this metal is the product of its resistance per unit length and its mass per unit length.

(c) The volume resistivity (ρ), mass resistivity (δ) and density (d) are interrelated by the formula: $\delta = \rho d$.

Units adopted:—

For this publication, where not otherwise specified, the gramme shall be taken as the unit of mass, the metre as the unit of length, the square millimetre as the unit of area, and the cubic centimetre as the unit of volume. Hence the unit of volume resistivity here used is the ohm square millimetre per metre ($\frac{\text{ohm mm}^2}{\text{m}}$) and the unit of mass resistivity is the ohm gramme per metre per metre ($\frac{\text{ohm g}}{\text{m}^2}$).

I. STANDARD ANNEALED COPPER.

The following shall be taken as normal values for standard annealed copper:—

(1) At a temperature of 20° C. the volume resistivity of standard annealed copper is $1/58 = 0.017241\dots$ ohm square millimetre per metre ($\frac{\text{ohm mm}^2}{\text{m}}$).

(2) At a temperature of 20° C. the density of standard annealed copper is 8.89 grammes per cubic centimetre ($\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$).

(3) At a temperature of 20° C. the coefficient of linear expansion of standard annealed copper is 0.00017 per degree Centigrade.

(4) At a temperature of 20° C. the coefficient of variation of the resistance with temperature of standard annealed copper, measured between two potential points rigidly fixed to the wire, the metal being allowed to expand freely, is:

$$0.00393 = \frac{1}{254.45\dots} \text{ per degree Centigrade.}$$

(5) As a consequence, it follows from (1) and (2) that at a temperature of 20° C. the mass resistivity of standard annealed copper is $1/58 \times 8.89 = 0.15328\dots$ ohm gramme per metre per metre.

Commission Electrotechnique Internationale.

Spécification Internationale pour le Cuivre-Type Recuit.

Définitions:

(a) Un métal étant pris sous la forme d'un fil de longueur quelconque et de section uniforme, on appelle *résistivité* de ce métal le produit de sa résistance par sa section, divisé par sa longueur.

(b) On appelle *densité-résistivité* de ce métal le produit de sa résistivité par sa densité.

(c) La résistivité (ρ), la densité-résistivité (δ) et la densité (d) sont liées par la relation suivante: $\delta = \rho d$.

Conventions.

Dans ce qui suivra, on prendra, sauf spécification contraire, comme unité de masse le gramme, comme unité de longueur le mètre, comme unité de section le millimètre carré et comme unité de volume le centimètre cube. Il résulte de là que l'unité de résistivité employée ici est l'ohm millimètre carré par mètre ($\frac{\text{ohm mm}^2}{\text{m}}$) et l'unité de densité-résistivité est l'ohm gramme par mètre par mètre ($\frac{\text{ohm g}}{\text{cm}^2}$).

1. CUIVRE-TYPE RECUIT.

Les données suivantes seront prises comme valeurs normales pour le cuivre-type recuit:

(1) A la température de 20° C., la résistivité du cuivre-type recuit est de 1,58 = 0,017241... ohm millimètre carré par mètre ($\frac{\text{ohm mm}^2}{\text{m}}$).

(2) A la température de 20° C., la densité du cuivre-type recuit est de 8,89 grammes par centimètre cube ($\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$).

(3) A la température de 20° C. le coefficient de dilatation linéaire du cuivre-type recuit est de 0,000017 par degré Centigrade.

(4) A la température de 20° C., le coefficient de variation avec la température de la résistance du cuivre-type recuit, à masse constante et à dilatation libre, mesurée entre deux prises de potentiel rigidement attachées au fil, est de:

$$0,00398 = \frac{1}{254,45} \text{ par degré Centigrade.}$$

(5) En conséquence, il résulte de (1) et de (2) que, à la température de 20° C., la densité-résistivité du cuivre-type recuit est de $1,58 \times 8,89 = 0,15828$... ohm gramme par mètre par mètre.

II. COMMERCIAL COPPER.

(1) The conductivity of commercial annealed copper shall be expressed as a percentage, at 20° C., of that of standard annealed copper and given to approximately 0.1 per cent.

(2) The conductivity of commercial annealed copper is to be calculated on the following assumptions:—

- (a) The temperature at which measurements are to be made shall not differ from 20° C. by more than $\pm 10^\circ$ C.
- (b) The volume resistivity of commercial copper increases by 0.000068 ohm square millimetre per metre per degree Centigrade.
- (c) The mass resistivity of commercial copper increases by 0.00060 ohm gramme per metre per metre per degree Centigrade.
- (d) The density of commercial annealed copper at a temperature of 20° C. is 8.89 grammes per cubic centimetre.

This value of the density shall be employed in calculating the percentage conductivity of commercial annealed copper.

From these assumptions it follows that, if at a temperature of t° C., R_m is the resistance, in ohms, of a wire " l " metres in length weighing " m " grammes, the volume resistivity of the same copper is:—

$$\text{at } t^\circ \text{ C.} \dots\dots\dots \frac{R_m}{l \times 8.89} \text{ ohm square millimetre per metre, and}$$

$$\text{at } 20^\circ \text{ C.} \dots\dots\dots \frac{R_m}{l \times 8.89} + 0.000068 (20 - t) \text{ ohm square millimetre per metre.}$$

The percentage conductivity of this copper is therefore:—

$$100 \times \frac{1/58}{\frac{R_m}{l \times 8.89} + 0.000068 (20 - t)}$$

And, similarly, the mass resistivity of a wire of the same copper is:—

$$\text{at } t^\circ \text{ C.} \dots\dots\dots \frac{R_m}{l} \text{ ohm gramme per metre per metre, and}$$

$$\text{at } 20^\circ \text{ C.} \dots\dots\dots \frac{R_m}{l} + 0.00060 (20 - t) \text{ ohm gramme per metre per metre.}$$

The percentage conductivity is therefore:—

$$100 \times \frac{0.15928}{\frac{R_m}{l} + 0.00060 (20 - t)}$$

Note 1. The standard values given above under (I.) are the mean values resulting from a large number of tests. Amongst various specimens of copper of standard conductivity the density may differ from the standard by 0.5 per cent., plus or minus, and the temperature coefficient of resistance may differ from the standard by 1 per cent., plus or minus; but within the limits indicated in (II.) these differences will not affect the values of the resistance so long as the calculations are only carried to four significant figures.

II. Cuivre Industriel.

(1) La conductivité du cuivre recuit industriel sera exprimée à la température de 20° C. en pour cent de celle du cuivre-type recuit et cette valeur sera exprimée à 0,1 pour cent près.

(2) La conductivité du cuivre recuit industriel doit être calculée d'après les hypothèses suivantes :

- (a) L'écart entre la température à laquelle les observations doivent être prises et 20° C. n'excédera pas $\pm 10^\circ$ C.
- (b) La résistivité du cuivre industriel augmente de 0,000068 ohm millimètre carré par mètre par degré Centigrade.
- (c) La densité-résistivité du cuivre industriel augmente de 0,00060 ohm gramme par mètre par mètre par degré Centigrade.
- (d) La densité du cuivre recuit industriel à une température de 20° C. est de 8,89 grammes par centimètre cube.

Cette valeur de la densité doit être employée dans le calcul de la conductivité relative du cuivre recuit industriel.

Il résulte de ces hypothèses que, si, à une température de t° C., R est la résistance, en ohms, d'un fil ayant une longueur de " l " mètres et une masse de " m " grammes, la résistivité du même cuivre sera :

$$\text{à } t^\circ \text{ C.} \dots \frac{Rm}{\rho \times 8,89} \text{ ohm millimètre carré par mètre, et}$$

$$\text{à } 20^\circ \text{ C.} \dots \frac{Rm}{\rho \times 8,89} + 0,000068 (20 - t) \text{ ohm millimètre carré par mètre.}$$

La conductivité relative de ce cuivre est ainsi :

$$100 \times \frac{1/58}{\frac{Rm}{\rho \times 8,89} + 0,000068 (20 - t)}$$

Et, d'une façon semblable, la densité-résistivité du même fil est :

$$\text{à } t^\circ \text{ C.} \dots \frac{Rm}{\rho} \text{ ohm gramme par mètre par mètre, et}$$

$$\text{à } 20^\circ \text{ C.} \dots \frac{Rm}{\rho} + 0,00060 (20 - t) \text{ ohm gramme par mètre par mètre.}$$

La conductivité relative est ainsi :

$$100 \times \frac{0,15928}{\frac{Rm}{\rho} + 0,00060 (20 - t)}$$

Note I. Les valeurs normales données au paragraphe I. ci-dessus sont les valeurs moyennes déduites d'un grand nombre d'expériences. Parmi plusieurs échantillons de cuivre, possédant la conductivité normale, la densité peut différer de la densité normale de plus ou moins 0,5 pour cent et le coefficient de variation de la résistance avec la température peut différer du coefficient normal de plus ou moins 1 pour cent. Mais entre les limites indiquées au paragraphe II. ces écarts n'affectent pas les valeurs de la résistance à condition de limiter les calculs à quatre chiffres significatifs.

Note II. The constants at 0°C. of standard annealed copper deduced from the values given above for 20°C. are the following:—

Density at 0°C.	8.90 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$.
Coefficient of linear expansion per degree Centigrade ...	0.000017
Volume resistivity at 0°C.	1.588 ₁ microhm centimetres.
Coefficient at 0°C. of variation of volume resistivity 0.00426 ₂ per degree Centigrade.	
Coefficient at 0°C. of variation of resistance (at constant mass and free expansion) measured between two potential points rigidly fixed to the wire ...	
	$234.45 = 0.00426_2$ per degree Centigrade.

Note III. EXPLANATION OF TEMPERATURE COEFFICIENTS.

1. *Coefficient of variation of resistance at constant mass and free expansion with the temperature.*

If R_1 and R_2 are the resistances measured at the temperatures t_1 and t_2 of a uniform wire, between two potential points rigidly fixed to the wire when the current flows parallel to the axis of the wire, the coefficient of variation of resistance at constant mass and free expansion for the temperature t_1 , α_1 is defined by the formula:—

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha_1 (t_2 - t_1)]$$

2. *Coefficient of variation of the volume resistivity with the temperature.*

If ρ represents the volume resistivity of the wire, i.e., if the resistance R of the wire is equal to $\rho \frac{l}{S}$ (l = length of wire, S = section) and if, for the temperature t_1 the coefficient of variation of volume resistivity with the temperature is represented by β_1 , the same notation being used as before, the following is obtained:—

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \beta_1 (t_2 - t_1)]$$

If γ represents the coefficient of linear expansion of the metal, the following is approximately correct:—

$$\beta_1 = \alpha_1 + \gamma$$

3. *Coefficient of variation of the mass resistivity with the temperature.*

If δ represents the mass resistivity, i.e., if the resistance R of the wire is equal to $\delta \frac{l}{m}$, l being its length and m its mass, and if the coefficient of the variation of the mass resistivity with the temperature for the temperature t_1 is represented by β'_1 , the following is obtained:—

$$\delta_2 = \delta_1 [1 + \beta'_1 (t_2 - t_1)]$$

giving the approximate formula:—

$$\beta_1 = \alpha_1 - 2\gamma$$

Note II. Les constantes à zéro degré centigrade du cuivre-type recuit déduites des valeurs données ci-dessus pour 20° C. sont les suivantes :

Densité à 0°C.	8,90 $\frac{g}{cm^3}$.
Coefficient de dilatation linéaire, par degré Centigrade ...	0,000017
Résistivité à 0°C.	1,588 ₁ microhm centimètres.
Coefficient, à 0°C., de variation de la résistivité	0,00428 ₂ par degré Centigrade.
Coefficient, à 0°C., de variation de la résistance (à masse constante et à dilatation libre) mesurée entre deux prises de potentiel rigidement attachées au fil ...	$\frac{1}{234,45} = 0,00428_2$ ohm par degré Centigrade.

Note III. DÉFINITION DES COEFFICIENTS DE TEMPÉRATURE.

1°. *Coefficient de variation de résistance à masse constante et à dilatation libre en fonction de la température.*

Si R_1 et R_2 sont les résistances mesurées aux températures t_1 et t_2 sur un fil uniforme, entre deux prises de potentiel rigidement attachées au fil lorsque le courant circule parallèlement à l'axe du fil :

Le coefficient de variation de résistance à masse constante et à dilatation libre pour la température t_1 , α_1 , est défini par la relation :

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha_1 (t_2 - t_1)]$$

2°. *Coefficient de variation de la résistivité en fonction de la température.*

Si ρ désigne la résistivité du fil, c'est-à-dire si la résistance R d'un fil est égale à $\rho \frac{l}{S}$ (l longueur du fil, S section), en désignant par β_1 le coefficient de variation de résistivité en fonction de la température pour la température t_1 , on a en utilisant les mêmes notations que précédemment :

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \beta_1 (t_2 - t_1)]$$

Si γ désigne le coefficient de dilatation linéaire du métal, on a approximativement :

$$\beta_1 = \alpha_1 + \gamma$$

3°. *Coefficient de variation de la densité-résistivité en fonction de la température.*

Si δ représente la densité-résistivité, c'est-à-dire, si la résistance R du fil est égale à $\delta \frac{l^2}{m}$, l étant sa longueur et m sa masse, en désignant par β'_1 le coefficient de variation de la densité-résistivité en fonction de la température pour la température t_1 :

$$\delta_2 = \delta_1 [1 + \beta'_1 (t_2 - t_1)]$$

On a avec la relation approximative :

$$\beta'_1 = \alpha_1 - 2\gamma.$$