

TECHNICAL REPORT

RAPPORT TECHNIQUE

Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals

Guide concernant l'échauffement admissible des parties des matériels électriques, en particulier les bornes de raccordement



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2009 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester.

If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

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

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

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

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

- Electropedia: www.electropedia.org

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

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

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

Email: csc@iec.ch

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications CEI

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

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

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

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

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

- Electropedia: www.electropedia.org

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

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

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

Email: csc@iec.ch

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

TECHNICAL REPORT

RAPPORT TECHNIQUE

Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals

Guide concernant l'échauffement admissible des parties des matériels électriques, en particulier les bornes de raccordement

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

CK

ICS 29.020

ISBN 2-8318-1029-8

CONTENTS

FOREWORD	4
INTRODUCTION	6

Section 1: General

1 General	8
1.1 Scope and object	8
1.2 Reference documents	8
1.3 Definitions	9
1.4 Symbols	9

Section 2: Theory

2 General considerations concerning the nature of electric contact and the calculation and measurement of the ohmic resistance of contacts	10
2.1 Electric contacts and connection terminals	10
2.2 Nature of electric contact	10
2.3 Calculation of contact resistance	12
3 Ageing mechanisms of contacts and connection terminals	16
3.1 General	16
3.2 Contacts of dissimilar metals	17
3.3 Oxidation ageing mechanisms	19
3.4 Results concerning ageing of copper contacts	21
3.5 Usage and precautions to be taken in the use of contact materials	24
4 Calculation of temperature rise of conductors, contacts and connection terminals	25
4.1 Symbolic representations	25
4.2 Temperature rise ΔT_s of a conductor with respect to the temperature T_e of the surrounding medium	27
4.3 Temperature rise ΔT_o in the vicinity of the contact: temperature rise of connection terminals	28
4.4 Temperature rise of the elementary contact points	28

Section 3: Application

5 Permissible temperature and temperature rise values	29
5.1 Ambient air temperature θ_a	29
5.2 Temperature and temperature rise of various equipment components	30
5.3 Temperature and temperature rise of conductors connecting electrical equipment	38
5.4 Temperature and temperature rise of connection terminals for electrical equipment – Influence on connected conductors	39

6	General procedure to be followed for determining permissible temperature and temperature rise	40
6.1	Basic parameters.....	40
6.2	Method to be followed for determining maximum permissible temperature and temperature rise	40
Annex A	Numerical examples of the application of the theory and other data	42
Annex B	Physical characteristics of selected metals and alloys	45
Annex C	Physical characteristics of fluid dielectrics	46
Annex D	Information on the reaction of contact metals with substances in the atmosphere	47
Annex E	Temperature rise of a conductor cooled by radiation and convection in the vicinity of a terminal	48
Annex F	List of symbols used in this report	57
Annex G	Bibliography	59

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

GUIDANCE CONCERNING THE PERMISSIBLE TEMPERATURE RISE FOR PARTS OF ELECTRICAL EQUIPMENT, IN PARTICULAR FOR TERMINALS

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. In exceptional circumstances, a technical committee may propose the publication of a technical report of one of the following types:

- type 1, when the required support cannot be obtained for the publication of an International Standard, despite repeated efforts;
- type 2, when the subject is still under technical development or where for any other reason there is the future but no immediate possibility of an agreement on an International Standard;
- type 3, when a technical committee has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example "state of the art".

Technical reports of types 1 and 2 are subject to review within three years of publication to decide whether they can be transformed into International Standards. Technical reports of type 3 do not necessarily have to be reviewed until the data they provide are considered to be no longer valid or useful.

IEC 60943, which is a technical report of type 3, has been prepared by IEC technical committee 32: Fuses.

This consolidated version of IEC 60943 consists of the second edition (1998) [documents 32/142/CDV and 32/148/RVC] and its amendment 1 (2008) [documents 32/187/DTR and 32/188/RVC].

The technical content is therefore identical to the base edition and its amendment and has been prepared for user convenience.

It bears the edition number 2.1.

A vertical line in the margin shows where the base publication has been modified by amendment 1.

Annexes are for information only.

The committee has decided that the contents of the base publication and its amendments will remain unchanged until the maintenance result date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

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

INTRODUCTION

- a) The temperature rise encountered in electrical assemblies as a result of the various losses in the conductors, contacts, magnetic circuits, etc. is of growing importance as a result of the development of new techniques of construction and operation of equipment.

This development has been particularly significant in the field of assemblies, where numerous components dissipating energy (contactors, fuses, resistors, etc.), in particular modular devices are found within enclosures of synthetic materials which are somewhat impermeable to heat.

This temperature rise results in a relatively high temperature of the basic elements constituting the electric contacts: a high temperature favours oxidation at the contact interface, increases its resistance and thereby leads to further heating, and thus to an even higher temperature. If the component material of the contact is unsuitable or insufficiently protected, the contact may be irreparably damaged before the calculated useful life of the equipment has expired.

Such temperature rises also affect connection terminals and the connected conductors, and their effects should be limited in order to ensure that the insulation of the conductors remains satisfactory throughout the life of the installation.

- b) In view of these problems, this report has been prepared with the following objectives:
- to analyze the various heating and oxidation phenomena to which the contacts, the connection terminals and the conductors leading to them are subjected, depending on their environment and their arrangement;
 - to provide elementary rules to product committees to enable them to specify permissible temperatures and temperature rises.
- c) Attention is drawn to the precautions to be taken for sets of components when parts are grouped together in the same enclosure.

The attention of users should be drawn particularly to the fact that the temperature rise of terminals permitted by particular switchgear standards results from conventional situations during type tests; these can differ appreciably from the situations met with in practice, which have to be taken into account, particularly because of the temperatures permitted by the insulation of the conductors which may be connected to the terminals under normal conditions.

- d) Attention is drawn to the fact that in the relevant product standards, the permissible temperature and temperature rise for the external terminals are measured during conventional type tests and therefore they may not reflect the actual situation likely to occur in normal use.

Suitable precautions should then be adopted to avoid exposure to temperatures that may affect the life of materials adjacent to the terminals of components.

In this case, it is essential to distinguish the concept of "external ambient temperature" which prevails outside the enclosure from that of "the temperature of the fluid surrounding a part" which comprises the external ambient temperature plus the internal temperature rise due to the parts. These concepts, as well as other complementary concepts such as the thermal resistance of an enclosure, are dealt with in clause 5 and explained by means of numerical examples.

In order to facilitate complete calculation, this report links up the temperature of the fluid surrounding a component to the external ambient temperature by the introduction of the concept of "coefficient of filling" and gives a numerical example (5.2.3.2) which specifies the values of the coefficient of filling to be used in several practical cases.

The quantities involved in calculating contact constriction resistance are subject to wide variations due to the physical conditions and degree of contamination of the surface in contact. By calculation alone, therefore, the contact resistance can be estimated to an accuracy of no better than an order of magnitude.

More precise and more accurate values should be obtained by direct measurement on given items of electrical equipment, because in practice it is often the case that other incalculable degradation mechanisms predominate.

This report is not meant to give guidance on the derating of components.

It is strongly advised that the reference literature quoted at the end of this report be studied before attempting to apply the data to a practical problem.

GUIDANCE CONCERNING THE PERMISSIBLE TEMPERATURE RISE FOR PARTS OF ELECTRICAL EQUIPMENT, IN PARTICULAR FOR TERMINALS

Section 1: General

1 General

1.1 Scope and object

This report is intended for guidance in estimating the permissible values for temperature and temperature rise of component parts of electrical equipment carrying current under steady state conditions.

This report applies to electrical power connections and materials adjacent to them.

This report is concerned with the thermal effects of currents passing through connections, therefore there are no voltage limits to its application.

This report is only applicable when referred to in the appropriate product standard.

The extent and manner to which the contents of this report are used in standards is the responsibility of individual Technical Committees.

Whenever "permissible" values are stated in this report, they mean values permitted by the relevant product standard.

The present report is intended to supply:

- general data on the structure of electric contacts and the calculation of their ohmic resistance;
- the basic ageing mechanisms of contacts;
- the calculation of the temperature rise of contacts and connection terminals;
- the maximum "permissible" temperature and temperature rise for various components, in particular the contacts, the connection terminals and the conductors connected to them;
- the general procedure to be followed by product committees for specifying the permissible temperature and temperature rise.

1.2 Reference documents

IEC 60050(441):1984, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 441: Switch-gear and controlgear and fuses*

IEC 60085:1984, *Thermal evaluation and classification of electrical insulation*

IEC 60216-1:1990, *Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials – Part 1: general guidelines for ageing procedures and evaluation of the test results*

IEC 60364-4-42:1980, *Electrical installations of buildings – Part 4: Protection for safety - Chapter 42: Protection against thermal effects*

IEC 60694:1996, *Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards*

IEC 60721-2-1:1982, *Classification of environmental conditions – Part 2: environmental conditions appearing in nature. Temperature and humidity*

IEC 60890:1987, *A method of temperature-rise assessment by extrapolation for partially type-tested assemblies (PTTA) of low voltage switchgear and controlgear*

IEC 60947-1:1988, *Low-voltage switchgear and controlgear – Part 1: General rules*

1.3 Definitions

Definitions of terms used in this report may be found in the International Electrotechnical Vocabulary. For the purposes of this technical report, the following terms also apply:

1.3.1

ambient air temperature θ_a

the temperature, determined under prescribed conditions, of the air surrounding the complete device [IEV 441-11-13]

NOTE For devices installed inside an enclosure, it is the temperature of the air outside the enclosure.

1.3.2

contact (of a mechanical switching device)

conductive parts designed to establish circuit continuity when they touch and which, due to their relative motion during an operation, open or close a circuit or, in the case of hinged or sliding contacts, maintain circuit continuity [IEV 441-15-05]

NOTE Do not confuse with "IEV 441-15-06 Contact (piece): one of the conductive parts forming a contact."

1.3.3

connection (bolted or the equivalent)

two or more conductors designed to ensure permanent circuit continuity when forced together by means of screws, bolts, or the equivalent [3.5.10 of IEC 60694]

1.4 Symbols

A list of symbols used in this report is given in annex F.

Section 2: Theory

NOTE This theory applies to both "contacts" and "connections" as defined in 1.3.2 and 1.3.3. For convenience, only the word "contact" only is used in this section to cover both applications.

2 General considerations concerning the nature of electric contact and the calculation and measurement of the ohmic resistance of contacts

2.1 Electric contacts and connection terminals

Electric contact, in its simplest and most general configuration, results from contact established between two pieces of (usually metallic) conducting material. In the case of connection terminals, these are the terminal itself and the conductor which is connected to it.

The active zone is the contact "interface" which is the region where the current passes from one piece to the other. It is in this area that the contact resistance occurs, causing heating by Joule effect, and it is also where ageing occurs through chemical reaction with the surrounding atmosphere.

2.2 Nature of electric contact

When one piece of metal is applied to another, contact is not made over the whole apparent contact area, but only at a certain number of points called "elementary contacts".

The effective total cross-sectional area of these contacts is equal to the effective contact area S_a ¹⁾ if the possible presence of impurities is ignored (dust, etc.) at the contact interface.

There is also a fine layer of air or of oxide normally present, the effect of which upon the contact resistance will be examined later (see 2.3).

In the following, for ease of calculation and for a better understanding of the contact mechanisms, the simplifying assumption is made that there are n elementary contacts on the apparent contact area, uniformly distributed, of average constant radius a (see figure 1). The average distance between these elementary contacts is l .

The effective contact area is then:

$$S_a = n \pi a^2$$

1) For an explanation of the symbols used in this report, see annex F.

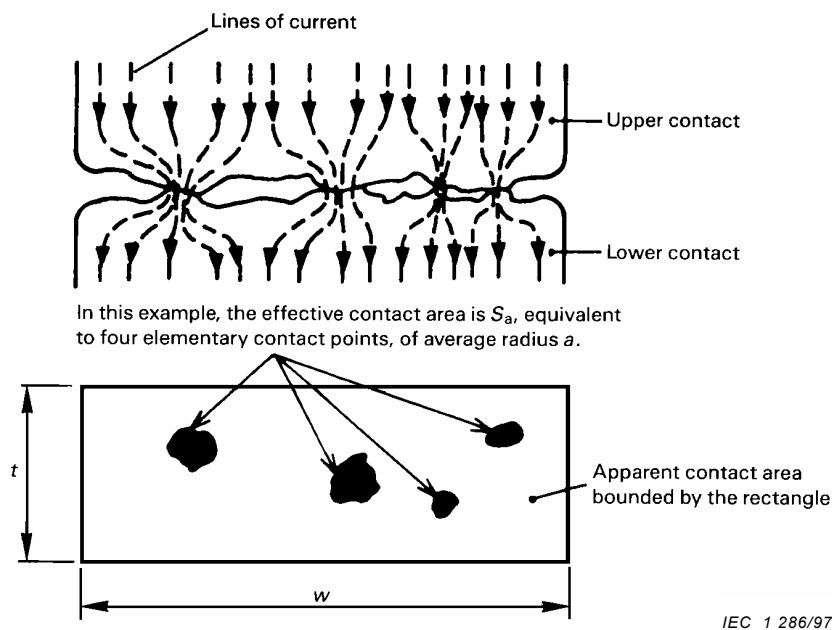


Figure 1 – Illustration of apparent contact and effective contact areas

The contact area S_a depends upon how hard the contacts are pressed against each other, i.e. upon the force applied, the surface state of the contacts, and the hardness of the material used.

For the forces normally found in electrical technology, the contact area is, in practice, the area over which the force applied reaches the ultimate strength of the contact material characterised by the "hardness" of that material.

In fact, the asperities on each of the two surfaces before they are brought into contact and which are due to previous preparation of the surface are of small dimension (of the order of 1/100 mm) and are crushed even by small forces of the order of 0,1 N.

Assuming that the pressure exerted upon the contact area is equal to the contact hardness of the metal (H), then the following equation is obtained:

$$\frac{F}{S_a} = \xi H$$

However, this equation applies only for a contact force of $F \geq 50$ N, in fact:

$$S_a = n\pi a^2 = \frac{F}{\xi H}$$

where ξ is a dimensionless "coefficient of flatness" dependent upon the state of the surfaces in contact, usually having a value of between 0,3 and 0,6 for normal forces, but which can be much smaller after extensive polishing of the contact surfaces against each other.

As a result, the elementary contact radius a is given by the equation:

$$a = \sqrt{\frac{F}{n\pi\xi H}} \quad (1)$$

The number n of elementary contacts can be worked out approximately by the formula:

$$n = n_k H^{0,625} F^{0,2} \quad (2)$$

where $n_k \approx 2,5 \times 10^{-5}$ (SI units)

The above expression gives only the order of magnitude of the number of elementary contacts. Values of n_k can differ significantly from the value estimated, for example between $0,5 \times 10^{-5}$ and 30×10^{-5} (SI units).

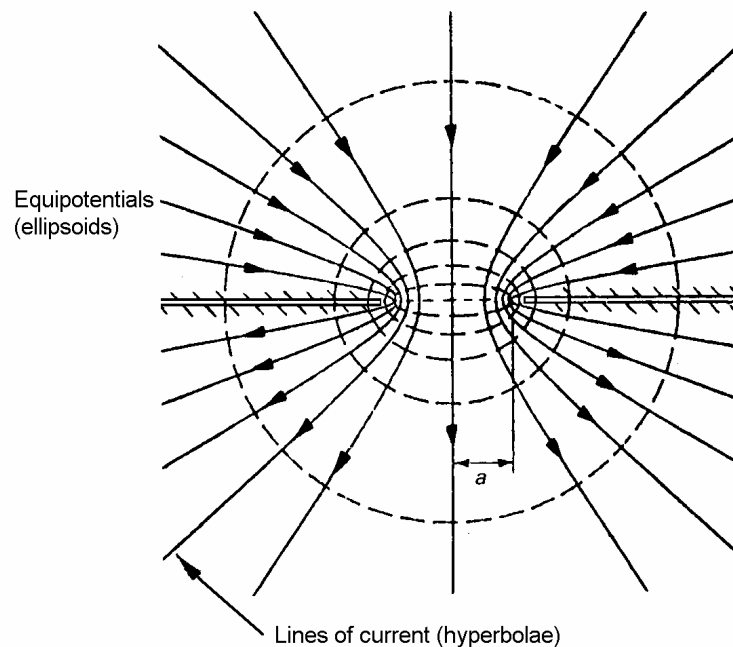
2.3 Calculation of contact resistance

Contact resistance is made up of two components:

- constriction resistance, due to the drawing together of the lines of current as they pass through the elementary contacts;
- film resistance, corresponding to the film of oxide or of adsorbed molecules at the interface.

2.3.1 Calculation of the constriction resistance

Consider (see figure 2) an idealised elementary contact of radius a . If the electrical conductors are large in relation to the elementary contact, the lines of current are hyperbolae with foci located at the ends of the elementary contact diameter and the equipotential surfaces are flattened ellipsoids of the same foci.



IEC 1 287/97

Figure 2 – Equipotentials and lines of current at an elementary contact point

The resistance $R_{(a,l)}$ between the point of contact (heavy broken line in figure 2) and the semi-ellipsoid of major semi-axis l (l being the average distance between neighbouring elementary contacts and ρ the resistivity of the metal) is equal to half the contact resistance, and is written:

$$R_{(a,l)} = \frac{\rho}{2\pi \cdot a} \arctan \frac{\sqrt{l^2 - a^2}}{a}$$

If l is large compared with a , which is the more common case:

$$R_{(a,l)}(l/a \rightarrow \infty) = \frac{\rho}{4a}$$

since the constriction resistance is the sum of both halves

$$R_{(e)} = \frac{\rho}{2a} \quad (3)$$

For an actual contact comprising n relatively widely spread elementary contact points, the constriction resistance is thus:

$$R_e = \frac{\rho}{2na} \quad (4)$$

2.3.2 Calculation of the film resistance

The elementary contact points generally do not have a corrosion-free interface. Indeed, any initially pure metal surface becomes covered with a molecular layer of oxygen, leading in a few minutes to the formation of a homogeneous layer of oxide a few nanometres thick. If this layer is sufficiently compact and uniform, it protects the metal to some extent, the oxidation can then stop and the metal is "passivated"; this is particularly the case with aluminium and stainless steel at ordinary temperatures.

For other metals (copper, nickel and tin in the presence of oxygen; silver in the presence of sulphurous gases), the formation of this first layer of reaction product produced by oxidation or corrosion slows up the subsequent reaction which nevertheless continues, but more and more slowly.

For certain other metals (iron), the "oxidation" speed is more or less constant because the surface is not protected by the layer formed.

The main formulae for surface chemical reactions giving the thickness s formed as a function of time t and thermodynamic temperature T are contained in annex D for different metals.

They are derived from the general formula:

$$s = X \cdot \exp\left(-\frac{w}{2kT}\right) \cdot \sqrt{t} \quad (5)$$

If the activation energy w is expressed in electronvolts, it is necessary to multiply w by $1,6021 \times 10^{-19}$ J/eV. X is a constant and k is the Boltzmann constant.

This thin layer of oxide does not present a purely ohmic resistance to the passage of the current, such as could be evaluated by the formula:

$$\frac{\rho \times \text{length}}{\text{cross-sectional area}}$$

The electrons can in fact pass through it by a "tunnel-effect" mechanism.

The "tunnel resistivity" σ_o (*surface resistivity*), which is used to characterize the conductive properties of this layer, is expressed in Ωm^2 (see *table 1 for typical values*). *Tunnel resistivity* depends on the nature of the oxide (or other products of reaction with the atmosphere) and its thickness. Its thickness generally does not exceed 10 nm.

If the layer of "oxide" covers the actual contact area S_a uniformly, the apparent resistance R_i between the two faces is written:

$$R_i = \frac{\sigma_o}{S_a}$$

In the case of n elementary contacts of radius a , the resistance R_i , due to the layer of oxide at the interface, is expressed by the equation:

$$R_i = \frac{\sigma_o}{\text{total area in contact}} = \frac{\sigma_o}{n \pi a^2} \quad (6)$$

Table 1 – Typical values of tunnel resistivity

Metal	State	σ_o Ωm^2
Copper	New	2×10^{-12} to 3×10^{-11}
	Oxidised	10^{-10}
	Tinned	10^{-12} to 4×10^{-11}
Silver		$4,6 \times 10^{-13}$ to 4×10^{-12} exceptionally up to $2,5 \times 10^{-11}$
Aluminium		7×10^{-11} to 10^{-9}

The values obtained are low for new contacts. The minimum value of $4,6 \times 10^{-13}$ for silver corresponds to the limit thickness of two adsorbed mono-molecular layers of oxygen, i.e. $2 \times 0,272\text{ nm} = 0,54\text{ nm}$.

2.3.3 Expression of the total contact resistance

The contact resistance R_c is the sum of the constriction resistance R_e (equation (4)) and the film resistance R_i (equation (6)), i.e:

$$R_c = \frac{\rho}{2na} + \frac{\sigma_0}{n\pi a^2} \quad (7)$$

If n and a in this equation are replaced by their values:

$$n = n_k H^{0,625} F^{0,2} \text{ with } n_k \approx 2,5 \times 10^{-5} \text{ (SI units)}$$

$$a = \sqrt{\frac{F}{n\pi\xi H}} \text{ with } \xi = 0,45$$

we obtain the following expression for R_c :

$$R_c = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi\xi}{n_k}} H^{0,1875} F^{-0,6} + \sigma_0 \xi H F^{-1}$$

This formula, applied to the different contact metals, gives the values of k_1 and k_2 shown in table 2.

If one metal is thinly plated onto another, the hardness must be taken as that of the plating and the resistivity as that of the base metal.

In the case of contacts of dissimilar metals, the overall resistance is the average of the resistance calculated using the constants for each metal.

Table 2 – Typical values of contact resistance constants, calculated for relatively clean surfaces (For substitution in: $R_c = k_1 F^{-0,6} + k_2 \sigma_0 F^{-1}$)

Metal	Constriction resistance k_1 $\times 10^{-6}$	Film resistance k_2 $\times 10^6$
Copper	90	247
Brass	360	450
Aluminium	130	135
Almelec	150	135
Silver	81	225
Tin	400	22,5
Nickel	420	585
Silvered copper	88	225
Tinned copper	57	22,5
Tinned aluminium	93	22,5
Silvered brass	310	225
Tinned brass	200	22,5

2.3.4 Electrical resistance of contacts when new

Tinned copper contacts theoretically show the lowest resistance compared with other kinds of contacts. However, this is only true provided two conditions are met: the layer of tin must be sufficiently thin to prevent its resistivity from being involved, and sufficiently thick for the hardness involved to actually be that of the tin. In practice, the resistivity obtained in the case of new tinned contacts is comparable with that of silvered copper and slightly less than that of copper. However, in the case of tinned contacts of the flexible type or those subject to vibration, account must be taken of "fretting corrosion" phenomena on the layer of tin, mentioned in 3.5.

Constriction resistance is particularly high in the case of tin and nickel, which rules out the use of these materials in the solid state.

Film resistance is high in the case of nickel and nickel-plated copper, which may be admissible in certain cases, bearing in mind the good corrosion resistance of nickel in corrosive atmospheres (battery rooms, atmospheres containing H₂S etc.).

2.3.5 Measurement of contact resistance

Contact resistance measurement is useful either for development tests or as routine tests to check production by comparison with a specimen which passed the temperature-rise test. Contact resistance is usually measured by injecting a d.c. current through the junction (so as to avoid effects of inductance), and measuring the resulting voltage drop across the junction.

For comparison purposes, it is important to measure the voltage drop at a defined location.

Measuring the contact resistance with a current much smaller than the normal current in service could give incorrect values, in particular when spring-loaded contacts have been operating on "no-load".

In addition, the voltage of the test supply should be sufficient to break down any possible surface layer, without exceeding the working voltage of the equipment under test. Care should be taken to avoid errors due to thermo-electric effects.

3 Ageing mechanisms of contacts and connection terminals

3.1 General

The ageing of closed electric contacts not subjected to arc erosion (the case with terminals in particular) is essentially due to the reaction of the metals with the surrounding environment at the contact interface.

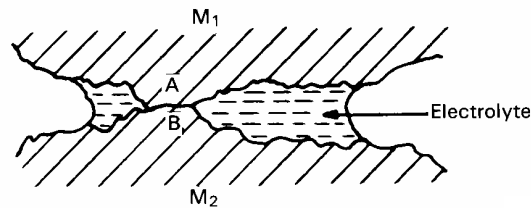
This reaction can be:

- of electrochemical origin (corrosion): as with bi-metallic contacts having incompatible electrochemical potentials in the presence of significant humidity (> 50 % r.h.);
- of chemical origin: the oxidation being due to the ambient medium (oxygen in the air, sulphurous vapours such as H₂S or SO₂).

These two aspects are covered in this report.

In addition, there are thermo-mechanical effects, involving stress relaxation, creep and dimensional variations, which are also thermally activated, and have the effect of reducing contact force and increasing contact resistance, but these are not included in this report. This complex degradation process is in principle difficult to model, because it is dependent on design and materials of manufacture. For certain devices, for example connectors, the effects are so complicated and varied, that no general simple temperature-dependent degradation curve exists.

3.2 Contacts of dissimilar metals



IEC 1 288/97

Figure 3 – Contact between dissimilar metals in the presence of humidity (water adsorption)

Corrosion of contacts of dissimilar metals M₁ and M₂ will occur if the following conditions are met:

- different metals – The difference in electrochemical potential between terminals A and B before contact must in practice be in the order of 0,35 V or more;
- presence of an electrolyte – The film of water adsorbed on the surfaces in contact as a result of ambient humidity can play this role;
- presence of an oxidising agent – The term "oxidising" is taken here in the general sense of transfer of electrons, whose presence is necessary to depolarise the cell formed and allow the passage of current. Ambient air is sufficient;
- contact closed, in order to conduct the corrosion current.

The potential differences appearing at the contact surfaces of M₁ and M₂ in figure 3 with the contacts open are given in table 3.

Table 3 – Voltages developed on bimetallic junction

Values in millivolts

negative pole positive pole	Silver	Nickel	Monel (30% Cu)	Cu-ni (70-30)	Copper	Silver solder	Bronzes*	Red bronze	Brasses*	Stainless steel*	Tin	Sn-Pb eutectic	Sn-Ag solder	Lead	Cast iron	Mild steel	Al alloys*	Aluminium	Cadmium	Galvanised Fe	Zinc alloys*	Zinc	Mg alloy*
	0	150	170	190	190	210	230	250	260	330	470	480	510	560	710	720	770	770	790	1090	1100	1110	1590
Nickel		0	020	040	040	060	080	100	110	160	320	330	360	410	530	570	620	620	640	940	950	960	1440
Monel (30 % Cu)			0	020	020	040	060	080	090	160	300	310	340	390	540	550	600	600	620	920	930	940	1420
Cu/Ni (70/30)				0	0	020	040	060	070	140	280	290	320	370	520	530	580	580	600	900	910	920	1400
Copper				0	0	020	040	060	070	140	260	290	320	370	520	530	580	580	600	900	910	920	1400
Silver solder						0	020	040	050	120	260	270	300	350	500	510	560	560	580	880	890	900	1380
Bronzes*							0	020	030	100	240	250	280	330	480	490	540	540	560	860	870	880	1360
Red bronze								0	010	080	220	230	260	310	460	470	520	520	540	840	850	860	1340
Brasses*									0	070	210	220	250	300	450	460	510	510	530	830	840	850	1330
Stainless steel*										0	140	150	180	230	380	390	440	440	460	760	770	780	1280
Tin											0	010	040	090	240	250	300	300	320	620	630	640	1120
Sn-Pb eutectic												0	030	080	230	240	290	290	310	610	620	630	1110
Sn-Ag solder													0	050	200	210	260	260	280	580	590	600	1080
Lead														0	150	160	210	210	230	530	540	550	1030
Cast iron															0	010	060	060	080	380	390	400	880
Mild steel																0	050	050	070	370	380	390	870
Al alloys*																	0	0	020	320	330	340	820
Aluminium																		0	020	320	330	340	820
Cadmium																			0	300	310	320	800
Galvanised Fe																				0	010	020	500
Zinc alloys*																					0	010	490
Zinc																						0	450
Mg alloy*																							0

NOTE The above values are for guidance only. More exact values may apply for specific grades of metals and the value specified by the supplier should be used, if available. Otherwise consult specialized textbooks.

* Typical values.

Acceptable combinations to avoid corrosion should have potential differences less than 350 mV; the lower, the better.

It can be seen that the potential differences developed between dissimilar contacts of the principal contact materials are low, apart from silver-tin and silver-aluminium combinations which should be avoided, particularly in corrosive atmospheres.

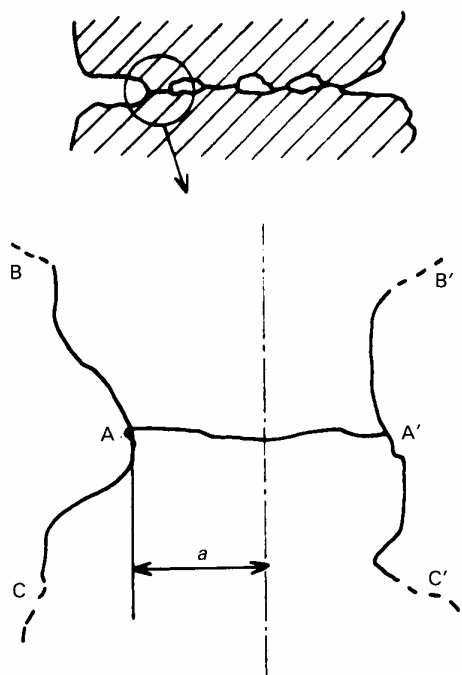
3.3 Oxidation ageing mechanisms

Since each terminal or contact in fact consists of the joining of numerous small elementary contact points, it is here that the corrosion mechanisms operate. There are two processes of oxidation, both of which may take place simultaneously:

- the side surfaces of the elementary contact points are progressively attacked, reducing the cross-section of the conducting area;
- the layer of oxide of surface resistivity σ_0 gradually thickens

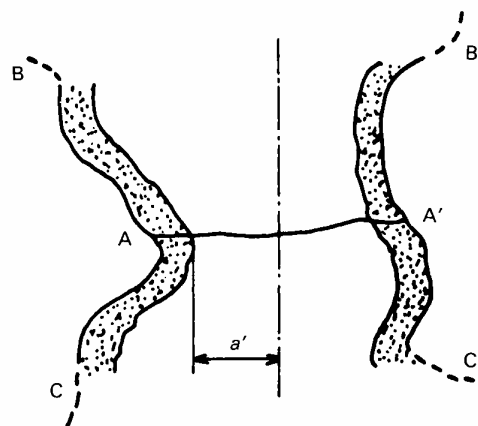
These two mechanisms are considered below.

3.3.1 Reduction in cross-section of the elementary contacts



IEC 1 289/97

Figure 4 – Elementary contact point of radius a



IEC 1 290/97

Figure 5 – Oxidation of an elementary contact point

On a non-oxidised contact an elementary contact point of radius a is considered (see figure 4).

The contact surface AA' contains relatively little air, which is partly expelled by the closure of the contact, and is sufficient only to produce slight oxidation.

By contrast, the side surfaces such as BC and $B'C'$ are exposed to the air and are subject to progressive oxidation.

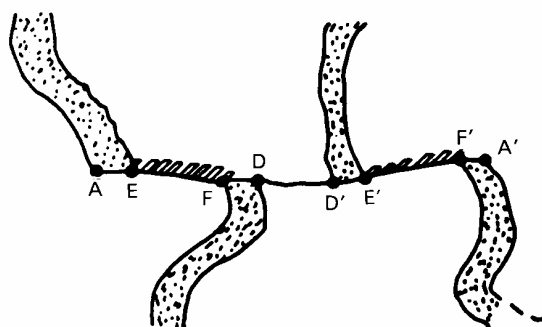
As a result, the elementary contact radius gradually decreases and the contact resistance rises (see figure 5).

In fact, the reduction in cross-section to which this type of oxidation leads is so slow that several decades would be needed to bring about a major deterioration of the contact, even at high temperatures. However, experience shows that this is not so in practice and that another physical phenomenon must be involved; in fact, it is frequently found that contacts subjected to current cycles deteriorate more quickly than those carrying a constant current. These cycles result in differential thermal expansion at the contact area which leads to micro-movements of the faces in contact with each other.

Because of these small relative movements, which may also be caused by electrodynamic vibrations or mechanical shock, the contact width AA' shown in figure 5 may be reduced to DD' (see figure 6). The surfaces AD and $D'A'$ (initially protected) are now exposed to corrosion and, when the contacts return to their initial position, the non-oxidised region in contact is very small.

This apparently causes a considerable increase in the effect of oxidation at the point of contact. The effects of micro-movement are thus equivalent in this case to an acceleration of the oxidation.

This phenomenon is obviously more serious on electrically closed contacts (see 1.3.2) than on tightened-down connection terminals.



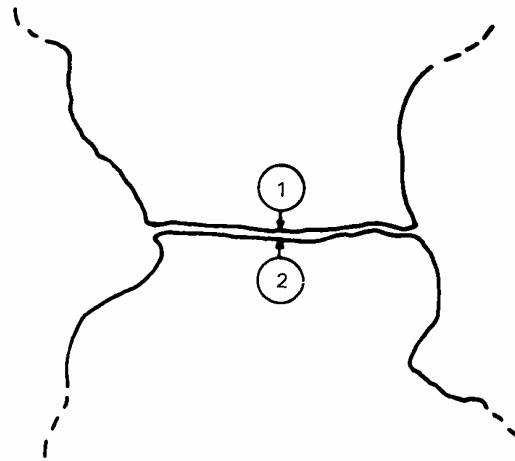
IEC 1 291/97

Figure 6 – Influence of a relative micro-movement on the oxidation of an elementary contact

3.3.2 Growth in the layer of oxide at the contact interface

The second ageing mechanism is as follows (see figure 7).

It is assumed that, as a result of the contact movements (stress, vibration, shock) and through diffusion through the interstices of the two surfaces (1) and (2), the oxygen has partial access to these surfaces and creates an additional film of oxide between the two parts in contact, which increases the surface resistivity of the layer of oxide at the interface and, consequently, increases the contact resistance.



IEC 1 292/97

Figure 7 – Oxidation of the opposite faces of a contact

If the contact surfaces were assumed to be freely exposed to the ambient air, the contact resistance would very quickly (in a few hours) reach prohibitive values even at very low contact temperatures. It is clear that the surfaces in contact offer each other mutual protection which slows down the oxidation speed, the molecules of oxygen in this case only being able to diffuse very slowly.

3.3.3 Discussion and synthesis of these two ageing processes

The reduction of the area in electric contact and the increase in surface resistivity are two ageing phenomena which may occur simultaneously.

They depend:

- in general, upon the structure of the contact and the nature of its atmosphere;
- more particularly:
 - upon the intensity of the stresses leading to micro-movements, such as thermal stresses due to the current cycles or to electrodynamic variations and vibrations,
 - upon the concentration of the oxidising element in the contact atmosphere.

In practice, it is somewhat difficult to identify the part played by each of these two phenomena, and the analysis can only take into account one mechanism at a time. However, the results are so close for each of the hypotheses that it is possible to draw a common conclusion, whatever the manner in which the ageing of the contact or terminal occurs.

3.4 Results concerning ageing of copper contacts

When the dominant ageing mechanism is oxidation of the copper by the oxygen in the air, it is possible to construct a mathematical model representing the behaviour of the contacts as a function of time; a model which can be validated by short duration experimental tests. The main results which can be drawn from this analysis are given below; in general, it is possible to separate the influence of the temperature rise due to the actual current flowing between the contacts from the influence of the ambient temperature (temperature of the fluid surrounding the contact).

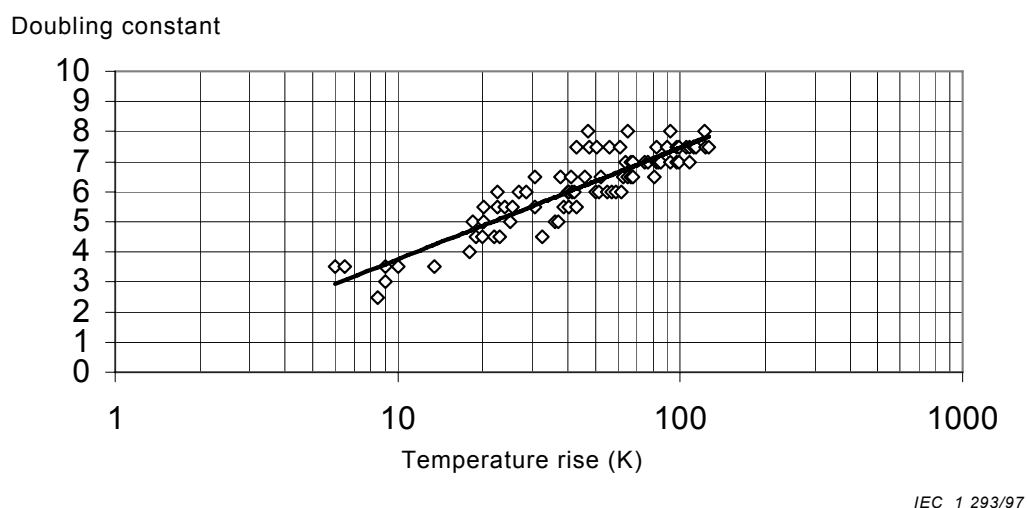
Other degradation mechanisms can significantly affect the ageing rate. These are not considered in the following analysis, because they are at present not amenable to mathematical treatment. The method below can be used in initial paper studies, but it is emphasized that it is necessary to make developmental tests, because in many cases the other mechanisms predominate.

3.4.1 Influence of temperature rise

A contact or terminal subject only to aerial oxidation will have its life reduced by one half if its temperature rise increases by $\Delta_i(K)$, Δ_i being given as a function of the initial temperature rise (empirical results, such as those in figure 8, assist this estimation). ΔT_i is the temperature rise of the component relative to the surrounding fluid.

In general, when the temperature rise of a contact or terminal passes from a value ΔT_{i1} to a value ΔT_{i2} , the life is multiplied by an ageing factor K_i which for moderate differences between ΔT_{i1} and ΔT_{i2} is expressed as:

$$K_i = 2^x \quad \text{where} \quad x = \frac{\Delta T_{i1} - \Delta T_{i2}}{\Delta_i} \quad (8)$$



**Figure 8 – Doubling constant Δ_i as a function of temperature rise
(empirical results on copper contacts)**

Example: Consider, for example, a copper electrical contact in air having an initial temperature rise of 35 K. The doubling constant Δ_i is approximately 6 K. If we wish to overload this contact so that its initial temperature rise is 45 K, all other things being equal, its life will be reduced by a factor

$$2^{\frac{35-45}{6}} = 0,315$$

i.e. its life is divided by approximately 3,2.

NOTE It is unreliable to make calculations based upon an extrapolation of these results outside the region of experimental values.

3.4.2 Influence of ambient temperature

All other things being equal, a contact or terminal will have its life reduced by half if the temperature of the ambient medium surrounding it increases by $\Delta_e(K)$. Empirical results for Δ_e are given in figure 9 as a function of the initial temperature rise.

In general, when the temperature of the fluid surrounding a contact or a terminal passes from value T_{e1} to value T_{e2} , the life is multiplied by an ageing factor K_e which is expressed as:

$$K_e = 2^y \quad \text{where} \quad y = \frac{T_{e1} - T_{e2}}{\Delta_e}$$

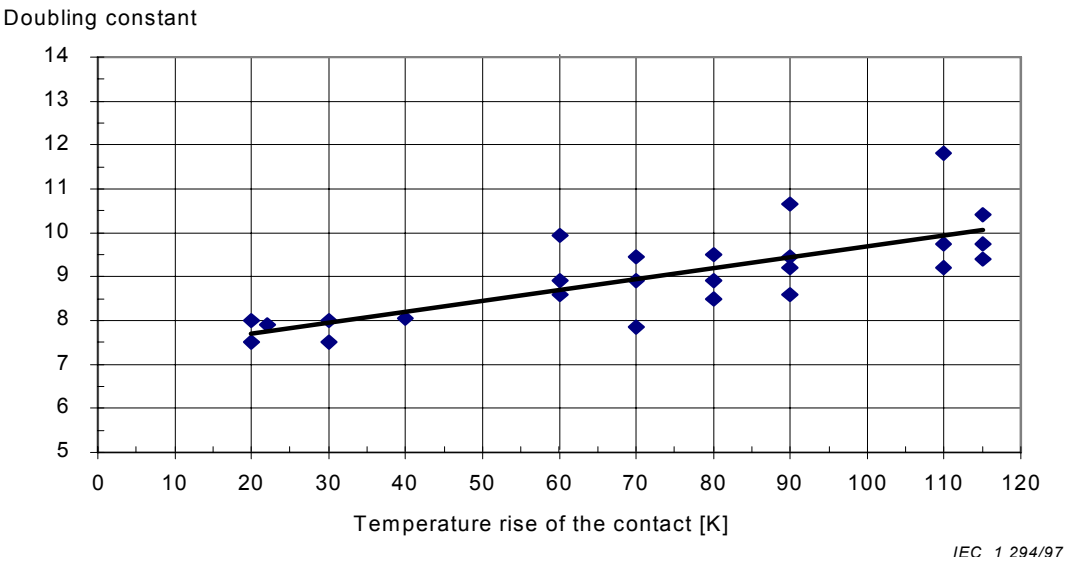


Figure 9 – Doubling constant Δ_e expressed as the required temperature rise of the surrounding fluid, as a function of the temperature rise ΔT_i of the contact (contact material: copper, fluid: air)

NOTE It is unreliable to make calculations based upon extrapolation of these results outside the region of experimental values.

Thus, for this copper electrical contact with a temperature rise ΔT_i of 35 K an increase of $\Delta_e = 8$ K in the temperature of the surrounding air will reduce its life by half.

3.4.3 Combined influence of the temperature rise of the contact and the temperature rise of the surrounding fluid

When the temperature rise of a contact or terminal and the temperature of the surrounding medium vary simultaneously, the two effects combine and the overall ageing factor K_{th} is expressed as follows:

$$K_{th} = 2^{[x+y]} \tag{9}$$

3.5 Usage and precautions to be taken in the use of contact materials

Bare copper tends to deteriorate considerably with time and temperature. It is unwise to exceed 60 °C to 85 °C (value to be determined according to the use of the metal in the contacts and according to the nature of the atmosphere), and to use this material for contacts remaining closed for long periods at their rated thermal current (as on incomer circuit-breakers). In this latter case, silver-plated copper, the ageing of which is slow in non-sulphurous atmospheres, is to be preferred.

As an interesting example, we may calculate the resistance of copper and of nickel-plated, tinned and silver-plated copper contacts for a contact force of 10 N and after 1 000 h exposure to ambient air (for calculation formula: see 2.3.2).

The following values are obtained:

Table 4 – Comparative values of contact resistance

Material	Resistance in mΩ
Bare copper	20
Nickel-plated copper	35
Tinned copper	6,8
Silver-plated copper	0,3

From the table 4, the advantages of tinning or silver plating are clear. Nickel-plating only appears interesting for polluted atmospheres where silver-plating would be unsuitable.

Considering the different possibilities in more detail:

- Nickel-plated copper is suitable in the case of corrosive atmospheres or high temperature contacts, a frequent situation in certain power stations or in railway transport.
- Tinned copper and tinned aluminium are the preferred materials for low voltages. The low hardness of tin is interesting in so far as it gives low contact resistances. By contrast, it is not possible to carry out frequent openings and closures on such contacts for fear of damaging the tin plating. A standard use of tinned metal is found in the contacts of fuses, the fuse-links of which are replaced (to restore the supply after the fuse has operated) creating a new contact surface. Special attention should be given when the temperature of tin exceeds 105 °C, especially when mated with silver-plated contacts, because of the creep phenomena which occur above this level.
- For flexible or bolted tinned contacts subject to vibration, a "fretting corrosion" phenomenon may occur on the tin plating, rapidly leading to the destruction of the contact, even in the case of low currents compared with the rated current; it may be preferable in this case to use bare, silver-plated or nickel-plated contacts.
- Silver is an excellent contact material which ages slowly except in atmospheres with sulphurous fumes.
- Aluminium cannot be used unless its layer of insulating alumina is removed by brushing with grease or by other special treatment recommended by the manufacturer.

4 Calculation of temperature rise of conductors, contacts and connection terminals

4.1 Symbolic representations

Figure 10 represents, as a theoretical example, the temperature variation along two conductors forming a butt contact.

In the case of real contacts (e.g. a conductor leading to a terminal), the temperature variation along the conductor is generally not symmetrical.

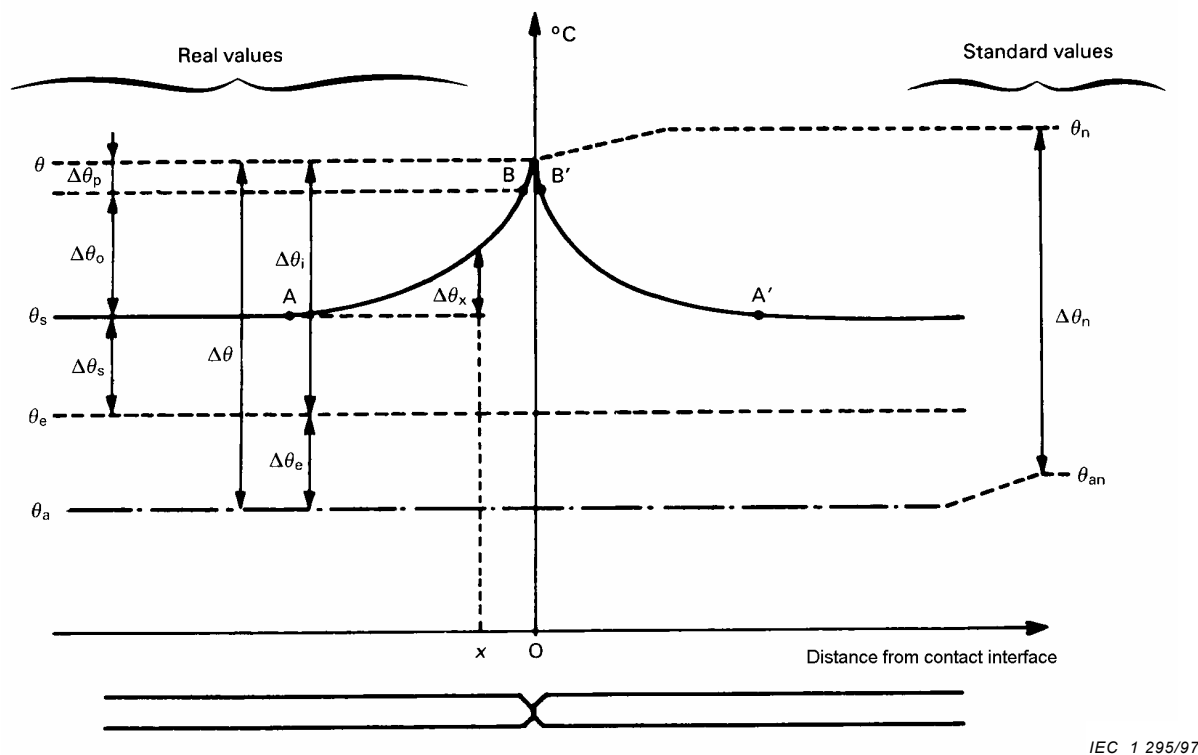
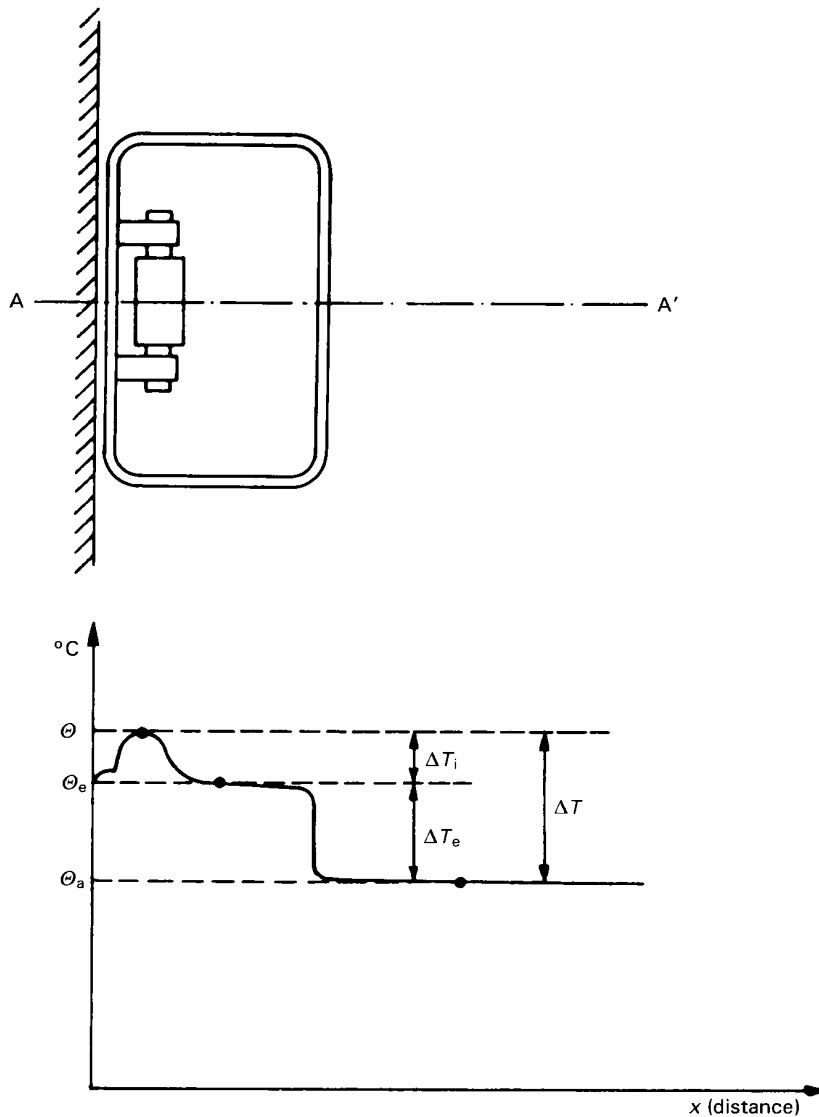


Figure 10 – Symbols used for the representation of temperatures and temperature rises; example chosen: butt contacts

IEC 1 295/97

Figure 11 illustrates a practical case of fuses inside a junction box.



IEC 1 296/97

Figure 11 – Temperature and temperature rise along the axis AA', in a junction box containing a fuse

Let us now consider the definition of the main parameters contributing to the maximum temperature θ of the contact or the component concerned.

This maximum temperature θ is the sum of the following terms:

$$\theta = \theta_a + \Delta T_e + \Delta T_s + \Delta T_o + \Delta T_p$$

where

θ_a is the external ambient temperature, the standard definition of which is given in 1.3.1.

ΔT_e is the temperature rise of the air surrounding the contact or component considered, in relation to the ambient temperature θ_a ; if the component is inside an enclosure, the temperature of the air surrounding the component will thus be:

$$\theta_e = \theta_a + \Delta T_e$$

ΔT_s is the actual temperature rise of the conductor (temperature θ_s (°C) or T_s (K)) in the absence of the contact. Electrical contacts and conductors are, in the majority of cases, cooled by radiation and natural convection, and sometimes by forced convection (air speed over about 0,3 m/s to 0,4 m/s, as in the case of overhead lines or conductors installed out of doors);

ΔT_o is the temperature rise in the vicinity of the contact; in fact, the heat in joules produced by Joule effect in the contact resistance is dissipated along the periphery of the conductor, giving a decreasing temperature distribution as shown in segments BA and B'A' of the curve in figure 10. The maximum temperature rise occurs when x approaches zero;

ΔT_p represents a supplementary temperature rise at the elementary contact points, due to the opening out of the thermal flux lines from the interfaces between the elementary contact points. The magnitude of this item is generally small compared with the previous ones.

The formulae for these items are given below.

4.2 Temperature rise ΔT_s of a conductor with respect to the temperature T_e of the surrounding medium

The temperature rise of a horizontal infinite single-core conductor in free air in relation to the ambient temperature is expressed by the general relationship:

$$\Delta T_s = \frac{\left[(T_e + \Delta T_s - 273,15) \alpha + 1 \right] R_0 I^2 + r \varphi_s S_r}{Bl \sigma \epsilon \frac{(T_e + \Delta T_s)^4 - T_e^4}{\Delta T_s} + \frac{\lambda}{D_h} N_u} \quad (10) \text{ [Ref.3]}$$

NOTE All these temperatures T are expressed on the Kelvin scale.

The dimensionless Nusselt number N_u used in the above formula depends upon the method of cooling.

With natural convection, for the general case of indoor contacts and terminals, we have:

$$N_u = 0,8 (G_r P_r)^{0,05} + 0,35 (G_r P_r)^{0,27} \quad (11a)$$

where

$$G_r P_r = \frac{M^2 \beta_g C_p D_h^3 \Delta T_s}{\mu_d \lambda} \quad (11b)$$

In general, the temperature rises calculated from equation (10) are proportional to a power between 1,5 and 2 of the current I , dependent upon surface conditions. (An average value of 1,67 is used in some illustrative calculations below.)

With forced convection, which is the case with outdoor type contacts and terminals such as line or substation connections, the following equation shall be used:

$$N_u = 0,65 R_E^{0,2} + 0,23 R_E^{0,61} \quad (12a)$$

where

$$R_E = \frac{MvD_h}{\mu_d} \text{ (the Reynolds number)} \quad (12b)$$

The temperature rises are then proportional to the square of the current. For the numerical calculation of ΔT_s it is noted that this term is also in both sides of the equation; its solution is achieved by successive approximations from any value taken for ΔT_s . The convergence is very rapid and a few repetitions are generally sufficient to obtain ΔT_s to within at least 1 K.

The numerical values to be used in the calculations are shown in annexes B and C.

NOTE 1 In the calculation of the product $G_r P_r$, the quantity $\frac{M^2 \beta g C_p}{\mu_d \lambda}$ depends only upon the fluid (and upon g) and can be expressed, for atmospheric air, by the approximate experimental formula [Ref.3]:

$$3,912 \times 10^{19} (273,15 + \theta_e)^{-4,69}$$

NOTE 2 Similarly, in calculating the Reynolds number, the quantity $\frac{M}{\mu_d}$ can be expressed by the relationship:

$$1,644 \times 10^9 (273,15 + \theta_e)^{-1,78}$$

4.3 Temperature rise ΔT_o in the vicinity of the contact: temperature rise of connection terminals

The equations relating to cooling by radiation and natural convection are given in annex E.

4.4 Temperature rise of the elementary contact points

Finally there is an additional temperature rise at the elementary contacts, due to the opening out of the lines of thermal flux from the interface of the elementary contacts. The value of this term is generally low compared with the previous ones; it is expressed as:

$$\Delta T_p = \frac{I^2}{2\pi^2 n^2 \lambda_c} \left(\frac{\rho}{4a^2} + \frac{\sigma_o}{a^3} \right) \quad (13) \text{ [Ref.1]}$$

where

$$a = \sqrt{\frac{F}{n\pi\xi H}}$$

$$n = n_k H^{0,625} F^{0,2}$$

$$n_k = 2,5 \times 10^{-5} \text{ (SI units)}$$

Section 3: Application

5 Permissible temperature and temperature rise values

5.1 Ambient air temperature θ_a

The definition of ambient air temperature is found in 1.3.1. Distribution of ambient air temperatures are published in IEC 60721-2-1.

NOTE For heated indoor installations (assuming that the switching threshold of thermostats is set at 10 °C) the mean annual temperature would be approximately 15 °C. These values, especially the mean annual value, are particularly useful in estimating correctly the ageing of contacts.

Values to be considered:

For the overall installation, apart from "extremely warm dry climates", the normal ambient temperature condition θ_{an} often considered in the IEC standards is as follows:

- the ambient temperature does not exceed 40 °C. Moreover, some national standards state that the annual average does not exceed 20 °C;
- minimum values are also considered in product standards, but are not of importance with regard to permissible temperature rise;
- the above temperature limits apply at altitudes not exceeding 2 000 m. At altitudes exceeding 2 000 m the following observations apply:

If an air-cooled unit is to be used at an altitude between 2 000 m and 4 000 m, the temperature rises measured during a normal test at an altitude below 2 000 m shall not exceed those in table 6 reduced by 1 % for every 100 m in excess of 2 000 m in altitude of the site of the installation. This correction is generally unnecessary because the higher temperature rise at altitude due to the reduced cooling effect of the air is compensated by the reduced maximum ambient temperature at altitude (see table 5). Consequently the final temperature is relatively unchanged at a given current.

Table 5 – Maximum ambient air temperature

Altitude m	Maximum ambient air temperature °C
0 – 2 000	40
2 000 – 3 000	30
3 000 – 4 000	25

- remark concerning solar radiation:

In the case of units for outdoor installation, the effects of solar radiation must be taken into account and appropriate measures taken if necessary (roofing protection, forced ventilation, etc.); this does not mean that the unit concerned can continuously conduct its nominal thermal current under all sunlight conditions without certain heating limits being exceeded.

5.2 Temperature and temperature rise of various equipment components

5.2.1 Factors on which temperature rise values are based

The values given in table 6 are applicable to equipment operating at steady-state operating at continuous rating. They have been assessed as follows.

a) For the permissible temperature rises (see table 6, column A):

- either from long duration tests corresponding to a normal life of about 20 to 40 years, and hence from the values confirmed by experience;
- or from short duration tests at high rating, the lifetime at normal rating having been deduced from the rules of ageing defined in 3.4.1 and 3.4.2.

In this case, the mean temperature θ_e of the air surrounding the component corresponds to the standard mean ambient temperature θ_{an} of 20 °C.

b) For the maximum temperatures not to be exceeded (see table 6, column B), consideration of the properties of the materials and components (for example, creep of tin at over 105 °C), the ambient temperature to be taken into account is the maximum temperature θ_{an} of 40 °C.

The considered values are only given as indications and as a starting point. For a more precise determination it is necessary to take into account:

- the operating conditions (continuous, cyclic, for 8 h, etc.) and the thermal time constants of the components;
- the special operating modes (bimetallic strips which can attain high temperatures, contacts close to fuses, etc.);
- the type of installation (inside one or more enclosures);
- ambient temperature ranges different from those defined in 5.1 (e.g. tropical zones with ambients possibly up to 50 °C);
- the methods of use, and in particular of the conductor-terminal connections.

5.2.2 Maximum temperatures and permissible temperature rises

It is necessary to distinguish between two groups of values:

Column A

- Those corresponding to components susceptible to ageing, but whose rapid destruction temperature is high; for example, the temperature rise of copper contacts is limited to 35 K even though they can withstand a temperature of almost 150 °C without immediate destruction. It is evident that in this case the ambient temperature to be used is the mean temperature during the life of the component, i.e. 20 °C in most cases.
- For components subject to ageing such as contacts, the period of normal life will therefore depend upon the temperature rise specified in the standards, and on a temperature θ_e of 20 °C of the medium surrounding the component.

Column B

- Those corresponding to components whose temperature must not exceed a certain value, otherwise very rapid, if not immediate, destruction will occur: in this case, the ambient temperature to be taken into account is 40 °C. This applies for example to certain insulation materials, tinned contacts (creep point of tin: 105 °C), springs, etc.

Table 6 below gives typical values used in switch- and fuse-gear standards, making the distinction between the maximum permissible temperature rise at $\theta_c = \theta_{an} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the maximum permissible temperature for $\theta_{an} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

For individual items of equipment the values may be slightly different, due to the special needs of each individual item. For precise values, reference should be made to the appropriate product standard.

Table 6 – Typical values of temperature rise and temperature limits*

Description of component			Column A Maximum temperature rise K ^u ($\theta_{an} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Column B Maximum temperature °C ($\theta_{an} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Remarks	
Nature of contact ^{a, c, e}	Spring contacts	Copper and copper alloys uncoated – in OG ^t – in NOG ^t – in oil Tinned in OG, NOG ^t , oil ^{b e}	35 ^p 75 ^q 40 50			
		Silver- ^{b, s} or nickel-plated ^b – in OG ^t or NOG ^t – in oil For contactors, in oil	75 ^q 50	105	Deterioration of the oil	
	Bolted connections	Copper, aluminium, and their alloys, uncoated – in OG ^t – in NOG ^t Tinned ^b in OG or NOG ^t , Silver- ^{b, s} or nickel-plated ^b – in OG or NOG ^t – in oil For contactors, in oil	60 ^q 75 ^q 75 ^q	105 100 105	Creep point of tin Deterioration of the oil Deterioration of the oil	
		Terminals ^{d, f, r}	To be connected to exterior conductors by screws or bolts Uncoated Tinned ^b Silver- or nickel-plated ^b	60 ^q 75 ^q	105	Creep point of tin
		Other contact materials		g, h		
Metallic parts	In contact with	Insulation class ⁱ : Y A E B F H enamel: oil base synthetic acting as springs at position of a tin soldering		90 105 120 130 155 180 100 120 ^j 100 ^k	Ageing of insulation Permanent deterioration Breaking	
Oil for oil-immersed switchgear ^{l, m} All parts which are metallic or of insulating material in contact with oil, except for contacts ^m				90 100	Deterioration of the oil	
Electric motors and resistance			n			
Surfaces ^o	Manual control components – metallic – non-metallic Expected to be touched in normal operation but not to be held continuously in the hand – metallic – non metallic Accessible, but not designed to be touched in normal operation – metallic – non metallic			55 65	IEC 60364-4-42 :1980	
				70 80		
				80 90		
* For notes, see following page.						

NOTES

- a For connection units in vacuum, the limit values of temperature and temperature rise do not apply to the components in the vacuum. The other components must not exceed the temperature and temperature rise values given in Table 6. Maximum acceptable temperature rises in NOG^t are the same for silver-plated or nickel-plated copper as for bare copper, because of the absence of oxygen.
- b The following are considered as silver contacts: solid silver contacts, contacts with inlaid silver strips, silver-plated contacts. In general, for all plated metals, the quality of the plating must be such that a protective layer remains in the contact zone:
- 1) after the making and breaking tests (if any);
 - 2) after the permissible short period current test;
 - 3) after mechanical test,
- in accordance with the correct specification for each material. If not, the contact must be considered as "bare". For nickel-plated contacts, the contact resistance and contact life will be equivalent to those of silver if the temperature rise is kept within the prescribed limits. This can be achieved by higher contact forces, for example.
- c When engaging parts have different coatings, or one part is of bare metal, the permissible temperatures and temperature rises shall be:
- 1) for spring-contacts, those of the surface material having the lowest value permitted in Table 6;
 - 2) for bolted connections, those of the surface material having the highest value permitted in Table 6.
- d Values of the tightening torque for screws are given in the appropriate product standard, for example Table IV of IEC 60947-1:1988.
- e For fuses, the temperature rise to be considered can be increased to take into account the proportion of heat from the fuse element transmitted by conduction to the contacts. Refer to the appropriate specifications for these components.
- f The temperature and temperature rise values are valid even if the conductor connected to the terminals is not protected by a covering.
- g When materials other than those shown in Table 6 are used, their properties shall be taken into consideration.
- h Limited by the necessity of not damaging surrounding parts.
- i The classification of insulation is given in IEC 60085:1984.
- j Temperature shall not reach such a value that the elasticity of the material is reduced.
- k This applies when soldering is the main method of joining the two parts; otherwise, this limit may be increased to 110 °C.
- l The measurement must be made in the upper part of the oil.
- m It is recommended that particular attention be paid to questions of vaporisation and oxidation when using oil with a low flash-point.
- n Regulations in force.
- o For manual control components located inside enclosures which are accessible upon opening the enclosure, and which are not used frequently, higher temperatures may be allowed.
- The distinction between metallic and non-metallic surfaces depends on the thermal conductivity of the surface. Coats of paint and varnish are not considered to modify the thermal conductivity of the surface. On the other hand, certain plastic coatings can noticeably reduce the thermal conductivity of a metallic surface and allow it to be considered as non-metallic.
- This rule does not apply to materials which comply with standards which state that the temperature or temperature-rise limits for accessible surfaces are fixed.
- p This limit can be increased to:
- 45 K – for low voltage supply equipment downstream from meter boxes or rising mains;
 - for contactors operating on continuous service.
 - 65 K – for contactors operating on 8 h, intermittent or temporary service, where conditions of use are those permitted in the appropriate product standards.
- q Limited by the necessity of causing no damage to adjacent parts and in particular to the insulation in contact.
- r For terminals intended for connection to insulated conductors, see 5.3.2.
- s For some low-voltage industrial equipment, the temperature rise is limited only by the need not to damage surrounding parts.
- t NOG = Not oxidizing gas; OG = Oxidizing gas.
- u Higher values can be admitted, respecting in any case Note q, if:
- products standards admit higher values,
 - or
 - manufacturers can prove a correct long term ageing behaviour of the contacts. In this case, agreement on the acceptable values should be reached between the user and the manufacturer.

5.2.3 The influence of variations in the temperature of the medium surrounding the component

If the temperature θ_e in the immediate vicinity of a component varies:

- either due to use in a climate different from that defined in 5.1.1,
- or due to the unit being used inside an enclosure,

it is necessary to take into account:

- either new permissible temperature-rise values,
- or a new rated thermal current value.

The new values shall be established by taking into account:

- a) those components the maximum temperatures of which shall not be exceeded (see table 6, column B);
- b) those components the maximum temperature rise of which may be exceeded on condition that there is an acceptable increase in the allowable ageing (see table 6, column A).

The following hypotheses lead up to equation (14):

- temperature rises are proportional to a power p of the current, between 1,5 and 2,0 dependent upon the emissivity of the surface (cooling by radiation and natural convection ¹⁾; an average value of 1,67 has been used in certain calculations in this document;
- in one case considered, the rate of ageing of the contacts was multiplied by two if the temperature rise ΔT_i increased by 6,5 K;
- in the case considered, the rate of ageing was multiplied by two if the mean temperature θ_e of the medium surrounding the contact increases by 8,5 K.

In other words, 1 h of operation at ambient θ_e with temperature rise ΔT_i represents K_{th} hours of operation under normal conditions θ_{an} , ΔT_n , K_{th} being given by the formula:

$$K_{th} = 2^{\frac{\theta_e - \theta_{an}}{8,5} + \frac{\Delta T_i - \Delta T_n}{6,5}} \quad (14)$$

A numerical example in annex A using equation (14) illustrates that the effect of a short period of overtemperature cannot be compensated by running for a similar period at reduced load at a lower temperature.

5.2.3.1 The condition where the unit contains components, the maximum permissible standard temperature θ_n of which may be attained with a maximum ambient temperature θ_{an} of 40 °C.

In this case, for any higher ambient temperature θ_a , the rated thermal current I'_{th} of the unit shall be such that:

$$I'_{th} = I_{th} \frac{\theta_n - \theta_a}{\theta_n - 40}^{1/p} \quad \text{if} \quad \theta_a > 40 \text{ °C} \quad (15)$$

where $1,5 < p < 2,0$ depending on the emissivity of the surface.

1) With radiation and forced convection the temperature rises are roughly proportional to the square of the current.

Numerical values of C_{th} are given in table 7 for a variety of ambient temperatures and maximum permissible temperatures, taking a nominal value of $p = 1,67$.

Table 7 – Correction factors (C_{th}) for rated current

θ_n (°C) θ_a (°C)	55	65	70	75	80	90	100	105
45	0,78	0,87	0,90	0,91	0,92	0,94	0,95	0,95
50	0,52	0,74	0,78	0,82	0,84	0,87	0,90	0,90
55	0,00	0,58	0,66	0,71	0,75	0,81	0,84	0,85

The temperature θ_n to be used is the maximum permissible temperature of the component having the lowest value in the specifications for the unit considered; it is obvious that the choice shall be made taking into account the main components of the unit and not the ancillaries (push-buttons, accessible parts which can be touched, etc.) for which special precautions can be taken.

5.2.3.2 Where the unit is enclosed; assuming as previously that the unit contains components, the maximum permissible temperature θ_n of which can be attained with $\theta_a = 40$ °C.

If the unit is put into an enclosure, the temperature of the air inside the enclosure being θ_e the maximum current I'_{th} in continuous service will be:

$$I'_{th} = I_{th} \frac{\theta_n - \theta_e}{\theta_n - 40}^{1/p} \quad \text{if} \quad \theta_e > 40 \text{ °C} \quad (16)$$

Consideration of θ_e :

θ_e depends upon ambient temperature θ_a outside the cell (generally measured 1 m from the walls), on the thermal power transmitted by internal heat sources by radiation and convection, and on the ventilation of the cell.

For an enclosure with little or no ventilation the following relation between θ_e and θ_a can be admitted:

$$\theta_e = \theta_a + X \Delta\theta$$

where

$\Delta\theta$ is the temperature difference between the higher sources of heat and ambient air temperature θ_a ;

X is a filling coefficient representing the concentration of the material within the enclosure.

Experience shows that important heat sources (busbars, fuses) generally reach 100 °C and that $X = 0,25$ corresponding to normal filling and leading to an air temperature rise of the enclosure of 20 K with respect to the ambient temperature.

Hence, in these conditions:

$$\theta_e = \theta_a + X (100 - \theta_a), X \text{ being equal to } = 0,25$$

From the above hypotheses the correction factor C_{th} is calculated. The rated current (I'_{th}) for using this unit in an enclosure may be obtained from:

$$I'_{th} = C_{th} \times I_{th}$$

where

$$C_{th} = \left(\frac{\theta_n - (1 - X) \theta_a - 100X}{\theta_n - 40} \right)^{1/p} \quad (17)$$

Tables 8 and 9 give values of correction factor C_{th} , as a function of θ_n and θ_a , for $X = 0,25$ and for $X = 0,3$ taking a nominal value for $p = 1,67$.

Table 8 – Nominal current correction coefficient (C_{th}) with $X = 0,25$

θ_n (°C) \ θ_a (°C)	55	65	70	75	80	90	100	105
0	1,52	1,33	1,28	1,24	1,21	1,17	1,14	1,13
10	1,28	1,17	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,07
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30	0,66	0,81	0,84	0,87	0,88	0,91	0,92	0,93
40	–	0,58	0,66,	0,71	0,75	0,81	0,84	0,85
45	–	0,44	0,56	0,63	0,68	0,75	0,80	0,82
50	–	0,25	0,44	0,54	0,61	0,70	0,75	0,77
55	–	–	0,29	0,44	0,53	0,64	0,71	0,73

It is also convenient to use the lowest value of θ_n corresponding to the unit considered in the relevant product standard, to the exclusion of minor components whose maximum permissible temperatures are low (pushbuttons, accessible surfaces, etc.) which shall be protected by other means.

NOTE 1 For a very full enclosure, as found particularly in LV, $X = 0,3$ can be taken, which gives:

Table 9 – Nominal current correction coefficient (C_{th}) with $X = 0,3$

θ_n (°C) \ θ_a (°C)	55	65	70	75	80	90	100	105
0	1,36	1,22	1,19	1,16	1,14	1,12	1,10	1,09
10	1,12	1,07	1,06	1,05	1,04	1,04	1,03	1,03
20	0,83	0,90	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,96
30	0,45	0,71	0,76	0,80	0,82	0,86	0,89	0,89
40	–	0,47	0,58	0,65	0,70	0,77	0,81	0,82
45	–	0,31	0,47	0,56	0,63	0,71	0,77	0,79
50	–	0,00	0,34	0,47	0,56	0,66	0,72	0,75
55	–	–	0,17	0,36	0,47	0,60	0,69	0,71

NOTE 2 The correction factor C_{th} should be systematically applied only when the actual current value for which the permissible temperature θ_n is obtained is not known. This current value can be higher than the rated current of the unit.

5.2.3.3 Where the unit contains components whose maximum permissible temperature is not attained for $\theta_a = 40^\circ\text{C}$

In this case, if the average ambient temperature exceeds 20°C for long periods, it is possible to increase the maximum permissible temperature rises without the ageing of the components concerned being appreciably increased.

Recalling that, all other things being equal:

- the ageing rate of these copper contacts is multiplied by two if the temperature rise ΔT_e increases by $6,5\text{ K}$;
- the ageing rate is multiplied by two if the temperature θ_e increases by $8,5\text{ K}$;
- the total temperature rise ΔT comprises the temperature rise ΔT_e of the internal atmosphere plus the temperature rise ΔT_i of the component considered in relation to that atmosphere.

Thus the following equation is obtained

$$\Delta T = \Delta T_e + \Delta T_i$$

If ΔT_e increases and becomes $\Delta T'_e$ for example, it is necessary to decrease ΔT_i to a value $\Delta T'_i$. This decrease is less than the increase ΔT_e , so that the new value of ΔT , $\Delta T' = \Delta T'_e + \Delta T'_i$ may finally be increased.

A numerical example in annex A calculates the acceptable increase in total temperature rise of a contact when operating in an enclosure at a higher internal ambient temperature.

5.3 Temperature and temperature rise of conductors connecting electrical equipment

5.3.1 Recommended connecting conductors for temperature rise tests

In principle, the connecting conductors shall be arranged and connected up as in normal service and their cross-sectional area shall be such that no additional heating or cooling is caused to components of the equipment being tested (notably their connection terminals).

Recommendations for suitable conductors for temperature rise tests can be found in the relevant product standard.

For more general rules for calculating the temperature of the air surrounding the contacts in an enclosure, see appropriate product standards (e.g. IEC 60890).

5.3.2 Temperature rise and its effect on organic insulating materials. Thermal ageing

Most organic materials deteriorate when heated. The amount of deterioration depends on the absolute value of the temperature and the time of exposure at that temperature.

It has been shown that the rate of deterioration within a temperature range appropriate for the material may be expressed as a logarithmic function of the reciprocal of absolute temperature in accordance with the Arrhenius law for chemical rate of reaction:

$$\log(\text{insulation life}) = A' + \frac{A}{(273 + T_i)}$$

where A and A' are constants for a specific degradation reaction and T_i is insulation temperature in degrees Celsius.

Where more than one degradation process exists, the equation will be more complicated.

Established types of insulating materials have been classified on the basis of long operating experience but in recent times a wide range of polymers have been introduced and used.

An Arrhenius thermal deterioration curve for any material of specific composition may be determined by the procedures described in IEC 60216-1 and the life established.

The following should be noted:

- a) the characteristics of polymers are determined by their composition. To ensure that the characteristics of the polymer are maintained, control needs to be ensured throughout the production process and only chemicals with known composition used;

- b) the deterioration process of a polymer can be affected by materials with which it is in contact and the shape of the object to which the polymer is applied. It is recommended that experiments made to determine the Arrhenius curve for insulating materials should be made using appropriate samples, e.g. lengths of insulated-coated busbars;
- c) temperature and moisture content can affect the mechanical properties of some types of polymeric insulation. Some are flexible at high temperatures when they can withstand mechanical shocks, whereas at lower temperatures the same materials can be brittle and crack when subjected to mechanical shocks such as those associated with short-circuits;
- d) account should be taken of any annealing of the conductor during the moulding or curing of the polymer;
- e) insulation life may also be affected by mechanical stress, vibration and environmental effects.

5.3.3 Busbars placed in parallel

When several bars are placed in parallel, the apparent overall resistivity increases, due to the skin effect and the effect of proximity of alternating current.

Table 10 gives typical values of the coefficient by which to multiply the permitted 50 Hz to 60 Hz current flowing in a single busbar, in order to obtain the permitted current in a multiple bar, made up of several elementary bars on edge, for the same temperature rise in both cases.

Table 10 – Correction coefficients; bars edgewise in parallel spacing approximately equal to bar thickness

Dimensions in millimetres

No. of bars in parallel	Size of bars										
	Thickness 50 mm		Thickness 80 mm			Thickness 100 mm			Thickness 160 mm		
	6,3	10	6,3	10	16	6,3	10	16	6,3	10	16
2	1,77	1,72	1,72	1,65	1,61	1,70	1,60	1,50	1,60	1,49	1,45
3	2,27	2,25	2,24	2,12	2,03	2,17	2,02	1,90	2,02	1,95	1,80
4	2,93	2,70	2,69	2,60	2,42	2,64	2,40	2,24	2,40	2,20	2,10

NOTE Similar tables covering other sizes are available from the International Copper Development Association, and for aluminium from the suppliers of aluminium busbars.

5.4 Temperature and temperature rise of connection terminals for electrical equipment – Influence on connected conductors

5.4.1 Useful formulae resulting from the above theory

The theory concerning temperature rise of terminals is given in clause E.1.

However, the equations for the case most frequently encountered - cooling by radiation and natural convection as given in E.1 – are generally too complex for practical application unless computer modelling is employed, e.g. as given in E.2.

5.4.2 Numerical examples

Examples of numerical application of Section 3 are given in annex A.

6 General procedure to be followed for determining permissible temperature and temperature rise

For a given piece of equipment it is normal to try to determine its optimum conditions of use as a function of its own characteristics and working conditions: environment, current, rating and duty.

6.1 Basic parameters

The basic parameters to be taken into account for use of the equipment are as follows:

- the rated characteristics of the equipment as defined in its reference standard;
- the service rating of the equipment (continuous, intermittent, etc., as defined in the appropriate product standard) and possibly its expected life;
- the environmental conditions: is the component in question in a hot atmosphere, inside one or more enclosures? Is the ambient medium polluted or not?

6.2 Method to be followed for determining maximum permissible temperature and temperature rise

The general method to be followed is represented in the chart of figure 12.

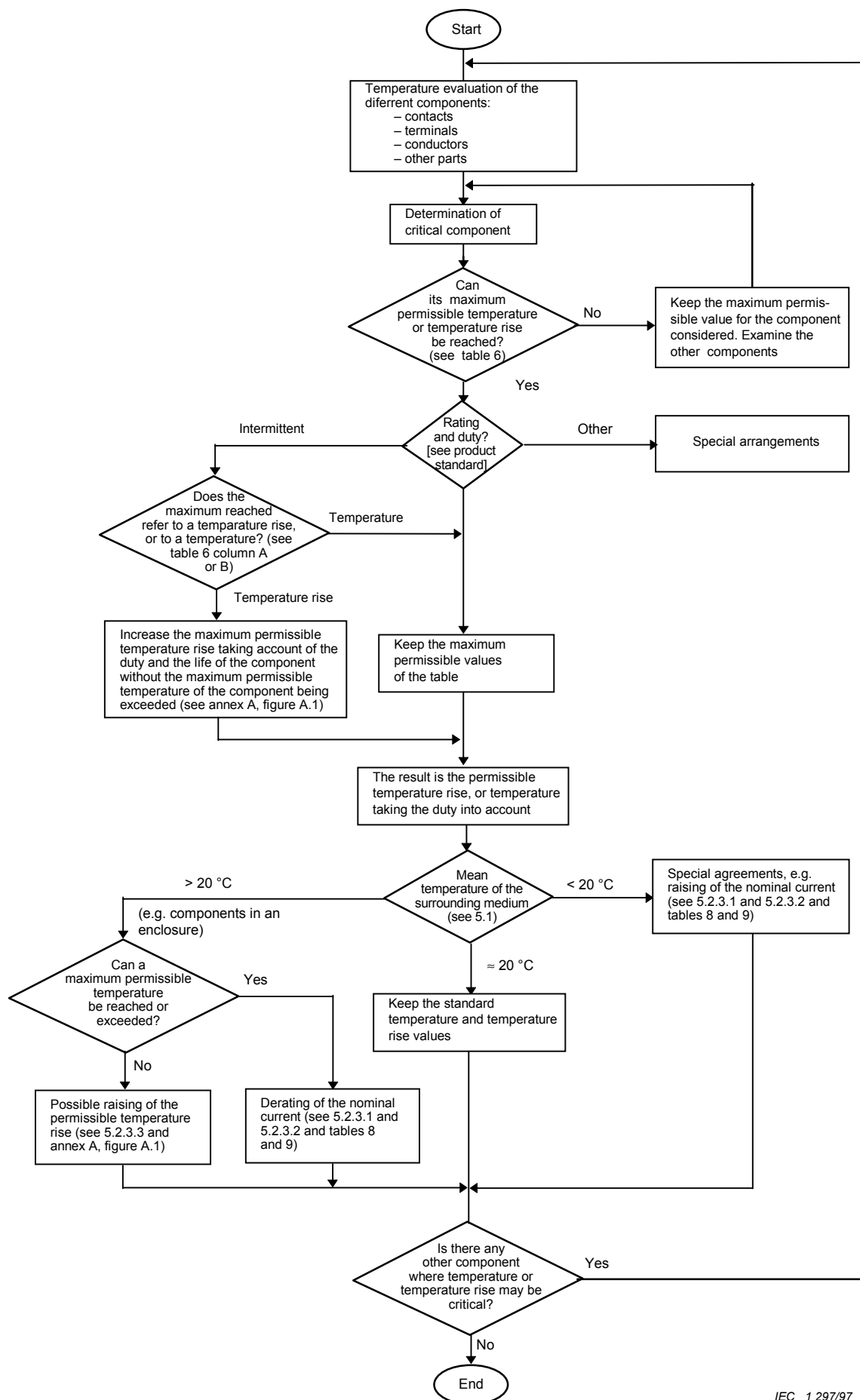


Figure 12 – Chart for determining the maximum permitted temperature of temperature rise

Annex A

Numerical examples of the application of the theory and other data

A.1 To calculate the effect of a short period of overtemperature using equation (14)

Consider the case where $\theta_{an} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\Delta T_n = 50\text{ K}$.

If $\theta_e = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\Delta T_i = 65\text{ K}$, $K_{th} = 25,3$ is obtained; the life under normal conditions of the contact will therefore be reduced by 25,3 h in operating for 1 h under these new conditions.

It is evident that this cannot be compensated by operation for the same period at low load and low temperature. If for example $\theta_e = 0^{\circ}\text{ C}$ and $\Delta T_i = 35\text{ K}$, $K_{th} = 0,04$ is obtained; 1 hour under these conditions is equivalent to 0,04 h (approx. 2 min) of normal operation; the gain is only 58 min, compared with the previous reduction in life of 25,3 h.

Therefore it is necessary only to consider conditions where either the ambient temperature or the temperature rise is increased above normal permissible levels.

A.2 Numerical example of calculation of an acceptable increase in total temperature rise of a contact when operating in an enclosure at a higher internal ambient temperature

According to the reasoning in Section III, 5.2.3.3 we see that:

If ΔT_e increases by 8,5 K, and if ΔT_i is decreased by 6,5 K, $\Delta T (= \Delta T_e + \Delta T_i)$ is increased by 2 K without the ageing of the component being affected.

Calculating this variant in the most general case:

Let:

θ_e be the ambient temperature inside the enclosure;

ΔT_i be the temperature rise of the component with respect to this temperature;

θ'_e be a new internal ambient temperature;

$\Delta T'_i$ be a new temperature rise.

The ageing coefficient is calculated from equation (14) as follows:

$$K_{th} = 2^{\frac{\theta'_e - \theta_e}{8,5} + \frac{\Delta T'_i - \Delta T_i}{6,5}}$$

Assuming $\Delta T_e + \Delta T_i = \Delta T_n$, is the standardized temperature rise,

and putting $z = \Delta T'_e - \Delta T_e$, the increase in temperature rise of the atmosphere within the enclosure, it will be found that $y = (\Delta T'_e + \Delta T'_i) - \Delta T_n$, the increase in permissible standardized temperature rise with K_{th} constant.

The following equation results:

$$y = \Delta T'_e + \Delta T'_i - \Delta T_n = \Delta T'_e + \Delta T'_i - (\Delta T_e + \Delta T_i) = z + (\Delta T'_i - \Delta T_i)$$

Hence:
$$\Delta T'_i - \Delta T_i = y - z$$

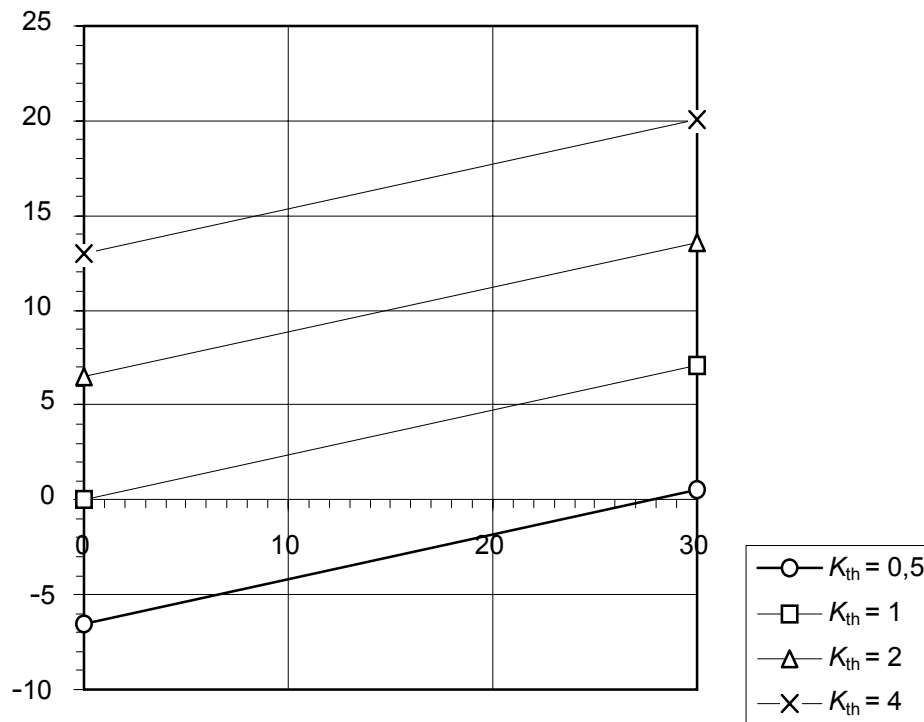
Finally:

$$K_{th} = 2^{\left(\frac{z}{8,5} + \frac{y-z}{6,5} \right)}$$

Which can be expressed as:

$$y = 6,5 \frac{\ln K_{th}}{\ln 2} + \frac{2z}{8,5}$$

The above equation is illustrated graphically in figure A.1.



IEC 1 298/97

y = Permitted increase in maximum standardised temperature rise [K]

z = Increase in ambient temperature [K]

NOTE This apparently illogical conclusion arises because a smaller current is flowing in the contact to produce a temperature rise which is an extra 4,7 K above the external ambient temperature, but which, as a temperature rise above the internal ambient temperature (which is 20 K higher) will be (20 – 4,7) K lower.

Figure A.1 – $y = f(z)$. An example of a contact having a permissible standardised temperature rise of 65 K: if the temperature θ_e (of the enclosure in which it is installed, for example) rises by 20 K, its permissible temperature rise can be increased by 4,7 K without changing its rate of ageing and 11,1 K if the ageing rate is permitted to double

Annex B

Physical characteristics of selected metals and alloys

	Sym- bol	Atomic weight	Atomic- number	Density kg/m ³	Softening tempe- rature °C	Melting tempe- rature °C	Hardness 10 ⁸ Pa	Temperature		Resistivity 10 ⁻⁸ Ω.m	Temperature resistivity coefficient 10 ⁻³ K ⁻¹	Specific heat J/kg - K	Thermal conduc- tivity W/m . K	Total emissivity		Remarks	
								°C	K					Nu	Oxidized		
Copper (annealed)	Cu	63,546	29	8 889	190	1 083	3,5 to 7	0 20 36,85 60	273,15 293,15 310 333,15	1,5881 1,7241 1,838 1,995	4,265 3,93 3,69	382 386 389 394	390 387 382 378	0,05	0,7	Hard-drawn copper ρ _{20 °C} = 1,759 × 10 ⁻⁸ Ω.m Copper conductors in cables ρ _{20 °C} = 1,8 × 10 ⁻⁸ Ω.m	
Brass	70 Cu, 30 Zn			8 530		915	~ 10	0 20	273,15 293,15	6 6,2	1,53 1,484		119 121		0,04 0,1	0,6 0,5	
Cupro- tungsten	W, 35 Cu, 0,5 Ni			13 600			15	20	293,15	5,3	6		150				
Aluminium (A5L)	Al	26,9815	13	2 700	150	658	1,5 to 8	0 20 36,85 60	273,15 293,15 310 333,15	2,6 2,8264 3,02 3,28	4,383 4,03 3,77	881 891 900 910	202 203 204 205	0,07	0,6	Conductors aluminium cables ρ _{20 °C} = 3,06 × 10 ⁻⁸ Ω.m	
Almélec (AG5L)	Al, 0,5 Mg, 0,5 Si			2 700		552		0 20 36,85	273,15 293,15 310	3,016 3,25 3,45	3,88 3,6 3,39	890	185	0,07	0,6	Cabled Almélec ρ _{20 °C} = 3,3 × 10 ⁻⁸ Ω.m	
Al alloy (AG3)				2 700				20	293,15	5,5		890	125	0,07	0,6		
Ductalex	Be, Cu, Mg			2 700				20	293,15	2,826	3,9	890		0,07		Alloy still at experimental stage	
Silver	Ag	107,868	47	10 500	180	962	2,6 to 6	0 20	273,15 293,15	1,47 1,59	4,08 3,77	234 235	418				
Tin	Sn	118,69	50	7 300	100	232	0,45 to 0,6	0 20 60	273,15 293,15 333,15	11 12 14	4,47	223,5 226,4 232,2	62,8 62,5 62,0	0,08	0,55	Amorphous state (β)	
Nickel	Ni	58,71	28	8 900	520	1453	7,0 to 20,0	0 20 60	273,15 293,15 333,15	5,9 6,84 8,73	6,9	398 412 442	95,2 92,5 87,8	0,02		Pure nickel	
Exconal	Copper plated aluminium (15 % Cu by volume)			3 630				20	293,15	2,65	4,1	710	240	0,05	0,7	Contact surface equivalent to annealed copper	

Annex C

Physical characteristics of fluid dielectrics

	Pressure (bar)	Temperature		Density ρ kg/m ³	Thermal conduc- tivity λ W/m - K	Dynamic viscosity μ_d 10 ⁻⁵ Pa . s	Compressi- bility β 10 ⁻³ K ⁻¹	Specific heat C_p J/kg - K	Remarks
		°C	K						
Air	1	-23,15	250	1,4133	0,02227	1,599	4,017	1 005,4	
		0	273,15	1,2928	0,02419	1,728	3,67	1 005,6	
		20	293,15	1,205	0,02585	1,822	3,40	1 006,3	
		46,85	320	1,1033	0,02779	1,939	3,131	1 007,3	
SF ₆	1,3	20	293,15	7,95	0,01355	1,52	3,33	655	Indicative values
Sulphur	3	20	293,15	18,65	0,01355	1,52	3,33	655	
hexa- fluoride	5	87,5	360,65	25,3	0,0142	1,82	2,78	766	
Liquid		20	293,15	1371	0,150	29,1	7,1	1 557	
Oil	1	20	293,15	870	0,13	26	0,764	1 880	Indicative values

Annex D

Information on the reaction of contact metals with substances in the atmosphere

Metal	Reactant	Reaction product	Oxidation formula obtained	Units Remarks	Sources	Examples		
						Temperature (°C)	Thickness formed × 10 ⁻¹⁰ m	
							After 1 000 h	After 100 000 h
Copper	Atmospheric oxygen	Cu ₂ O	$s = \sqrt{s_0^2 + t \cdot e^{\left(\frac{34.31}{T_c} - \frac{11\,700}{T_c}\right)}}$	s, s_0 in angströms*; ($s_0 \approx 20$ Å, oxide thickness immediately formed on the metal) t = time in hours T_c = temperature in kelvins (thermodynamic temperature)	Rönnquist, quoted by Holm (Electric Contacts, Springer Verlag)	20 55 60 85 100	21.7 35 39 87 150	37 170 210 690 1 300
Aluminium	Atmospheric oxygen	Al ₂ O ₃	The thickness of Al ₂ O ₃ oxide formed on the aluminium does not exceed 50 Å, the initial oxidation of 20 Å being attained after a few seconds. The film obtained is insulating and must be broken to allow the passage of current in the case of electric contacts. The presence of water vapour favours the growth of the film which can continue for months, but very slowly.			50 Å (unusable without preparation as contact material)		
Tin	Atmospheric oxygen	SnO	$s = 5.22 \ln 47 t \cdot e^{\left(\frac{7.92}{T_c} - \frac{2400}{T_c}\right)}$	s in angströms*, t in hours, T_c in kelvins ($s_0 \approx 15$ Å)	Britton and Bright, Metallurgica 56 (1957), p. 163	20 55 60 85 100	42 103 114 188 250	61 146 162 260 360
Nickel	Atmospheric oxygen	NiO	$s = \sqrt{s_0^2 + t \cdot e^{\left(\frac{4.68}{T_c} - \frac{1800}{T_c}\right)}}$	s in angströms*, t in hours, T_c in kelvins ($s_0 \approx 10$ Å)	Pilling and Bedworth, quoted by Holm (Electric Contacts, Springer Verlag)	20 55 60 85 100	15.5 21 22 27 34	150 210 220 270 340
Silver	H ₂ S and sulphurous vapours	Ag ₂ S	$t < 40 : s = 60 t^{1/3} e^{\left(\frac{27.5}{T_c} - \frac{8000}{T_c}\right)}$ $40 \leq t < 70 : s = 0.121 t^{2.57} e^{\left(\frac{27.5}{T_c} - \frac{8000}{T_c}\right)}$ $t \geq 70 : s = 3\,750 t^{0.15} e^{\left(\frac{27.5}{T_c} - \frac{8000}{T_c}\right)}$	In saturated damp air at 20 °C containing 2% by volume of hydrogen sulphide	Frischmeister and Drott, Acta Metallurgica, vol. 7 (Dec. 1959), p. 777	Depends on the concentration of sulphurous vapours. The danger threshold is about 1/10 ⁹ (in volume)		
	Ozone	Ag ₂ O	Remains very thin (<10 Å) and decomposes at 200 °C – its presence is not a problem with contacts			<10 Å		
	Atmospheric sulphur	Ag ₂ S	$s = \sqrt{s_0^2 + t \cdot e^{\left(\frac{29}{T_c} - \frac{8000}{T_c}\right)}}$	s in angströms*, t in hours, T_c in kelvins ($s_0 \approx 16$ Å)	According to W.E. Campbell, Electrical Contacts, IIT 1972, p. 185	Does not depend on humidity, but on the air circulation speed. The action of free sulphur S appears preponderant vis-à-vis H ₂ S or SO ₂		

* 1 Å = 10⁻¹⁰ m.

Annex E

Temperature rise of a conductor cooled by radiation and convection in the vicinity of a terminal

NOTE 1 When the formulae numbers are not prefaced by "E", they are taken from the main text, with the same number.

NOTE 2 To understand fully the content of this annex, the reader should study references 3, 4 and 5 of annex G.

E.1 Analytical derivation of an equation representing the temperature rise of a conductor in the vicinity of a terminal in the case of cooling by radiation and natural convection

As the density of heat-flow rate ϕ can be expressed by the equation $\phi = \gamma \Delta T_x^\delta$, the differential equation can take the form:

$$\lambda_c S \frac{d^2(\Delta T_x)}{dx^2} - \gamma B \Delta T_x^\delta = 0 \quad (\text{E.1})$$

whose particular solution (satisfying the limit condition $\frac{d\Delta T_x}{dx} \rightarrow 0$ for $\Delta T_x \rightarrow 0$) after all calculations is:

$$\Delta T_x = \frac{A}{(x + C)^{\frac{2}{\delta-1}}} \quad (\text{E.2})$$

where

$$\begin{cases} A = \left(\frac{2(\delta+1)\lambda_c S}{(\delta-1)^2 \gamma B} \right)^{\frac{1}{\delta-1}} \\ C = \left(\frac{\gamma B A^\delta (\delta-1)}{W(\delta+1)} \right)^{\frac{\delta-1}{\delta+1}} \end{cases}$$

Therefore it can be shown that:

- the supplementary temperature rise of the terminal:

$$\Delta T_0 = \left(W \sqrt{\frac{\delta+1}{2\lambda_c S \gamma B}} \right)^{\frac{2}{\delta+1}} \quad (\text{E.3})$$

- the space constant Δx at which the temperature rise is divided by e is given by

$$\Delta x = \left(e^{\frac{\delta-1}{2}} - 1 \right) C \quad (\text{E.4a})$$

which may take the following form:

$$\Delta x = \left(e^{\frac{\delta-1}{2}} - 1 \right) \times \frac{2^{\frac{\delta}{\delta+1}} (\delta+1)^{\frac{1}{\delta+1}}}{\delta-1} \times \frac{(\lambda_c S)^{\frac{\delta}{\delta+1}}}{(\gamma B)^{\frac{1}{\delta+1}} W^{\frac{\delta-1}{\delta+1}}} \quad (\text{E.4b})$$

or

$$\Delta x = K \times \frac{(\lambda_c S)^{\frac{\delta}{\delta+1}}}{(\gamma B)^{\frac{1}{\delta+1}} W^{\frac{\delta-1}{\delta+1}}}$$

K taking the following values as a function of δ in table E.1:

Table E.1 – Value of K as a function of δ

δ	K
1,0	1,0 (conditions in 4.3.1)
1,1	1,050
1,15	1,074
1,20	1,098
1,25	1,122
1,3	1,146

From the equation

$$\Delta T_o = \frac{A}{\frac{2}{C^{\delta-1}}}$$

it can be deduced that

$$C = \left(\frac{A}{\Delta T_o} \right)^{\frac{\delta-1}{2}}$$

Hence:

$$\Delta T_x = \frac{A}{\left[x + \left(\frac{A}{\Delta T_o} \right)^{\frac{\delta-1}{2}} \right]^{\frac{2}{\delta-1}}} = \left[\frac{x}{\sqrt{\frac{2(\delta+1)}{(\delta-1)^2} \frac{\lambda_c S}{\gamma B}}} + \frac{1}{\Delta T_o^{\frac{\delta-1}{2}}} \right]^{\frac{-2}{\delta-1}}$$

and

$$\Delta x = \left(e^{\frac{\delta-1}{2}} - 1 \right) \frac{1}{\Delta T_o^{\frac{\delta-1}{2}}} \sqrt{\frac{2(\delta+1)}{(\delta-1)^2} \frac{\lambda_c S}{\gamma B}}$$

which can take the form:

$$\Delta x = K' \frac{\sqrt{\frac{\lambda_c S}{\gamma B}}}{\Delta T_o^{\frac{\delta-1}{2}}} \quad (\text{E.4c})$$

K' being given as a function of δ in table E.2:

Table E.2 – Value of K' as a function of δ

δ	K'
1,0	1,0 (conditions in 4.3.1)
1,1	1,051
1,15	1,077
1,20	1,103
1,25	1,130
1,3	1,157

E.2 Analogue thermal modelling

E.2.1 Introduction

As an alternative to analytical or numerical equations describing the thermal processes in electrical installations, the method of *analogue network modelling* can be used as a powerful but relatively simple tool. The method is based on the fact that thermal and electrical flow behaviour are both described with the same type of differential equations. For instance the equation for thermal heat conduction is fully equivalent to Ohm's law:

$$q = \lambda_0 \frac{dT}{dx} \quad \Leftrightarrow \quad j = k \frac{dV}{dx}$$

As a result, thermal quantities such as specific heat flow q and temperature T are equivalent to the electrical quantities current density j and voltage V respectively. Also components such as thermal and electrical resistors are described with similar expressions.

In the model, the real thermal situation is thus represented by electrical quantities, tabulated below:

Table E.3 – Equivalent quantities

	Reality	Model
P	Power (W)	Current (A)
T	Temperature (K)	Voltage (V)
R	Thermal resistance (l/λ _c s)	Electrical resistance (l/κs)

The method has the advantage that no mathematical background or complicated computer software is needed. Furthermore the relation with real physical components can be recognized more directly.

For any successful determination of the temperature distribution within electrotechnical equipment, the following steps are necessary:

- Subdivision of equipment into elements: the necessary size and nature of the element is determined by the structure of the macroscopic configuration (one-, two- or three-dimensional) and the variation of material properties.

For continuous processes (during normal load conditions) these conditions are sufficient to determine equivalent resistor values. For non continuous processes (e.g. inrush or short circuits) however, the dimensioning is also represented by equivalent capacitors. In this case, the correct dimensioning of the subdivision into elements is mainly determined by the relevant time scale and time steps. The element dimensions should be sufficiently small to ensure that the resulting thermal time constant $t = RC$ is small compared to the time step. The diffusion thickness is helpful to estimate the part of the total region to be modelled.

- Determination of heat sources, cooling power, conduction and storage: heat sources are to be defined, e.g. as virtual point sources in contact constrictions or as a longitudinal continuum as is the case for an electrically heated conductor or more specifically in a fuse. Dielectric losses and solar heat can also influence the result. Heat extraction by conduction, convection and radiation should be localised.
- Calculation of electrical equivalent components: electrically generated heat is dependent upon the square of the current times the resistance, which can be temperature dependent. For all such thermal sources, equivalent electrical sources can be chosen. Passive components, representing thermal conduction and heat storage follow immediately from element dimensions.
- Actual performance of the simulation: as the analogue model is developed, the actual simulation can be performed with computer programs. Besides own programming, several commercial packages are available for this purpose.

As a typical example of the possibilities of an analogue model, the temperature rise along a current carrying conductor will be determined in the following.

E.2.2 Determination of the temperature of a current-carrying conductor in the vicinity of a contact, using an analogue model

As an alternative to the analytical method which is used in the numerical example in annex A with equations from annex E.1, an analogue model, based on the common description possibility of thermal and electrical flow is used in the following.

To enable comparison of results to be made, identical conditions are used to those in the example in annex A. The conductor is positioned horizontally, has a slightly oxidized copper surface (emissivity $\varepsilon = 0,1$ and tunnel resistivity $\sigma_0 = 5 \times 10^{-12}$) without insulation. The conductor has a cross-section $S = 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ and a conducting length of 1 m. At one side the conductor is pressed against another conductor with a force $F = 100 \text{ N}$. The conductor carries a current of 300 A. Natural and forced convection ($v = 0,3 \text{ m/s}$) will be considered.

The relevant constants and dimensions are grouped in the following list, copper material constants are from annex B, air constants at 20 °C are from annex C:

$I = 300$ [A]	continuous current
$l = 1$ m	length of copper bar
$S = 10^{-4}$ [m ²]	cross-section of copper bar
$B = 0,04$ [m]	external perimeter of conductor dissipating heat.
$D_h = 0,01$ [m]	overall height of conductor
$S_c = 0,01 \times 0,2 \times 4$ [m ²]	cooling surface of conductor part 0,2 m
$T_e = 293,15$ °C	mean temperature of surrounding air
ΔT_s	temperature rise of the conductor at a large distance from a contact
$\rho_0 = 1,5881 \times 10^{-8}$ [Wm]	copper resistivity at 0 °C
$\alpha = 4,265 \times 10^{-3}$ [K ⁻¹]	temperature resistivity coefficient of copper
$R_0 = \rho_0 / S = 1,5881 \times 10^{-4}$	conductor resistance at 0 °C
$\lambda_c = 387$ [W/mK]	thermal conductivity of copper
$\sigma = 5,670 \times 10^{-8}$ [Wm ⁻² K ⁻⁴]	Stefan Boltzmann constant
$\varepsilon = 0$ to 1 (here $\varepsilon = 0,1$)	emissivity of copper conductor
$M = 1,205$ [kg m ⁻³]	mass density of air
$\beta = 3,4 \times 10^{-3}$ [K ⁻¹]	compressibility of air
$g = 9,81$ [ms ⁻²]	acceleration to gravity
$C_p = 1006,3$ [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	specific heat of air at constant pressure
$\lambda = 0,02585$ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	thermal conductivity of air
$\mu_d = 1,822 \times 10^{-5}$ [Pa s]	dynamic viscosity of air

For the analogue method, the bar will be divided into five parts of 0,2 m each.

The copper bar and the equivalent electrical model are presented in figure E.1.

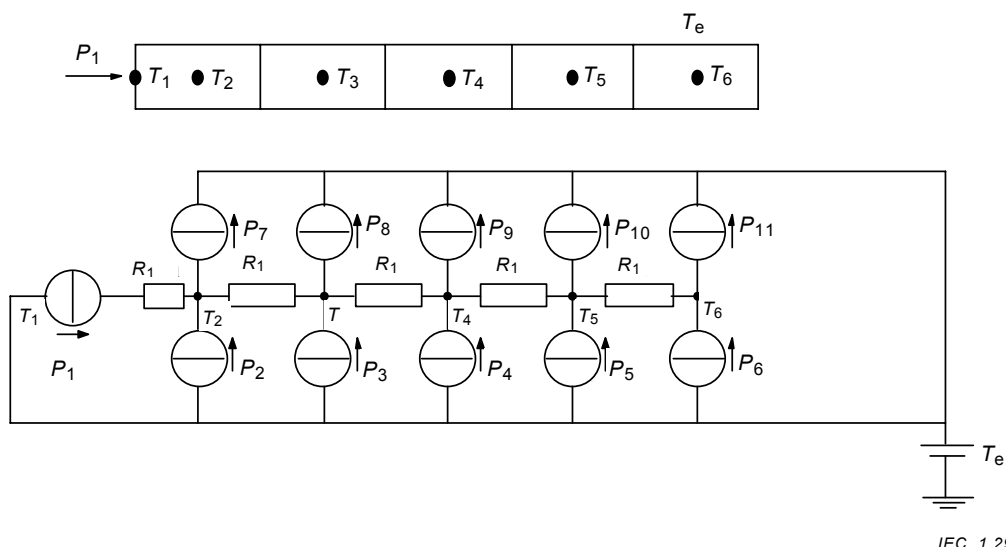


Figure. E.1 – Thermal model for the bar and electrical analogue method

The temperature of the environment is represented by the d.c. voltage source $T_e = 293,15$ K.

The Joule heating power values P_1 to P_6 are represented by positive current sources and power losses P_7 to P_{11} are represented by negative current sources.

a) Determination of the heat sources

For the contact resistance, equation (7) is used:

$$R_c = \frac{\rho}{2na} + \frac{\sigma_o}{n\pi a^2} \quad (7)$$

Copper material constants are from annex B:

$\rho = 1,8 \times 10^{-8}$ [Wm]	electrical resistivity of conductor
$\sigma_o = 5 \times 10^{-12}$ [Wm ²]	tunnel resistivity of contact surface
$n = n_k H^{0,625} F^{0,2}$	number of elementary contact points
$n_k = 2,5 \times 10^{-5}$	
$H = 5,5 \times 10^8$	contact hardness
$\xi = 0,15$	coefficient of flatness
$a = \sqrt{\frac{F}{n\pi\xi H}}$	elementary contact radius

Substitution results in $n = 18$ and $a = 0,086$ mm and contact resistance $R_c = 18$ [$\mu\Omega$].

From the contact, a heat flow W is dissipated to the conductor:

$$W = \frac{1}{2} R_c I^2 = 0,81$$
 [W]

This heat flow W is represented by its electrical equivalent, the current source P_1 :

$$P_1 = \frac{1}{2} R_c I^2 = 0,81$$
 [A]

Joule losses for each 0,2 m section of the conductor are represented by current sources $P_2 \dots P_6$, dependent on the local temperature, i.e.:

$$P_2 = I^2 \frac{l}{5S} \rho_o [1 + \alpha (T_2 - 273,15)]$$

Substitution of the relevant values results in $P_2 = -0,4716 + 0,01219 T_2$

Similar expressions are valid for the sources P_3 to P_6 .

b) *Representation of the electrical resistances of the sections of the copper bar*

The electrical resistance R_1 represents the thermal resistance of a section of the copper bar:

$$R_1 = \frac{l}{5 \lambda_c S} = \frac{0,2}{387 \times 100 \times 10^{-6}} = 5,168 [\Omega]$$

c) *Representation of the cooling by convection and radiation*

Remote from the contact, where convection/radiation balances the Joule power, the temperature rise ΔT_s of the conductor is expressed by

$$\Delta T_s = \frac{\left((T_e + \Delta T_s - 273,15) \alpha + 1 \right) R_o I^2 + r \varphi_s S_r}{Bl \left[\sigma \varepsilon \frac{(T_e + \Delta T_s)^4 - T_e^4}{\Delta T_s} + \frac{\lambda}{D_h} N_u \right]} \quad (10)$$

With natural convection, for the general case of indoor contacts and terminals:

$$N_u = 0,8(G_r P_r)^{0,05} + 0,35(G_r P_r)^{0,27} \quad (11a)$$

where

$$G_r P_r = \frac{M^2 \beta_g C_p D_h^3 \Delta T_s}{\mu_d \lambda} \quad (11b)$$

For two current values $I = 200$ and 300 [A], the temperature rise ΔT_s and the heat flux φ can be determined from equations (10), (11a) and (11b):

I A	ΔT_s K	φ Wm^{-2}
300	36,45	443,4
200	17,55	184,3

If a relation $\varphi = \gamma \Delta T_s^\delta$ is assumed, the constants can be derived as $\gamma = 5,9$ and $\delta = 1,2$.

In the case of **forced convection** equations, (12a) and (12b) should be used for the Nusselt number:

$$N_u = 0,65 R_e^{0,2} + 0,23 R_e^{0,61} \quad (12a)$$

where

$$R_E = \frac{M \nu D_h}{\mu_d} \quad (\text{the Reynolds number}) \quad (12b)$$

For forced convection ($v = 0,3$ m/s), the temperature rise ΔT_s and the heat flux ϕ can be determined from equations (10), (12a) and (12b). Substitution of two current values $I = 300$ A and 200 A results in:

I A	ΔT_s K	ϕ Wm^{-2}
300	20,48	419
200	8,73	178

If again a relation $\phi = \gamma \Delta T^\delta$ is assumed, the constants can be derived as $\gamma = 20,3$ and $\delta = 1,0$ respectively.

For each conductor part of 0,2 m, the total heat flow follows from the multiplication of ϕ with the cooling surface S_c . This cooling power by convection/radiation is represented by the current sources P_7 to P_{11} .

$$P_7 = S_c \gamma \Delta T^\delta$$

For *free convection* the parameters $\gamma = 5,9$ and $\delta = 1,2$ are used:

$$P_7 = 0,0472 (T_2 - T_e)^{1,2}$$

For *forced convection* ($v = 0,3$ m/s) the parameters $\gamma = 20,33$ and $\delta = 1,0$ are used:

$$P_7 = 0,1626 (T_2 - T_e)$$

Similar expressions can be derived for P_8 to P_{11} .

The final result of the analogue simulation is presented in figure E.2.

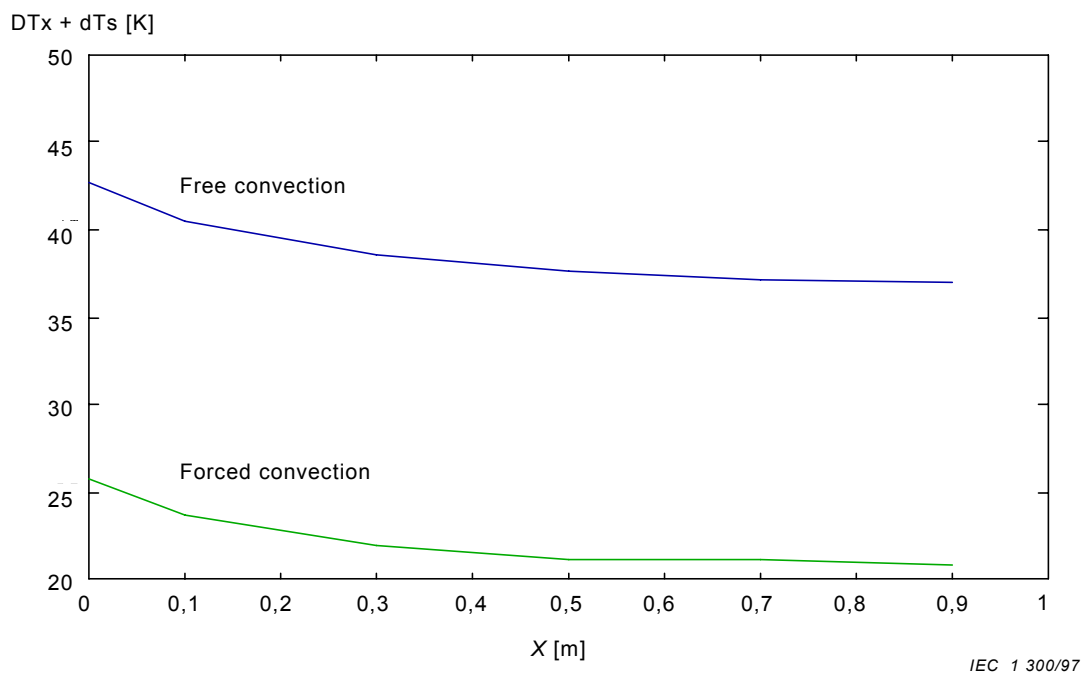


Figure E.2 – Temperature rise decrement along the copper bar

Annex F

List of symbols used in this report

Symbol	Designation	Unit
A	Arrhenius law coefficient	K
A'	Arrhenius law constant	K
a	Elementary contact radius	m
B	External perimeter of conductor dissipating heat	m
C_{th}	Nominal current correction coefficient	
D_h	Diameter of conductor leading to the contact, or overall height of conductor of any section	m
e	Exponential coefficient	2,718
F	Contact force	N
G_r	Grashof number	
g	Acceleration due to gravity	9,81 m s ⁻¹
H	Contact hardness	Pa
K_{th}	Overall ageing factor (current correction factor)	
K_e	Ageing factor for variation in ambient temperature	
K_i	Ageing factor for variation in temperature rise	
k	Boltzmann constant	1,381E-23 JK ⁻¹
k_1, k_2	Constants in the contact resistance/force equation	
l	Average distance between elementary contacts	m
l	Length of conductor	m
M	Density of ambient fluid	kg m ⁻³
N	Nusselt number	
n	Number of elementary contact points	
n_k	Coefficient of calculation of the number of elementary contacts	2,5E-5(SI)
P	Operational life at permanent rating	year (months)
P_r	Prandtl number	
$R_{(a,l)}$	Resistance at distance l from constriction radius a	Ω
R_c	Total resistance of contact	Ω
R_e	Contact constriction resistance	Ω
R_i	Contact film resistance	Ω
R_0	Linear resistance of l (m) of the conductor considered at 0 °C	Ω
r	Coefficient of receptivity of solar flux	$0 \leq r \leq 1$
S	Conductor cross-sectional area	m ²
s	Thickness of oxide layer	m
S_n	Effective contact area	m ²
S_r	Surface area of conductor receiving φ_s	m ²
T, θ	Temperature	K or °C
T_a, θ_a	Ambient air temperature	K or °C
T_{an}, θ_{an}	Standard ambient air temperature	K or °C
T_c, θ_c	Contact temperature	K or °C
T_e, θ_e	Mean temperature of the fluid surrounding the component	K or °C
T'_e, θ'_e	Average temperature of the fluid surrounding a part	K or °C
T_{e1}, θ_{a1}	A specific average temperature	K or °C
T_{e2}, θ_{a2}	A specific average temperature	K or °C
T_n, θ_n	Maximum permissible standard temperature of the component	K or °C
T'_i	Insulation temperature	K or °C
T_s, θ	Standard temperature of a conductor	K or °C

Symbol	Designation	Unit
t	Time	s
W	Power dissipated by the terminal into the conductor	W
w	Activation energy of oxidation reaction	J
x	Distance	m
X	Coefficient of filling of a cell; film thickness constant	
y	Tolerable standard temperature rise increase	K
z	Increase in the temperature rise of air surrounding a component $z = \Delta T_e$	K
α	Temperature coefficient of resistance of the conductor material	K ⁻¹
β	Coefficient of expansion of the ambient fluid at constant pressure	K ⁻¹
γ	A constant related to emission	k
Δ_e	Doubling constant for increasing ambient temperature	K
Δ_i	Doubling constant as a function of temperature rise of the contact	K
ΔT	Temperature rise relative to the ambient air temperature T	K
Δt_e	Temperature rise of medium surrounding component relative to external ambient temperature	K
ΔT_i	Temperature rise of component relative to surrounding fluid (mean value)	K
Δt_{i1}	Temperature rise relative to surrounding ambient (initial)	K
ΔT_{i2}	Temperature rise relative to surrounding ambient (final)	K
$\Delta T'_i$	Temperature rise relative to surrounding ambient	K
$\Delta \eta$	Temperature drop at distance Δl from a terminal	K
ΔT_n	Maximum permissible standard temperature rise of component relative to ambient temperature T_{an}	K
$\Delta \tau_p$	Temperature rise at the elementary contact due to constriction	K
$\Delta \tau_s$	Temperature rise of conductor in absence of a contact or at large distance from same	K
$\Delta \tau_x$	Temperature rise at distance x from a contact	K
ΔT_0	Value of ΔT_x for $x = 0$	
Δx	Spatial constant	m
δ	Exponent of ΔT in the expression $\varphi = \gamma \Delta T^\delta$	$0 < \delta < 1$
ε	Total emissivity of a conductor	
λ	Thermal conductivity of ambient fluid	Wm ⁻¹ K ⁻¹
λ_c	Thermal conductivity of conductor	Wm ⁻¹ K ⁻¹
k	Electrical conductivity = $1/\rho$	$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$
x	Coefficient of flatness	
ρ	Resistivity	Ωm
ρ_0	Resistivity at 0 °C	Ωm
s	Stefan-Boltzmann constant	5,67E-8
s_0	Tunnel resistivity of oxide layer	Ωm^2
j	Density of heat flow rate on the surface of the conductor	Wm ⁻²
j_s	Solar density of heat flow rate	Wm ⁻²

Annex G

Bibliography

- [1] Holm, R., *Electric Contacts* (4th edition 1967) – Springer Verlag.
 - [2] Llewellyn Jones, *The Physics of Electrical Contacts* (1957), Oxford, Clarendon Press.
 - [3] Johannet, P., Private Communication.
 - [4] Britton and Bright, *Metallurgica* 56 (1957), p.163
 - [5] Frischmeister and Drott, *Acta Metallurgica*, vol. 7 (Dec.1959), p.777
 - [6] Campbell, W.E., *Electrical Contacts*, III, 1972, p.185.
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	62
INTRODUCTION	64

Section 1: Généralités

1 Généralités	66
1.1 Domaine d'application et objet	66
1.2 Documents en références	66
1.3 Définitions	67
1.4 Symboles	67

Section 2: Théorie

2 Généralités sur la nature du contact électrique, le calcul et le mesurage de la résistance ohmique des contacts	68
2.1 Contacts électriques et bornes de raccordement	68
2.2 Nature du contact électrique	68
2.3 Calcul de la résistance de contact	70
3 Mécanismes de vieillissement des contacts et des bornes de raccordement	74
3.1 Généralités	74
3.2 Contacts de métaux différents	75
3.3 Mécanismes de vieillissement par oxydation	77
3.4 Résultats relatifs au vieillissement des contacts en cuivre	79
3.5 Mise en oeuvre et précautions à prendre lors de l'utilisation des matériaux de contact	82
4 Calcul des échauffements des conducteurs, des contacts et des bornes de raccordement	83
4.1 Représentation symbolique	83
4.2 Échauffement ΔT_s s d'un conducteur par rapport à la température T_e du fluide environnant	85
4.3 Échauffement ΔT_o au voisinage du contact: échauffement des bornes de raccordement	86
4.4 Échauffement des points de contact élémentaires	86

Section 3: Application

5 Valeurs admissibles des températures et des échauffements	87
5.1 Température de l'air ambiant θ_a	87
5.2 Température et échauffements des différents organes d'un matériel électrique	88
5.3 Température et échauffement des conducteurs de raccordement d'un matériel électrique	96
5.4 Températures et échauffements des bornes de raccordement d'un matériel électrique – Influence sur les conducteurs raccordés	97

6	Marche générale à suivre pour la détermination des températures et échauffements admissibles	98
6.1	Paramètres fondamentaux	98
6.2	Méthode à suivre pour déterminer les températures et les échauffements maximaux admissibles	98
Annexe A	Exemples numériques de l'application de la théorie et autres caractéristiques ..	100
Annexe B	Caractéristiques physiques de quelques métaux et alliages	103
Annexe C	Caractéristiques physiques de fluides diélectriques	104
Annexe D	Données sur la réaction des métaux de contact avec les substances de l'atmosphère	105
Annexe E	Echauffement d'un conducteur refroidi par rayonnement et convection près d'une borne	106
Annexe F	Liste des symboles littéraux utilisés	115
Annexe G	Bibliographie	117

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

GUIDE CONCERNANT L'ÉCHAUFFEMENT ADMISSIBLE DES PARTIES DES MATÉRIELS ÉLECTRIQUES, EN PARTICULIER LES BORNES DE RACCORDEMENT

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes Internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques, représentent, dans la mesure du possible un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La tâche principale des comités d'études de la CEI est l'élaborer des Normes internationales. Exceptionnellement, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique de l'un des types suivants:

- type 1, lorsque, en dépit de maints efforts, l'accord requis ne peut être réalisé en faveur de la publication d'une Norme internationale;
- type 2, lorsque le sujet en question est encore en cours de développement technique ou lorsque, pour une raison quelconque, la possibilité d'un accord pour la publication d'une Norme internationale peut être envisagée pour l'avenir mais pas dans l'immédiat;
- type 3, lorsqu'un comité d'études a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales, cela pouvant comprendre, par exemple, des informations sur l'état de la technique.

Les rapports techniques des types 1 et 2 font l'objet d'un nouvel examen trois ans au plus tard après leur publication afin de décider éventuellement de leur transformation en Normes internationales. Les rapports techniques du type 3 ne doivent pas nécessairement être révisés avant que les données qu'ils contiennent ne soient plus jugées valables ou utiles.

La CEI 60943, rapport technique de type 3, a été établi par le comité d'études 32 de la CEI: Coupe-circuit à fusibles.

Cette version consolidée de la CEI 60943 comprend la deuxième édition (1998) [documents 32/142/CDV et 32/148/RVC] et son amendement 1 (2008) [documents 32/187/DTR et 32/188/RVC].

Le contenu technique de cette version consolidée est donc identique à celui de l'édition de base et à son amendement; cette version a été préparée par commodité pour l'utilisateur.

Elle porte le numéro d'édition 2.1.

Une ligne verticale dans la marge indique où la publication de base a été modifiée par l'amendement 1.

Les annexes sont données à titre d'information.

Le comité a décidé que le contenu de la publication de base et de ses amendements ne sera pas modifié avant la date de maintenance indiquée sur le site web de la CEI sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

INTRODUCTION

- a) Les échauffements rencontrés dans les matériels électriques, résultant des différentes pertes dissipées dans les conducteurs, contacts, circuits magnétiques, etc., prennent une importance croissante avec le développement des nouvelles techniques de construction et d'exploitation des appareils.

Cette évolution a été particulièrement sensible dans le domaine des matériels où de nombreux organes dissipant de l'énergie (contacteurs, fusibles, résistances, etc.), en particulier les dispositifs modulaires, se trouvent réunis à l'intérieur d'enveloppes en matériaux synthétiques peu perméables à la chaleur.

Ces échauffements se traduisent par une température relativement élevée des éléments essentiels que représentent les contacts électriques: une température élevée favorise l'oxydation à l'interface du contact, augmente sa résistance, ce qui aboutit à un échauffement plus important, donc à une température encore plus élevée. Si le matériau constituant le contact est inadapté ou insuffisamment protégé, le contact peut être détruit avant que la durée de vie escomptée de l'appareil qui l'emploie ne soit écoulée.

Ces échauffements affectent également les bornes de raccordement ainsi que les conducteurs qui y sont raccordés, et il convient d'en limiter les effets pour la bonne tenue des isolants de ces conducteurs pendant la durée de vie de l'installation.

- b) Compte tenu de ces problèmes, le présent rapport a été établi avec les objectifs suivants:
- analyser les différents phénomènes d'échauffement et d'oxydation auxquels sont sujets les contacts, les bornes de raccordement et les conducteurs qui y aboutissent, en fonction de leur environnement et de leur disposition;
 - fournir aux comités de produit des règles élémentaires afin de leur permettre de préciser des températures et des échauffements admissibles.
- c) L'attention est tout particulièrement attirée sur les précautions à prendre pour les ensembles de constituants lorsqu'il y a rassemblement d'organes à l'intérieur d'une même enveloppe.

Il convient d'attirer l'attention des utilisateurs sur le fait que les échauffements des bornes admis par les normes particulières d'appareillage résultent de situations conventionnelles pendant les essais de type; celles-ci peuvent s'écarter notablement de situations rencontrées en pratique, dont il y a lieu de tenir compte, en particulier à cause des températures admises par les isolants des conducteurs qui peuvent être reliés aux bornes dans des conditions normales.

- d) L'attention est attirée sur le fait que, dans les normes de produit correspondantes, la température et les échauffements admissibles des bornes externes sont mesurés au cours d'essais de type conventionnels et peuvent donc ne pas refléter la situation susceptible de se produire en usage normal.

Il convient donc d'adopter des précautions particulières pour éviter une exposition à des températures qui peuvent avoir une incidence sur la durée de vie des matériaux reliés aux bornes des composants.

Il est essentiel, dans ce cas, de bien distinguer la notion de «température ambiante externe» qui règne à l'extérieur d'une enveloppe de celle de «température du fluide environnant un organe» qui est la somme de la température ambiante externe et de l'échauffement interne dû aux organes. Ces notions, et d'autres notions complémentaires telles que la résistance thermique d'une enveloppe, sont présentées dans l'article 5 et développées concrètement dans des exemples numériques.

Afin de faciliter un calcul complet, ce rapport relie la température du fluide environnant un organe à la température ambiante externe grâce à l'introduction de la notion de «coefficient de remplissage» et donne un exemple numérique (5.2.3.2.) qui précise les valeurs du coefficient de remplissage à utiliser dans quelques cas pratiques.

Les grandeurs intervenant dans le calcul de la résistance de constriction d'un contact sont sujettes à de grandes variations dues aux conditions physiques et au degré de contamination des surfaces en contact. Par le calcul uniquement, la résistance de contact peut être estimée, mais avec une précision n'excédant pas un ordre de grandeur.

Des valeurs plus précises peuvent être obtenues par mesure directe sur des matériels électriques donnés, car en pratique, il arrive souvent que d'autres phénomènes de dégradation imprévisibles par le calcul prédominent. C'est pourquoi les forces de contact basées sur l'expérience à long terme du constructeur d'un matériel donné doivent être prises en compte lors de la conception.

Ce rapport n'est pas supposé guider pour le déclassement des composants.

Il est fortement conseillé d'étudier les ouvrages cités en référence à l'annexe G du présent rapport avant de tenter d'appliquer les données à un problème pratique.

GUIDE CONCERNANT L'ÉCHAUFFEMENT ADMISSIBLE DES PARTIES DES MATÉRIELS ÉLECTRIQUES, EN PARTICULIER LES BORNES DE RACCORDEMENT

Section 1: Généralités

1 Généralités

1.1 Domaine d'application et objet

Le présent rapport est destiné à servir de guide lorsqu'il s'agit d'estimer des valeurs admissibles pour les températures et les échauffements des parties conductrices de matériels électriques en régime établi.

Ce rapport s'applique aux raccordements électriques de puissance, ainsi qu'aux matériaux avoisinants.

Le présent rapport est concerné par les effets thermiques du courant passant au travers des connexions; il n'y a pas de limites de tension pour sa mise en application.

Le présent rapport est applicable seulement lorsqu'il y est fait référence dans la norme de produit applicable.

Les comités d'études individuels seront responsables de l'extension et de la façon dont les termes du présent rapport sont utilisés dans leurs documents normatifs.

Lorsqu'il est fait référence à des valeurs «admissibles» dans le présent rapport, il s'agit des valeurs autorisées par les normes de produit s'y rapportant.

Le présent rapport se propose de fournir:

- les données générales sur la structure des contacts électriques et le calcul de leur résistance ohmique;
- les mécanismes fondamentaux du vieillissement des contacts;
- le calcul de l'échauffement des contacts et des bornes de connexion;
- les températures et échauffements maximaux admissibles pour différents organes de matériels, en particulier les contacts, les bornes de connexion et les conducteurs qui leur sont raccordés;
- la marche générale à suivre par le comité de produit pour spécifier les températures et échauffements admissibles.

1.2 Documents en références

CEI 60050(441):1984, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 441: Appareillage et fusibles*

CEI 60085:1984, *Evaluation et classification thermiques de l'isolation électrique*

CEI 60216-1:1990, *Guide pour la détermination des propriétés d'endurance thermique de matériaux isolants électriques – Première partie: Guide général relatif aux méthodes de vieillissement et à l'évaluation des résultats d'essai*

CEI 60364-4-42:1980, *Installations électriques des bâtiments – Quatrième partie: Protection pour assurer la sécurité – Chapitre 42: Protection contre les effets thermiques*

CEI 60694:1996, *Spécifications communes aux normes de l'appareillage à haute tension*

CEI 60721-2-1:1982, *Classification des conditions d'environnement – Deuxième partie: Conditions d'environnement présentes dans la nature – Température et humidité*

CEI 60890:1987, *Méthode de détermination par extrapolation des échauffements pour les ensembles d'appareillage à basse tension dérivés de série (EDS)*

CEI 60947-1:1988, *Appareillage à basse tension – Première partie: Règles générales.*

1.3 Définitions

Pour les besoins du présent rapport, les définitions du Vocabulaire Electrotechnique International s'appliquent, ainsi que les suivantes:

1.3.1

température de l'air ambiant θ_a

température de l'air environnant un appareil complet, et définie suivant des conditions prescrites [VEI 441-11-13]

NOTE Pour les appareils installés à l'intérieur d'une enveloppe, c'est la température de l'air à l'extérieur de l'enveloppe.

1.3.2

contact (d'un appareil mécanique de connexion)

pièces conductrices destinées à établir la continuité d'un circuit lorsqu'elles se touchent et qui, par leur mouvement relatif pendant la manoeuvre, ouvrent et ferment un circuit, ou dans le cas de contacts pivotants ou glissants, maintiennent la continuité du circuit.
[VEI 441-15-05]

NOTE Ne pas confondre cette définition avec celle du VEI 441-15-06 (pièce de contact: une des parties conductrices formant contact).

1.3.3

raccord (par boulons ou dispositifs équivalents)

ensemble de pièces conductrices destinés à assurer la continuité permanente d'un circuit lorsqu'elles sont assemblées au moyen de vis, de boulons ou de dispositifs équivalents.
[3.5.10 de la CEI 60694]

1.4 Symboles

La liste des symboles utilisés dans le présent rapport est donnée dans l'annexe F.

Section 2: Théorie

NOTE La présente théorie s'applique aussi bien aux «contacts» qu'aux «connexions», tels que définis en 1.3.2 et 1.3.3. Pour des raisons pratiques, seul le mot «contact» est utilisé dans la section 2.

2 Généralités sur la nature du contact électrique, le calcul et le mesurage de la résistance ohmique des contacts

2.1 Contacts électriques et bornes de raccordement

Le contact électrique, dans sa configuration la plus simple et la plus générale, résulte de la mise en contact de deux pièces en matériau conducteur, généralement métallique. Dans le cas des bornes de raccordement, il s'agit de la borne elle-même et du conducteur qui lui est raccordé.

La zone active est l'«interface» de contact qui est le siège du passage du courant d'une pièce à l'autre. C'est dans cette région que réside la résistance de contact, source d'échauffement par effet Joule, et c'est aussi où s'exerce le vieillissement par réaction chimique avec l'atmosphère ambiante.

2.2 Nature du contact électrique

Lorsqu'on applique deux pièces métalliques l'une contre l'autre, le contact ne s'effectue pas sur toute la surface apparente de contact, mais seulement en un certain nombre de points appelés «contacts élémentaires».

La section effective totale de ces contacts est égale à la surface d'appui S_a ¹⁾ si l'on néglige à l'interface des contacts la présence éventuelle d'impuretés (poussières, etc.). En outre, une fine couche d'air ou d'oxyde, dont l'effet sur la résistance de contact sera examiné ultérieurement (voir 2.3), est normalement présente.

Dans ce qui suit, pour la commodité des calculs et pour une meilleure compréhension des mécanismes de contact, on suppose qu'il existe, sur la surface apparente de contact, n contacts élémentaires, uniformément répartis, de rayon moyen constant a (voir figure 1). La distance moyenne entre contacts élémentaires est l .

La surface réelle de contact est alors:

$$S_a = n \pi a^2$$

1) Pour l'explication des symboles utilisés dans la présente norme, se reporter à l'annexe F.

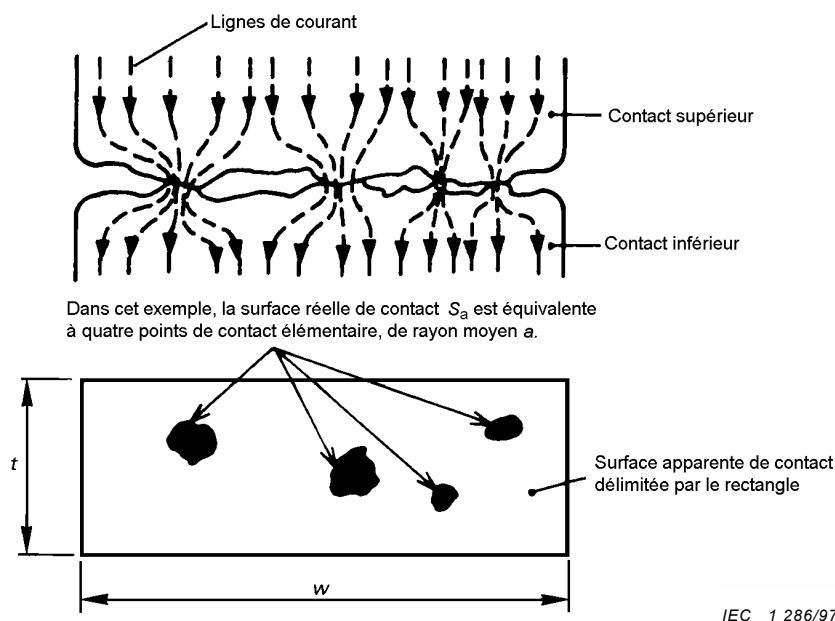


Figure 1 – Illustration des surfaces apparente et réelle de contact

La surface d'appui S_a dépend du plus ou moins grand écrasement des contacts l'un sur l'autre, c'est-à-dire de la force appliquée, de l'état de surface des contacts et de la dureté du matériau utilisé.

Pour les forces habituellement rencontrées en électrotechnique, la surface d'appui est pratiquement celle où la force appliquée atteint la résistance à la rupture du matériau, caractérisée par la «dureté» de celui-ci.

En effet, les aspérités existant sur chacune des deux surfaces avant la mise en contact, et qui sont dues à la préparation antérieure de la surface, ont des dimensions réduites (de l'ordre de 1/100 mm) et sont écrasées, même pour des forces faibles de l'ordre de 0,1 N.

Admettant que la pression exercée sur la surface d'appui est égale à la dureté de contact du métal (H), on obtient:

$$\frac{F}{S_a} = \xi H$$

Cependant, cette équation ne s'applique que pour une force de contact $F \geq 50$ N, c'est-à-dire:

$$S_a = n\pi a^2 = \frac{F}{\xi H}$$

où ξ est un coefficient de planéité sans dimension, dépendant de l'état des surfaces en contact, de valeur habituellement comprise entre 0,3 et 0,6 pour des efforts courants, mais qui peut être nettement plus faible après un polissage intense des surfaces de contact l'une contre l'autre.

Par suite, le rayon a de contact élémentaire est donné par la relation:

$$a = \sqrt{\frac{F}{n\pi\xi H}} \quad (1)$$

Le nombre n de contacts élémentaires peut être évalué de façon approchée par la formule:

$$n = n_k H^{0,625} F^{0,2} \quad (2)$$

où $n_k \approx 2,5 \times 10^{-5}$ (Unités SI)

Cette expression ne donne que l'ordre de grandeur du nombre de contacts élémentaires. Les valeurs de n_k peuvent différer de façon notable de la valeur estimée, par exemple entre $0,5 \times 10^{-5}$ et 30×10^{-5} (Unités SI)

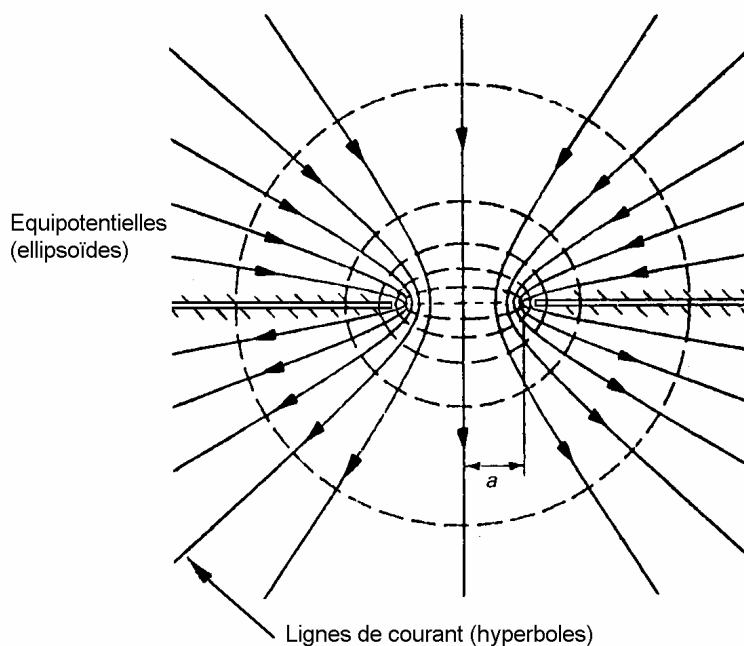
2.3 Calcul de la résistance de contact

La résistance de contact se compose de deux termes:

- la résistance de constriction, due au resserrement des lignes de courant lorsqu'elles traversent les contacts élémentaires;
- la résistance de film, correspondant à la pellicule d'oxyde ou de molécules adsorbées existant à l'interface.

2.3.1 Calcul de la résistance de constriction

Soit (figure 2) un contact élémentaire idéalisé de rayon a . Si les conducteurs électriques sont grands par rapport au contact élémentaire, les lignes de courant sont des hyperboles de foyers situés aux extrémités du diamètre du contact élémentaire et les surfaces équipotentiels sont des ellipsoïdes aplatis de mêmes foyers.



IEC 1 287/97

Figure 2 – Equipotentiels et lignes de courant au niveau d'un contact élémentaire

La résistance $R_{(a,l)}$ entre le point de contact (pointillé épais de la figure 2) et la demi-ellipsoïde de demi-grand axe l (l étant la distance moyenne entre les contacts élémentaires voisins et ρ la résistivité du métal) est égale à la moitié de la résistance de contact, qui s'écrit:

$$R_{(a,l)} = \frac{\rho}{2\pi \cdot a} \arctan \frac{\sqrt{l^2 - a^2}}{a}$$

C'est-à-dire, si l est grand par rapport à a , ce qui est le cas le plus courant:

$$R_{(a,l)} (l/a \rightarrow \infty) = \frac{\rho}{4a}$$

du fait que la résistance de constriction est la somme des deux moitiés,

$$R_{(e)} = \frac{\rho}{2a} \quad (3)$$

Pour un contact réel comprenant n points de contact élémentaire relativement dispersés, la résistance de constriction est:

$$R_e = \frac{\rho}{2na} \quad (4)$$

2.3.2 Calcul de la résistance de film

Les points de contact élémentaire ne présentent généralement pas une interface exempte de corrosion. En effet, toute surface métallique initialement pure se recouvre d'une couche moléculaire d'oxygène, conduisant en quelques minutes à la formation d'un film homogène d'oxyde de quelques nanomètres d'épaisseur. Si cette couche est suffisamment compacte et uniforme, elle protège dans une certaine mesure le métal; l'oxydation peut alors s'arrêter et le métal devient passif; c'est le cas en particulier de l'aluminium et de l'acier inoxydable à la température ordinaire.

Pour d'autres métaux (cuivre, nickel et étain, en présence d'oxygène; argent, en présence de gaz sulfureux), la formation de cette première couche de produit d'oxydation ou de corrosion ralentit la réaction ultérieure qui se poursuit cependant, mais de plus en plus lentement.

Pour certains autres métaux (fer), la vitesse «d'oxydation» est à peu près constante, car la surface n'est pas protégée par la couche formée.

Les principales formules des réactions chimiques de la surface donnant l'épaisseur s formée en fonction du temps t et de la température thermodynamique T figurent dans l'annexe D pour différents métaux.

Elles dérivent de la formule générale:

$$s = X \cdot \exp \left(- \frac{w}{2kT} \right) \cdot \sqrt{t} \quad (5)$$

Si l'énergie d'activation w est exprimée en électron-volts, il faut multiplier w par $1,6021 \times 10^{-19}$ J/eV. X est une constante et k est la constante de Boltzmann.

Cette couche d'oxyde, de faible épaisseur, ne présente pas, au passage du courant, une résistance purement ohmique telle qu'on pourrait l'évaluer par la formule:

$$\frac{\rho \times \text{longueur}}{\text{section}}$$

Elle peut en effet être franchie par les électrons suivant un mécanisme dit «effet tunnel».

La résistivité d'effet tunnel σ_o (*résistivité superficielle*) qui est utilisée pour caractériser les propriétés conductrices de cette couche s'exprime en Ωm^2 (*voir tableau 1 pour les valeurs typiques*).

La résistivité d'effet tunnel dépend de la nature de l'oxyde (ou de tout autre produit ayant une réaction à l'atmosphère) et de son épaisseur. Son épaisseur ne dépasse généralement pas 10 nm.

Si la couche d'«oxyde» recouvre uniformément la surface réelle de contact S_a , la résistance R_i apparente entre les deux faces s'écrit:

$$R_i = \frac{\sigma_o}{S_a}$$

Dans le cas de n contacts élémentaires de rayon a , la résistance R_i due à la couche d'oxyde existant à l'interface s'exprime par la relation:

$$R_i = \frac{\sigma_o}{\text{aire totale de la surface en contact}} = \frac{\sigma_o}{n \pi a^2} \quad (6)$$

Tableau 1 – Valeurs typiques de la résistivité d'effet tunnel

Métal	Etat	σ_o $\Omega \text{ m}^2$
Cuivre	Neuf	2×10^{-12} à 3×10^{-11}
	Oxydé	10^{-10}
	Etamé	10^{-12} à 4×10^{-11}
Argent		$4,6 \times 10^{-13}$ à 4×10^{-12} exceptionnellement jusqu'à $2,5 \times 10^{-11}$
Aluminium		7×10^{-11} à 10^{-9}

Les valeurs obtenues sont faibles pour les contacts neufs. La valeur minimale obtenue de $4,6 \times 10^{-13}$ pour l'argent correspond à l'épaisseur limite de deux couches monomoléculaires d'oxygène adsorbé, soit $2 \times 0,272 \text{ nm} = 0,54 \text{ nm}$.

2.3.3 Expression de la résistance totale de contact

La résistance de contact R_c est la somme de la résistance de constriction R_e [équation (4)] et de la résistance de film R_i [équation (6)], soit:

$$R_c = \frac{\rho}{2na} + \frac{\sigma_0}{n\pi a^2} \quad (7)$$

Si l'on remplace dans cette équation n et a par leurs valeurs:

$$n = n_k H^{0,625} F^{0,2} \text{ avec } n_k \approx 2,5 \times 10^{-5} \text{ (unités SI)}$$

$$a = \sqrt{\frac{F}{n\pi\xi H}} \text{ avec } \xi = 0,45$$

on obtient l'expression suivante pour R_c :

$$R_c = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi\xi}{n_k}} H^{0,1875} F^{-0,6} + \sigma_0 \xi H F^{-1}$$

Cette formule, appliquée aux différents métaux de contact, donne les valeurs de k_1 et k_2 indiquées dans le tableau 2.

Dans le cas d'un fin placage d'un métal sur un autre, il convient de prendre comme dureté celle du placage et comme résistivité celle du métal de base.

Dans le cas de contacts entre métaux différents, la résistance globale est la moyenne de la résistance calculée en utilisant les constantes pour chaque métal.

Tableau 2 - Valeurs typiques des constantes de résistance de contact, calculées pour des surfaces relativement propres (pour la substitution dans: $R_c = k_1 F^{-0,6} + k_2 \sigma_0 F^{-1}$)

Métal	Résistance de constriction k_1 $\times 10^{-6}$	Résistance de film k_2 $\times 10^6$
Cuivre	90	247
Laiton	360	450
Aluminium	130	135
Almélec	150	135
Argent	81	225
Etain	400	22,5
Nickel	420	585
Cuivre argenté	88	225
Cuivre étamé	57	22,5
Aluminium étamé	93	22,5
Laiton argenté	310	225
Laiton étamé	200	22,5

2.3.4 Résistance électrique des contacts à l'état neuf

Les contacts en cuivre étamé présentent théoriquement la résistance la plus faible par rapport aux contacts de nature différente. Cette considération n'est cependant correcte qu'à deux conditions: épaisseur d'étain suffisamment mince pour que sa résistivité n'intervienne pas et suffisamment épaisse pour que la dureté prise en compte soit bien celle de l'étain. En pratique, la résistivité obtenue dans le cas de contacts étamés neufs est comparable à celle du cuivre argenté et légèrement inférieure à celle du cuivre. Cependant, dans le cas de contacts étamés de type élastique ou soumis à des vibrations, des phénomènes d'effritement par corrosion de la couche d'étain, évoqués en 3.5, doivent être pris en compte.

La résistance de constriction est particulièrement élevée dans le cas de l'étain et du nickel, ce qui élimine l'utilisation de ces matériaux à l'état massif.

La résistance de film est élevée dans le cas du nickel et du cuivre nickelé, ce qui peut être admissible dans certains cas, compte tenu de la bonne tenue du nickel à la corrosion dans des atmosphères corrosives (salles d'accumulateurs, atmosphères comprenant du H₂S, etc.).

2.3.5 Mesurage de la résistance de contact

La mesure de la résistance de contact est utile soit pour les essais de développement ou les essais individuels de série afin de contrôler la production par comparaison avec le spécimen qui a subi avec succès l'essai d'échauffement. La résistance de contact est mesurée habituellement en injectant un courant continu à la jonction (afin d'éviter les effets d'inductance), et en mesurant la chute de tension obtenue dans la jonction.

Pour des raisons de comparaison, il est important de mesurer la chute de tension à un endroit bien défini. Le mesurage de la résistance de contact avec un courant bien inférieur au courant de service normal pourrait donner des valeurs incorrectes, particulièrement lorsque les contacts à ressort ont été manoeuvrés «à vide».

De plus, il convient que la tension d'alimentation de l'essai soit suffisante pour perforer toute couche superficielle, sans dépasser la tension de service du matériel en essai. Il est recommandé d'apporter une attention toute particulière pour éviter toute erreur due aux effets thermoélectriques.

3 Mécanismes de vieillissement des contacts et des bornes de raccordement

3.1 Généralités

Le vieillissement des contacts électriques fermés, non soumis à l'érosion d'arc (c'est en particulier le cas des bornes) est essentiellement dû à la réaction des métaux à l'environnement ambiant, à l'interface des contacts.

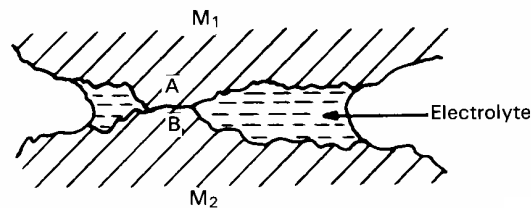
Cette réaction peut être:

- d'origine électrochimique (corrosion): cas de contacts bimétalliques ayant des potentiels électrochimiques incompatibles en présence d'humidité notable (> 50 % h.r.);
- d'origine chimique: l'oxydation est due au milieu ambiant (oxygène de l'air, vapeurs sulfureuses telles que H₂S ou SO₂).

Ces deux aspects sont couverts dans le présent rapport.

De plus, il y a des effets thermomécaniques, comprenant la relaxation, les variations dimensionnelles et de fluage qui sont aussi activés d'une manière thermique et ont pour effet de réduire la force de contact et d'augmenter la résistance de contact, mais ceux-ci ne sont pas décrits dans le présent rapport. Ce procédé de dégradation complexe est en général très difficile à modéliser, car il est subordonné à la conception et aux matériaux de fabrication. Pour certains dispositifs, les connecteurs par exemple, les effets sont si compliqués et variés qu'il n'existe aucune courbe simple de dégradation due à la température.

3.2 Contacts de métaux différents



IEC 1 288/97

Figure 3 – Contacts entre métaux différents en présence d'humidité (adsorption d'eau)

La corrosion de contacts de métaux différents M₁ et M₂ se produit si les conditions suivantes sont réunies:

- métaux différents – La différence de potentiel électrochimique apparaissant entre les bornes A et B avant contact doit être, en pratique, de l'ordre de 0,35 V ou plus;
- présence d'un électrolyte – Le film d'eau adsorbée sur les surfaces en contact par suite de l'humidité ambiante peut remplir ce rôle;
- présence d'un agent oxydant – Le terme «oxydant» est pris ici dans le sens général de transfert d'électrons dont la présence est nécessaire pour dépolariser la pile formée et permettre le passage du courant. L'air ambiant suffit à cet usage;
- contact fermé, de manière à conduire le courant de corrosion.

Les différences de potentiel apparaissant entre les surfaces de contact M₁ et M₂ de la figure 3 en circuit ouvert sont données dans le tableau 3.

Tableau 3 – Tensions développées aux contacts bimétalliques

Valeurs en millivolts

Pole négatif		Argent	Nickel	Monel (30% Cu)	Cupro-nickel (70-30)	Cuivre	Soudure à l'argent	Bronzes*	Bronze rouge	Laitons*	Acier inox	Etain	Soudure étain-plomb	Soudure étain-argent	Plomb	Fonte gris	Aciers doux	Alliages d'aluminium*	Aluminium	Cadmium	Fer ou acier galvanisé	Alliages de zinc	Zinc	Alliages de magnésium
Pole positif		0	150	170	190	190	210	230	250	260	330	470	480	510	560	710	720	770	790	1090	1100	1110	1590	
	Argent																							
	Nickel		0	020	040	040	060	080	100	110	160	320	330	360	410	530	570	620	640	940	950	960	1440	
	Monel (30%Cu)			0	020	020	040	060	080	090	160	300	310	340	390	540	550	600	620	920	930	940	1420	
	Cupro/nickel (70/30)				0	0	020	040	060	070	140	280	290	320	370	520	530	580	600	900	910	920	1400	
	Cuivre					0	020	040	060	070	140	260	290	320	370	520	530	580	600	900	910	920	1400	
	Soudure à l'argent						0	020	040	050	120	260	270	300	350	500	510	560	580	880	890	900	1380	
	Bronzes*							0	020	030	100	240	250	280	330	480	490	540	560	860	870	880	1360	
	Bronze rouge								0	010	080	220	230	260	310	460	470	520	540	840	850	860	1340	
	Laitons*									0	070	210	220	250	300	450	460	510	530	830	840	850	1330	
	Aciers inox *										0	140	150	180	230	380	390	440	460	760	770	780	1280	
	Etain											0	010	040	090	240	250	300	320	620	630	640	1120	
	Soudure étain-plomb												0	030	080	230	240	290	310	610	620	630	1110	
	Soudure étain-argent													0	050	200	210	260	280	580	590	600	1080	
	Plomb														0	150	160	210	230	530	540	550	1030	
	Fonte grise															0	010	060	080	380	390	400	880	
	Aciers doux																0	050	050	070	370	380	390	870
	Alliages d'aluminium*																	0	020	320	330	340	820	
	Aluminium																	0	020	320	330	340	820	
	Cadmium																		0	300	310	320	800	
	Fer ou acier galvanisé																			0	010	020	500	
	Alliages de zinc *																				0	010	490	
	Zinc																					0	450	
	Alliages de magnésium																						0	

* Valeurs caractéristiques.

NOTE Ces valeurs sont indicatives. Des valeurs plus exactes existent pour des compositions spécifiques de métaux et il convient d'utiliser la valeur fournie par le fournisseur lorsqu'elle est disponible. Autrement, consulter les ouvrages spécialisés.

NOTE Ces valeurs sont indicatives. Des valeurs plus exactes existent pour des compositions spécifiques de métaux et il convient d'utiliser la valeur fournie par le fournisseur lorsqu'elle est disponible. Autrement, consulter les ouvrages spécialisés.

* Valeurs caractéristiques.

Il convient que les combinaisons acceptables pour éviter la corrosion aient des différences de potentiel inférieures à 350 mV, les valeurs les plus basses étant les meilleures.

On peut remarquer que les différences de potentiel développées entre les contacts dissemblables des principaux matériaux de contact sont faibles, mis à part les couples argent-étain et argent-aluminium qu'il convient d'éviter, surtout en atmosphère corrosive.

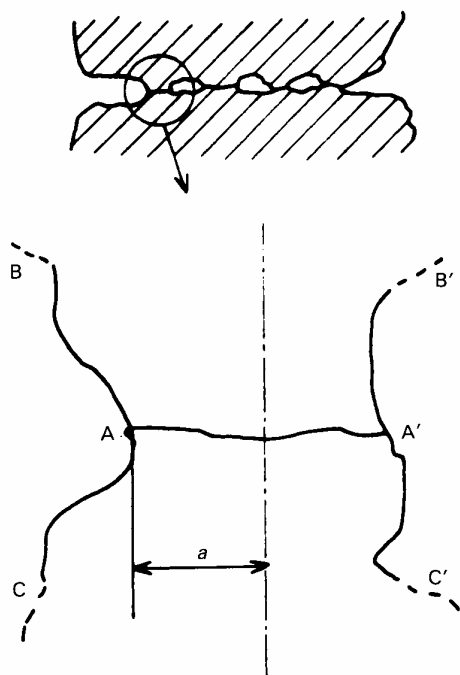
3.3 Mécanismes de vieillissement par oxydation

Chaque borne ou contact étant constitué en fait par la réunion de nombreux points de contacts élémentaires de petite dimension, c'est à ce niveau que les mécanismes de corrosion vont s'effectuer. Il existe deux processus d'oxydation qui peuvent intervenir simultanément:

- les surfaces latérales des points de contact élémentaire sont progressivement attaquées, réduisant la section de la surface conductrice;
- la couche d'oxyde de résistivité superficielle σ_o s'épaissit progressivement.

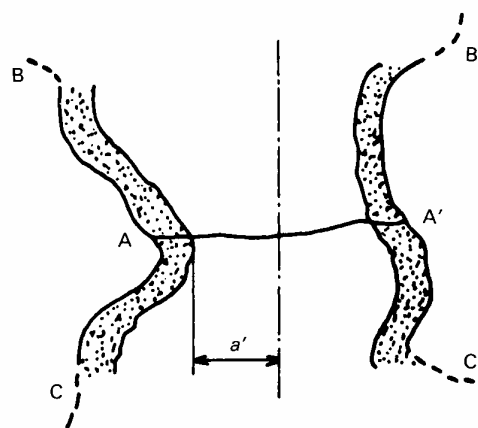
Ces deux mécanismes sont considérés successivement ci-dessous.

3.3.1 Réduction de section des contacts élémentaires



IEC 1 289/97

Figure 4 – Point de contact élémentaire de rayon a



IEC 1 290/97

Figure 5 – Oxydation d'un point de contact élémentaire

Soit, sur un contact non oxydé, un point de contact élémentaire de rayon a (voir figure 4).

La surface de contact AA' contient relativement peu d'air, en partie chassé par la fermeture de contact, et ne pouvant produire qu'une légère oxydation.

En revanche, les surfaces latérales telles que BC et $B'C'$ se trouvent exposées à l'air et sont soumises à une oxydation progressive.

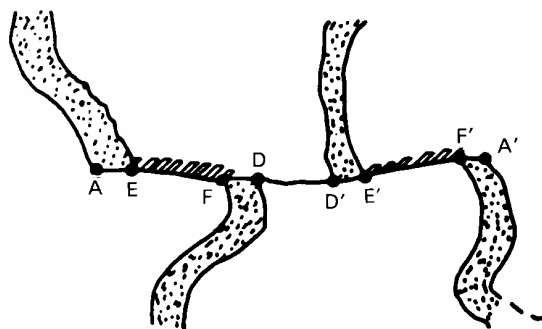
Par suite, le rayon du contact élémentaire diminue progressivement et la résistance de contact augmente (voir figure 5).

En fait, la réduction de section à laquelle conduit ce mode d'oxydation est si lent que des dizaines d'années seraient nécessaires pour entraîner une dégradation sensible du contact, même à des températures élevées. Or l'expérience montre qu'il n'en est rien en pratique et qu'un autre phénomène physique doit intervenir; en effet, il est fréquent de constater que des contacts soumis à des cycles de courant subissent une dégradation plus rapide que lorsqu'ils sont soumis à un courant constant. Ces cycles se traduisent au niveau de la surface de contact par des dilatations thermiques différentielles qui entraînent des microdéplacements des faces en contact l'une par rapport à l'autre.

Du fait de ces petits déplacements relatifs, qui peuvent également être dus à des vibrations électrodynamiques ou chocs mécaniques, la largeur de contact AA' (voir figure 5) peut se réduire à DD' (voir figure 6). Les surfaces AD et D'A' (initialement protégées) se trouvent exposées à la corrosion et, lorsque les contacts reprendront leur position initiale, la surface de contact non oxydée sera très réduite.

Cela semble entraîner un accroissement notable de l'effet d'oxydation au point de contact. Les effets des microdéplacements sont donc équivalents dans ce cas à une accélération de l'oxydation.

Ce phénomène est évidemment plus sensible pour les contacts fermés (voir 1.3.2) que pour les bornes de raccordement à serrage forcé.



IEC 1 291/97

Figure 6 – Influence d'un microdéplacement relatif sur l'oxydation d'un contact élémentaire

3.3.2 Accroissement de la couche d'oxyde à l'interface des contacts

Le deuxième mécanisme de vieillissement est le suivant (voir figure 7).

On peut supposer que, par suite des mouvements de contact (contraintes, vibrations, chocs), ainsi que par diffusion dans les interstices des deux surfaces (1) et (2) l'oxygène a partiellement accès à ces surfaces et crée entre les deux pièces de contact un film d'oxyde supplémentaire qui accroît la résistivité superficielle de la couche d'oxyde à l'interface et, par suite, augmente la résistance de contact.

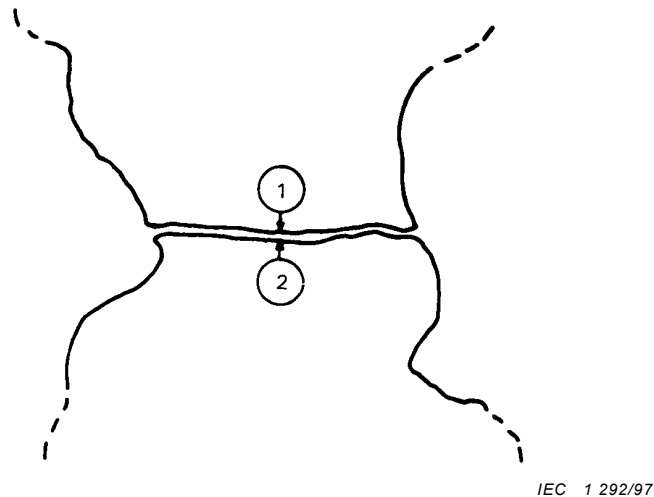


Figure 7 – Oxydation des faces en regard dans un contact

Dans le cas où les surfaces en contact sont supposées librement exposées à l'air ambiant, la résistance de contact atteindrait en un temps très bref (quelques heures) des valeurs prohibitives même pour des températures de contact très basses. Il est évident que les surfaces en contact s'offrent une protection mutuelle qui ralentit la vitesse d'oxydation, les molécules d'oxygène ne pouvant dans ce cas diffuser que très lentement.

3.3.3 Discussion et synthèse de ces deux processus de vieillissement

La réduction de la surface en contact électrique et l'accroissement de la résistivité superficielle sont deux phénomènes de vieillissement qui peuvent se produire simultanément.

Ils dépendent:

- d'une manière générale, de la structure du contact et de la nature de son milieu ambiant;
- plus particulièrement:
 - de l'intensité des contraintes entraînant des microdéplacements, telles que des contraintes thermiques dues aux cycles de courant ou aux variations électrodynamiques et vibrations,
 - de la concentration de l'élément oxydant dans le milieu ambiant du contact.

En pratique, il est assez difficile de faire la part de chacun des deux phénomènes et l'analyse ne peut prendre en compte qu'un mécanisme à la fois. Les résultats sont cependant si proches pour chacune des hypothèses qu'il est possible de dégager une conclusion commune, quelle que soit la manière dont le vieillissement du contact ou de la borne s'opère.

3.4 Résultats relatifs au vieillissement des contacts en cuivre

Lorsque le mécanisme de vieillissement dominant est l'oxydation du cuivre par l'oxygène de l'air, il est possible de construire un modèle mathématique représentant le comportement des contacts en fonction du temps, modèle qui peut être validé par des essais expérimentaux de courte durée. Les principaux résultats que l'on peut dégager de cette analyse sont donnés ci-dessous; d'une manière générale, il est possible de séparer l'influence de l'échauffement dû au courant propre s'écoulant entre les contacts de l'influence de la température ambiante (température du fluide environnant le contact).

D'autres mécanismes de dégradation peuvent affecter d'une manière significative le taux de vieillissement. Il n'en est pas tenu compte dans les analyses faites ci-après, parce qu'ils ne sont pas encore susceptibles d'être pris en compte par un traitement mathématique. La méthode ci-dessous peut être utilisée pour les études initiales sur papier, mais on insiste sur la nécessité de faire des essais de développement, car les autres mécanismes prédominent dans de nombreux cas.

3.4.1 Influence de l'échauffement

Un contact ou une borne sujet à l'oxydation par l'air uniquement verra sa durée de vie réduite de moitié si son échauffement augmente de $\Delta_i(K)$, Δ_i étant donné en fonction de l'échauffement initial (les résultats empiriques tels que décrits à la figure 8 confirment cette estimation). ΔT_i est l'échauffement du composant par rapport au fluide environnant.

D'une manière générale, quand l'échauffement d'un contact ou d'une borne passe de la valeur ΔT_{i1} à la valeur ΔT_{i2} , la durée de vie est multipliée par un facteur de vieillissement K_i qui a pour expression, pour des écarts modérés entre ΔT_{i1} et ΔT_{i2} :

$$K_i = 2^x \quad \text{où} \quad x = \frac{\Delta T_{i1} - \Delta T_{i2}}{\Delta i}$$

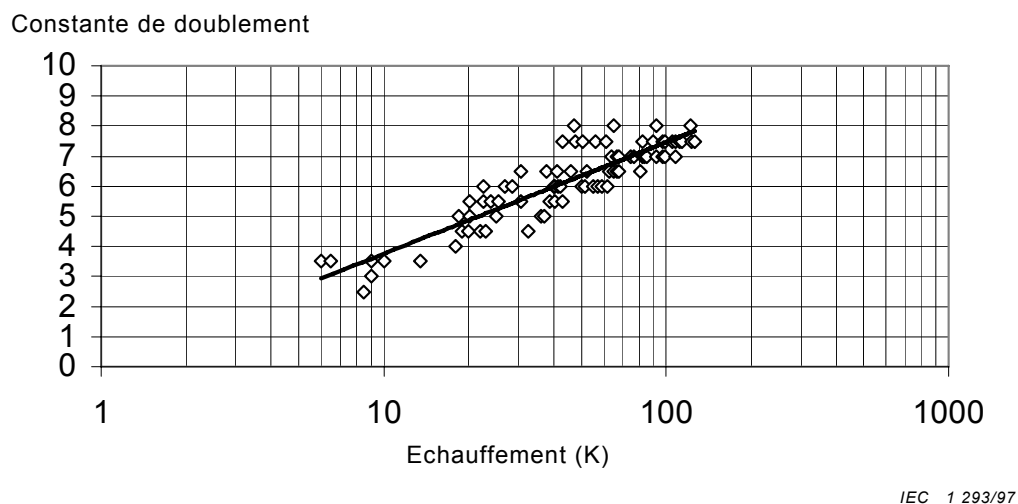


Figure 8 – Constante de doublement Δ_i en fonction de l'échauffement (résultats empiriques pour des contacts en cuivre)

Exemple: soit un contact électrique en cuivre dans l'air, présentant un échauffement initial de 35 K. La constante de doublement Δ_i est d'environ 6 K. Si l'on veut surcharger ce contact de telle sorte que son échauffement initial soit de 45 K, toutes choses étant égales par ailleurs, sa durée de vie sera réduite d'un facteur

$$2^{\frac{35-45}{6}} = 0,315$$

c'est-à-dire qu'elle sera divisée par approximativement 3,2.

NOTE Il est incertain d'effectuer des calculs fondés sur une extrapolation de ces résultats en dehors du domaine des valeurs expérimentales.

3.4.2 Influence de la température ambiante

Toutes choses étant égales par ailleurs, un contact ou une borne verra sa durée de vie divisée par deux si la température du milieu ambiant augmente de Δ_e (K). Les résultats empiriques de Δ_e sont donnés à la figure 9 en fonction de l'échauffement initial.

D'une manière générale, quand la température du fluide environnant un contact ou une borne passe de la valeur T_{e1} à la valeur T_{e2} , la durée de vie est multipliée par un facteur de vieillissement K_e qui a pour expression:

$$K_e = 2^y \quad \text{où} \quad y = \frac{T_{e1} - T_{e2}}{\Delta_e}$$

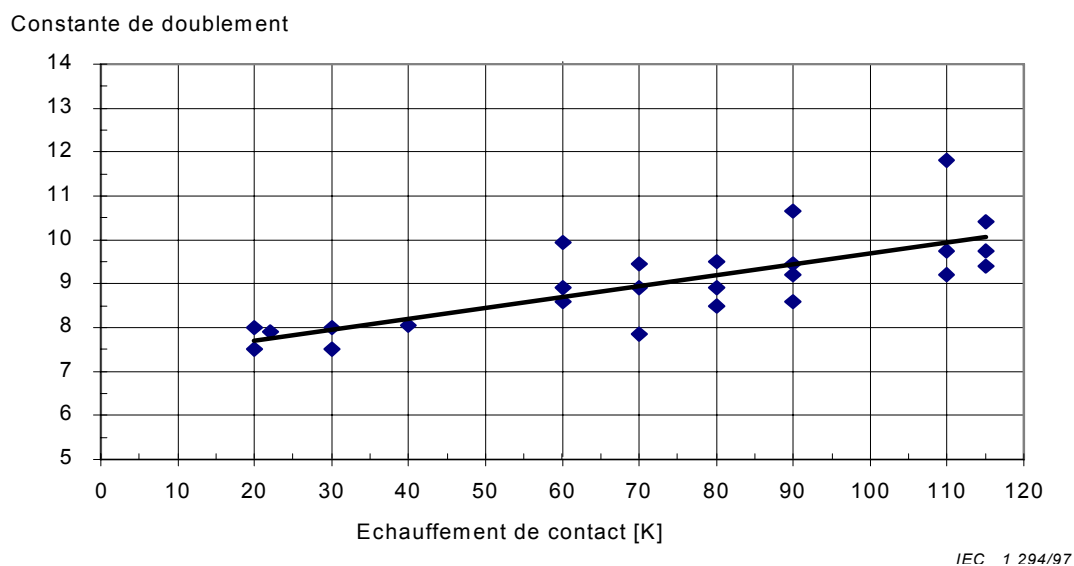


Figure 9 – Constante de doublement Δ_e exprimée comme l'échauffement prescrit du fluide environnant, en fonction de l'échauffement ΔT_i du contact (matériau de contact: cuivre, fluide: air)

NOTE Il est incertain d'effectuer des calculs fondés sur une extrapolation de ces résultats en dehors du domaine des valeurs expérimentales.

Ainsi, pour ce contact en cuivre présentant un échauffement ΔT_i de 35 K, un accroissement de $\Delta_e = 8$ K de la température du fluide qui l'environne réduira de moitié sa durée de vie.

3.4.3 Influence combinée de l'échauffement du contact et de l'échauffement du fluide environnant

Lorsque l'échauffement d'un contact ou d'une borne et la température du milieu ambiant varient simultanément, les deux effets se combinent et le facteur de vieillissement global K_{th} a pour expression:

$$K_{th} = 2^{[x+y]} \quad (9)$$

3.5 Mise en oeuvre et précautions à prendre lors de l'utilisation des matériaux de contact

Le cuivre nu voit sa tenue se dégrader sensiblement avec le temps et la température. Il est imprudent de dépasser 60 °C à 85 °C (valeur à déterminer suivant la mise en oeuvre du métal dans les contacts et suivant la nature de l'atmosphère) et d'utiliser ce matériau pour des contacts demeurant longtemps fermés à leur courant thermique assigné (comme les disjoncteurs d'arrivée). Il convient de lui préférer, dans ce dernier cas, le cuivre argenté dont le vieillissement est faible en atmosphère non sulfureuse.

A titre d'exemple, il est intéressant de calculer la résistance de contacts en cuivre nickelé, étamé et argenté, pour une force de contact correspondant à 10 N et après 1 000 h d'exposition à l'air ambiant (pour la formule de calcul, voir 2.3.2).

On obtient les valeurs suivantes:

Tableau 4 – Valeurs comparatives de résistances de contact

Matériau	Résistance en mΩ
Cuivre nu	20
Cuivre nickelé	35
Cuivre étamé	6,8
Cuivre argenté	0,3

D'après le tableau 4, l'intérêt de l'étamage ou de l'argenture est évident. Le nickelage ne se révèle intéressant que dans le cas d'atmosphères polluées où l'étamage en argent ne conviendrait pas.

Voyons en détail les différentes possibilités:

- Le cuivre nickelé est approprié dans le cas d'atmosphères corrosives ou de contacts à température élevée ; situation fréquente dans certaines centrales électriques ou dans les transports ferroviaires.
- Le cuivre et l'aluminium étamés sont les matériaux préférentiels en basse tension. La faible dureté de l'étain est intéressante dans la mesure où elle conduit à des résistances de contact faibles. Au contraire, il n'est pas possible d'effectuer des manoeuvres fréquentes sur de tels contacts par suite du risque d'arrachage de la couche d'étain. L'utilisation type des métaux de contact étamé est celle des contacts des fusibles dont le changement de l'élément de remplacement (pour rétablir l'alimentation après le fonctionnement du fusible) conduit à une surface de contact neuve. Il convient de porter une attention toute particulière lorsque la température dépasse 105 °C pour l'étain, surtout lorsqu'il est associé à des contacts argentés, à cause des phénomènes de fluage qui apparaissent au-delà de cette valeur.
- Pour les contacts étamés élastiques ou boulonnés soumis à des vibrations, il peut se produire un phénomène de corrosion par effritement de la couche d'étain, conduisant rapidement à une destruction du contact, même dans le cas de courants faibles par rapport au courant assigné; il peut être préférable, dans ce cas, d'utiliser des contacts nus, argentés ou nickelés.
- L'argent est un excellent matériau de contact dont le vieillissement est faible en atmosphère exempte de vapeurs sulfureuses.
- L'aluminium est inutilisable sans élimination de sa couche d'alumine isolante par brossage sous graisse ou par un autre traitement spécial recommandé par le fabricant.

4 Calcul des échauffements des conducteurs, des contacts et des bornes de raccordement

4.1 Représentation symbolique

La figure 10 représente, à titre d'exemple théorique, la variation de température le long de deux conducteurs formant contact en bout.

Dans le cas de contacts réels (par exemple un conducteur aboutissant à une borne), la variation de température le long du conducteur n'est généralement pas symétrique.

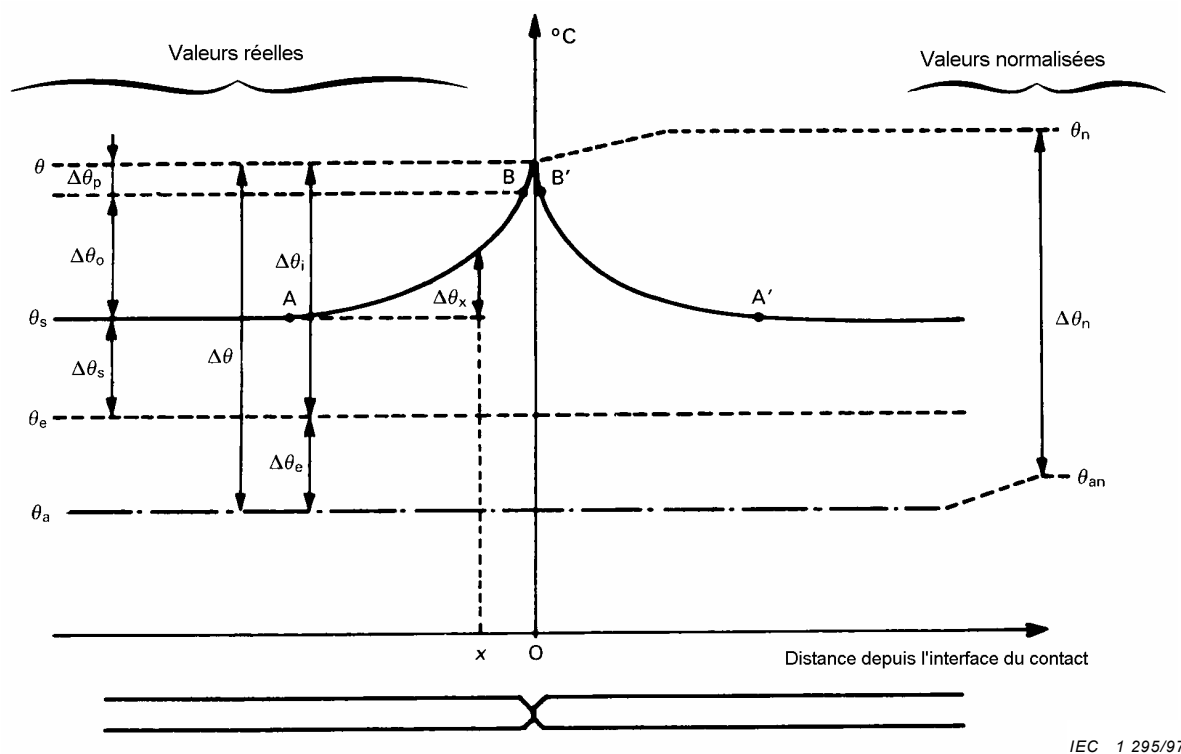
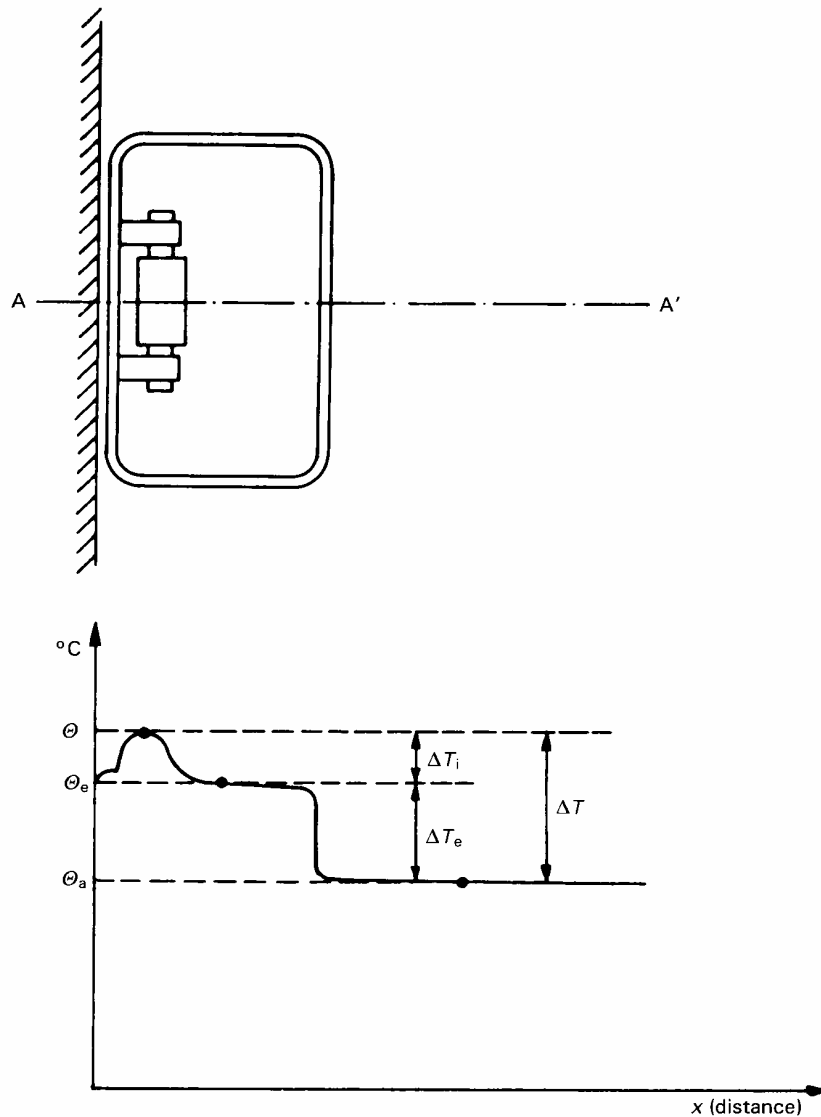


Figure 10 – Symboles utilisés pour la représentation des températures et des échauffements; exemple choisi: contacts en bout

La figure 11 représente un cas pratique de fusible à l'intérieur d'un coffret de branchement.



IEC 1 296/97

Figure 11 – Températures et échauffements le long de l'axe AA' dans un coffret de branchement comportant un fusible

Examinons maintenant la définition des principaux paramètres qui contribuent à la température maximale θ du contact ou de l'organe considéré.

Cette température maximale θ est la somme des termes suivants:

$$\theta = \theta_a + \Delta T_e + \Delta T_s + \Delta T_o + \Delta T_p$$

où

θ_a est la température ambiante externe, dont la définition normalisée est donnée en 1.3.1.

ΔT_e est l'échauffement de l'air environnant le contact ou l'organe considéré, par rapport à la température ambiante θ_a ; si l'organe se trouve à l'intérieur d'une enveloppe, la température de l'air environnant cet organe sera donc :

$$\theta_e = \theta_a + \Delta T_e$$

ΔT_s est l'échauffement propre au conducteur [température θ_s (°C) ou T_s (K)] en l'absence du contact. Les contacts électriques et les conducteurs sont, dans la majorité des cas, refroidis par rayonnement et convection naturelle, parfois par convection forcée (vitesse de l'air supérieure à environ 0,3 m/s à 0,4 m/s, cas des lignes aériennes ou des conducteurs placés à l'extérieur) ;

ΔT_o est l'échauffement au voisinage du contact ; en effet, la quantité de chaleur, en joules, produite par effet Joule dans la résistance de contact s'évacue le long de la périphérie du conducteur, produisant une répartition décroissante des températures, comme indiqué dans les segments de courbe BA et B'A' de la figure 10. L'échauffement maximal est atteint pour x tendant vers zéro ;

ΔT_p représente l'échauffement supplémentaire au niveau des contacts élémentaires, dû à l'évasement des lignes de flux thermique à partir de l'interface des contacts élémentaires. La valeur de ce terme est généralement faible par rapport aux termes précédents.

Les formules exprimant ces différents termes sont données ci-après.

4.2 Echauffement ΔT_s d'un conducteur par rapport à la température T_e du fluide environnant

L'échauffement d'un conducteur simple horizontal, illimité, à l'air libre par rapport à la température ambiante s'exprime par la relation générale :

$$\Delta T_s = \frac{\left[(T_e + \Delta T_s - 273,15) \alpha + 1 \right] R_0 I^2 + r \varphi_s S_r}{Bl \sigma \varepsilon \frac{(T_e + \Delta T_s)^4 - T_e^4}{\Delta T_s} + \frac{\lambda}{D_h} N_u} \quad (10) \text{ [Réf. 3]}$$

NOTE Toutes les températures T sont exprimées en kelvins.

Le nombre sans dimension de Nusselt N_u utilisé dans cette formule dépend du mode de refroidissement.

Avec convection naturelle, cas général des contacts et bornes de type intérieur, on a :

$$N_u = 0,8 (G_r P_r)^{0,05} + 0,35 (G_r P_r)^{0,27} \quad (11a)$$

où

$$G_r P_r = \frac{M^2 \beta_g C_p D_h^3 \Delta T_s}{\mu_d \lambda} \quad (11b)$$

D'une manière générale, les échauffements calculés à partir de l'équation (10) sont proportionnels à la puissance entre 1,5 et 2 de l'intensité I suivant les conditions de surface. (Une valeur moyenne de 1,67 est utilisée dans les calculs ci-après.)

Avec convection forcée, cas des contacts et bornes de type extérieur comme les raccordements de lignes ou de postes, on doit utiliser:

$$N_u = 0,65 R_E^{0,2} + 0,23 R_E^{0,61} \quad (12a)$$

où

$$R_E = \frac{MvD_h}{\mu_d} \quad (\text{le nombre Reynolds}) \quad (12b)$$

Les échauffements sont alors proportionnels au carré de l'intensité. Pour le calcul numérique de ΔT_s , on remarque que ce terme se trouve également dans les deux membres de l'équation; sa résolution s'opère par approximations successives à partir d'une valeur quelconque de ΔT_s . La convergence est très rapide et quelques itérations sont généralement suffisantes pour obtenir ΔT_s à moins de 1 K près.

Les valeurs numériques pouvant être prises en compte dans les calculs sont indiquées dans les annexes B et C.

NOTE 1 Dans le calcul du produit $G_r P_r$, la quantité $\frac{M^2 \beta_g C_p}{\mu_d \lambda}$ ne dépend que du fluide (et de g) et peut s'exprimer, pour l'air atmosphérique, par la formule expérimentale approchée [Réf. 3]:

$$3,912 \times 10^{19} (273,15 + \theta_e)^{-4,69}$$

NOTE 2 De même, dans le calcul du nombre de Reynolds la quantité $\frac{M}{\mu_d}$ peut s'exprimer par la relation:

$$1,644 \times 10^9 (273,15 + \theta_e)^{-1,78}$$

4.3 Échauffement ΔT_o au voisinage du contact: échauffement des bornes de raccordement

Les équations se rapportant au refroidissement par radiation et convection naturelle sont données en annexe E.

4.4 Échauffement des points de contact élémentaires

Il existe enfin un échauffement supplémentaire au niveau des contacts élémentaires, dû à l'évasement des lignes de flux thermique à partir de l'interface des contacts élémentaires. La valeur de ce terme est généralement faible par rapport aux termes précédents; il a pour expression:

$$\Delta T_p = \frac{I^2}{2\pi^2 n^2 \lambda_c} \left(\frac{\rho}{4a^2} + \frac{\sigma_o}{a^3} \right) \quad (13) \text{ [Réf.1]}$$

où

$$a = \sqrt{\frac{F}{n\pi\xi H}}$$

$$n = n_k H^{0,625} F^{0,2}$$

$$n_k = 2,5 \times 10^{-5} \quad (\text{unités SI})$$

Section 3: Application

5 Valeurs admissibles des températures et des échauffements

5.1 Température de l'air ambiant θ_a

La définition de la température de l'air ambiant se trouve en 1.3.1. La distribution des températures de l'air ambiant est donnée dans la CEI 60721-2-1.

NOTE Dans le cas d'installations intérieures chauffées (en supposant le seuil de déclenchement des thermostats réglé à 10 °C), la température moyenne annuelle serait voisine de 15 °C. Ces valeurs, et en particulier la valeur moyenne annuelle, sont particulièrement intéressantes pour une estimation correcte du vieillissement des contacts.

Valeurs à considérer:

Pour l'ensemble de l'installation, les conditions normales de température ambiante θ_{an} souvent retenues dans les normes de la CEI sont les suivantes (sauf pour les climats extrêmement chauds et secs):

- a) la température ambiante n'excède pas 40 °C. En outre, les normes de certains pays admettent que la moyenne annuelle n'excède pas 20 °C;
- b) les valeurs minimales sont aussi prises en compte dans les normes de produits, mais ont une importance négligeable en ce qui concerne l'échauffement admissible;
- c) les limites de température ci-dessus sont applicables à des altitudes n'excédant pas 2 000 m. Pour des altitudes supérieures à 2 000 m, les observations suivantes sont applicables:

Si un appareil refroidi par l'air est destiné à être utilisé à une altitude entre 2 000 m et 4 000 m, les échauffements mesurés au cours de l'essai usuel à une altitude inférieure à 2 000 m ne doivent pas dépasser ceux du tableau 6, diminués de 1 % par 100 m de différence d'altitude du lieu de montage au-dessus de 2 000 m. Cette correction n'est en principe, pas nécessaire car l'échauffement plus élevé en altitude dû à la diminution du pouvoir de refroidissement de l'air est compensé par la diminution de la température maximale de l'air ambiant en altitude (voir tableau 5). Par conséquent, la température finale est peu changée pour un courant donné;

Tableau 5 – Température maximale de l'air ambiant

Altitude m	Température maximale de l'air ambiant °C
0 – 2 000	40
2 000 – 3 000	30
3 000 – 4 000	25

- d) remarque concernant le rayonnement solaire:

Dans le cas d'appareil installé à l'extérieur, on doit tenir compte des effets du rayonnement solaire et prendre, si nécessaire, des mesures appropriées (protection par toiture, ventilation forcée, etc.); cela ne signifie pas que l'appareil concerné puisse conduire le courant thermique normal en régime continu dans toutes les conditions de rayonnement solaire sans que certaines limites d'échauffement soient dépassées.

5.2 Température et échauffements des différents organes d'un matériel électrique

5.2.1 Facteurs sur lesquels les valeurs d'échauffement sont basées

Les valeurs indiquées par le tableau 6 sont applicables au matériel fonctionnant à un régime permanent et établi et ont été évaluées comme suit .

a) Pour les échauffements admissibles, (voir tableau 6, colonne A):

- soit à partir d'essais de longue durée correspondant à une durée de vie normale de 20 à 40 ans, et donc de valeurs entérinées par l'expérience;
- soit à partir d'essais de courte durée à régime élevé, la durée de vie à régime assigné ayant été déduite des lois de vieillissement décrites en 3.4.1 et 3.4.2.

Dans ce cas, la température moyenne θ_e de l'air environnant l'organe correspond à la température ambiante moyenne normalisée θ_{an} égale à 20 °C.

b) Pour les températures maximales à ne pas dépasser (voir tableau 6, colonne B), à partir de l'examen des propriétés des matériaux et organes (par exemple le fluage de l'étain à partir de 105 °C), la température ambiante à prendre en compte est la température maximale θ_{an} de 40 °C.

Les valeurs retenues ne sont données qu'à titre indicatif et comme base de départ. Pour une détermination plus précise, il est nécessaire de tenir compte:

- des modes de fonctionnement particuliers (continu, cyclique, de 8 h, etc.) et des constantes de temps thermiques des organes;
- des modes de fonctionnement particuliers (bilames pouvant atteindre des températures élevées, contacts au voisinage de fusibles, etc.);
- des modes d'installation (à l'intérieur d'une ou de plusieurs enveloppes);
- des régimes de température ambiante différents de ceux qui sont définis en 5.1 (par exemple zones tropicales avec des températures ambiantes pouvant atteindre 50 °C);
- des modalités d'emploi, et en particulier des raccordements conducteurs-bornes.

5.2.2 Températures maximales et échauffements admissibles

Il est nécessaire de distinguer deux groupes de valeurs:

Colonne A

- celles qui correspondent aux organes sensibles au vieillissement, mais dont la température de destruction rapide est élevée, par exemple, l'échauffement des contacts en cuivre est limité à 35 K, alors que ceux-ci peuvent atteindre une température de près de 150 °C sans destruction immédiate. Il est évident que dans ce cas, la température ambiante à prendre en compte est la température moyenne pendant la vie de l'organe, soit 20 °C dans la plupart des cas.
- Pour les organes soumis au vieillissement tels que les contacts, une durée de vie normale dépendra donc de l'échauffement spécifié dans les normes, et d'une température θ_e de 20 °C du fluide environnant l'organe.

Colonne B

- Celles qui correspondent aux organes dont la température ne doit pas dépasser une certaine valeur, sous peine de destruction très rapide sinon immédiate; dans ce cas, la température ambiante à prendre en compte est de 40 °C. Cela correspond, par exemple, à certains isolants, aux contacts étamés (fluage de l'étain: 105 °C), aux ressorts, etc.

Le tableau 6 suivant donne des valeurs types figurant dans les normes d'appareillage et de fusibles, en faisant la distinction entre échauffement maximal admissible à $\theta_c = \theta_{an} = 20$ °C et température maximale admissible pour $\theta_{an} = 40$ °C.

Pour des pièces individuelles d'appareil, les valeurs peuvent varier légèrement du fait des besoins spécifiques de chaque pièce individuelle. Pour des valeurs précises, il y a lieu de se référer à la norme de produit appropriée.

Tableau 6 – Valeurs types de limites d'échauffement et de température*

Désignation de l'organe			Colonne A Echauffement maximal K ^u ($\theta_{an} = 20\text{ °C}$)	Colonne B Température maximale °C ($\theta_{an} = 40\text{ °C}$)	Remarques
Nature du contact ^{a, c, e}	Contacts élastiques	Cuivre et alliage de cuivre, nus – dans GO ^t – dans le GNO ^t – dans l'huile Etamés dans, GO, GNO ^t , l'huile ^b e Argentés ^{b, s} ou nickelés ^b – dans GO ^t ou GNO ^t – dans l'huile Pour contacteurs, dans l'huile	35 ^p 75 ^q 40 50 75 ^q 50	105	Dégradation de l'huile
	Connexions boulonnées	Cuivre, aluminium et leurs alliages, nus – dans GO ^t – dans GNO ^t Etamés ^b dans GO ou GNO ^t , Argentés ^{b s} ou nickelés ^b , – dans GO ou GNO ^t – dans l'huile Pour contacteurs, dans l'huile	60 ^q 75 ^q 75 ^q	105 100 105	Fluage de l'étain Dégradation de l'huile Dégradation de l'huile
	Bornes ^{d, f, r}	Destinées à être raccordées à des conducteurs extérieurs au moyen de vis ou de boulons, Nues Etamées ^b Argentées ou nickelées ^b	60 ^q 75 ^q	105	Fluage de l'étain
	Autres matériaux de contact		g, h		
	Pièces métalliques	En contact avec Les isolations de la classe ^l : Y A E B F H émail: à base d'huile synthétique formant ressort à l'endroit d'une soudure à l'étain		90 105 120 130 155 180 100 120 100 ^k	Vieillessement des isolants Fléchissement permanent Rupture
Huile pour appareillage dans l'huile ^{l, m} Toute pièce métallique ou en matériau isolant en contact avec l'huile, à l'exception des contacts ^m				90 100	Dégradation de l'huile
Moteurs électriques et résistances			n		
Surfaces ^o	Des organes de commande manuels: – métalliques – non métalliques Prévues pour être touchées en service normal mais non destinées à être tenues à la main de façon continue: – métalliques – non métalliques Accessibles mais non destinées à être touchées en service normal: – métalliques – non métalliques			55 65 70 80 80 90	CEI 60364-4-42 :1980

* Pour les notes, voir page suivante.

NOTES

- a Pour les appareils de connexion dans le vide, les valeurs limites de température et d'échauffement ne s'appliquent pas aux organes dans le vide. Les autres organes ne doivent pas dépasser les valeurs de température et d'échauffement indiquées dans le Tableau 6. Les échauffements maximaux admissibles dans les GNO¹ sont les mêmes pour le cuivre argenté ou nickelé et pour le cuivre nu, en raison de l'absence d'oxygène.
- b Sont considérés comme contacts en argent les contacts en argent massif, les contacts comportant des plaquettes d'argent rapportées, les contacts argentés. D'une façon générale, pour tous les métaux revêtus, la qualité du revêtement doit être telle qu'une couche de protection subsiste dans la zone de contact:
- 1) après les essais d'établissement et de coupure (s'ils existent);
 - 2) après l'essai du courant de courte durée admissible;
 - 3) après l'essai mécanique,
- selon les spécifications propres à chaque matériel. Dans le cas contraire, le contact doit être considéré comme «nu».
- La résistance et la durée de vie des contacts nickelés seront équivalentes à celles de l'argent si l'échauffement reste dans les limites prescrites. Ceci peut être réalisé par exemple par une plus grande pression de contact.
- c Lorsque les pièces d'insertion ont des revêtements différents, ou lorsqu'une pièce est nue, les températures et les échauffements admissibles doivent être considérés comme suit:
- 1) pour les contacts élastiques, ceux dont le matériau de surface a la valeur admissible la plus faible dans le Tableau 6;
 - 2) pour les connexions boulonnées, ceux dont le matériau de surface a la valeur admissible la plus élevée dans le Tableau 6.
- d Les valeurs du couple de torsion applicable aux vis sont précisées dans la Norme de produit concernée, par exemple le Tableau IV de la CEI 60947-1 :1988.
- e Pour les fusibles, l'échauffement à considérer peut être majoré pour tenir compte de l'apport de chaleur de l'élément fusible transmis par conduction aux contacts. Voir les spécifications propres à ces organes.
- f Les valeurs de température et d'échauffement sont valables même si le conducteur relié aux bornes n'est pas protégé par un revêtement.
- g Lorsque d'autres matériaux que ceux qui sont indiqués dans le Tableau 6 sont utilisés, leurs propriétés doivent être prises en considération.
- h Limité par la nécessité de ne pas endommager les pièces environnantes.
- i La classification des isolations est indiquée dans la CEI 60085 :1984.
- j La température ne doit pas atteindre une valeur telle que l'élasticité du matériau soit diminuée.
- k Lorsque la soudure est le mode de raccordement principal de deux pièces; dans le cas contraire, cette limite peut être portée à 110 °C.
- l La mesure doit être faite à la partie supérieure de l'huile.
- m Il est recommandé de prêter une attention particulière aux questions de vaporisation et d'oxydation lorsqu'on utilise une huile de faible point d'éclair.
- n Règles en vigueur.
- o Pour les organes de commande manuels disposés à l'intérieur d'enveloppes qui sont accessibles après ouverture de l'enveloppe et qui ne sont pas utilisés fréquemment, des températures plus élevées peuvent être admises.
- La distinction entre surfaces métalliques et non métalliques dépend de la conductivité thermique de la surface considérée. Des couches de peinture et de vernis ne sont pas considérées comme modifiant la conductivité thermique de la surface. En revanche, certains revêtements plastiques peuvent réduire sensiblement la conductivité thermique d'une surface métallique et permettre de la considérer comme non métallique.
- Cette règle ne s'applique pas aux matériaux qui sont conformes aux normes qui fixent des limites de températures ou d'échauffements pour les surfaces accessibles.
- p Cette limite peut être portée à:
- 45 K – pour l'appareillage de branchement basse tension à l'aval des coffrets de comptage ou des colonnes montantes;
 - pour les contacteurs fonctionnant en service continu.
 - 65 K – pour les contacteurs fonctionnant en service de 8 h, intermittent ou temporaire, et dont les conditions d'utilisation sont celles définies dans les normes de produits concernées.
- q Limités par l'obligation de n'entraîner aucun dommage aux pièces voisines et en particulier aux isolants en contact.
- r Pour les bornes destinées à être raccordées à des conducteurs isolés, voir 5.3.2.
- s Pour certains appareillages industriels à basse tension, l'échauffement n'est limité que par la nécessité de ne pas endommager les pièces environnantes.
- t GNO= Gaz non oxydant; GO = Gaz oxydant.

- u Des valeurs plus élevées sont admises, en respectant en tout cas la Note q, si:
- la norme des produits admet des valeurs plus élevées,
- ou
- les constructeurs peuvent prouver un comportement correct des contacts au vieillissement à long terme. Dans ce cas un accord sur les valeurs acceptables devrait être trouvé entre l'utilisateur et le constructeur.

5.2.3 Influence des variations de la température du fluide environnant l'organe

Si la température θ_e au voisinage immédiat d'un organe varie:

- soit en cas d'utilisation sous un climat différent de celui qui est défini en 5.1.1,
- soit en cas de l'utilisation de l'appareil à l'intérieur d'une enveloppe,

il est nécessaire de prendre en compte:

- soit de nouvelles valeurs d'échauffement admissible,
- soit une nouvelle valeur de courant thermique assigné.

Les nouvelles valeurs doivent être évaluées en tenant compte:

- a) des organes dont les températures maximales ne doivent pas être dépassées (voir tableau 6, colonne B);
- b) des organes dont l'échauffement peut être dépassé moyennant une augmentation acceptable du vieillissement admissible (voir tableau 6, colonne A).

Les hypothèses suivantes permettent d'aboutir à l'équation (14):

- les échauffements sont proportionnels à une puissance p du courant, entre 1,5 et 2,0 suivant l'émissivité de la surface (refroidissement par rayonnement et convection naturelle¹⁾, une valeur moyenne de 1,67 a été utilisée pour certains calculs dans le présent document;
- dans l'un des cas considérés, le taux de vieillissement des contacts a été multiplié par deux lorsque l'échauffement ΔT_i augmente de 6,5 K;
- dans le cas considéré, le taux de vieillissement a été multiplié par deux lorsque la température moyenne θ_e du fluide environnant le contact augmente de 8,5 K.

Autrement dit, 1 h de fonctionnement à la température ambiante θ_e avec l'échauffement ΔT_i représente K_{th} heures de fonctionnement dans les conditions normales θ_{an} , ΔT_n , K_{th} étant donné par la formule:

$$K_{th} = 2^{\frac{\theta_e - \theta_{an}}{8,5} + \frac{\Delta T_i - \Delta T_n}{6,5}} \quad (14)$$

Un exemple numérique donné en annexe A et utilisant l'équation (14) montre que l'effet d'une courte période de température excessive ne peut être compensée par un fonctionnement de même durée à faible charge et basse température.

¹⁾ En rayonnement et convection forcée, les échauffements sont sensiblement proportionnels au carré du courant.

5.2.3.1 Cas où l'appareil présente des organes dont la température maximale admissible normalisée θ_n peut être atteinte pour la température ambiante maximale θ_{an} , de 40 °C

Dans ce cas, pour toute température ambiante θ_a supérieure, le courant thermique assigné I'_{th} de l'appareil doit être tel que:

$$I'_{th} = I_{th} \frac{\theta_n - \theta_a}{\theta_n - 40}^{1/p} \quad \text{si } \theta_a > 40 \text{ °C} \quad (15)$$

où $1,5 < p < 2,0$ en fonction de l'émissivité de la surface.

Les valeurs numériques de C_{th} sont données par le tableau 7 pour différentes températures ambiantes et températures maximales admissibles, prenant une valeur nominale de $p = 1,67$.

Tableau 7 – Facteurs de correction (C_{th}) du courant assigné

θ_n (°C) \ θ_a (°C)	55	65	70	75	80	90	100	105
45	0,78	0,87	0,90	0,91	0,92	0,94	0,95	0,95
50	0,52	0,74	0,78	0,82	0,84	0,87	0,90	0,90
55	0,00	0,58	0,66	0,71	0,75	0,81	0,84	0,85

La température θ_n à prendre en compte est la température maximale admissible ayant la plus faible valeur dans les spécifications relatives à l'appareil considéré; il est évident que ce choix doit être fait en tenant compte des principaux organes de l'appareil et non des accessoires (boutons-poussoirs, parties accessibles au toucher, etc.) pour lesquels des précautions particulières peuvent être mises en oeuvre.

5.2.3.2 Cas où l'appareil est placé sous enveloppe en supposant, comme précédemment, que l'appareil présente des organes dont la température maximale admissible θ_n peut être atteinte pour $\theta_a = 40 \text{ °C}$

Si l'appareil est placé sous enveloppe, la température de l'air à l'intérieur de l'enveloppe étant θ_e , le courant maximal I'_{th} en service continu sera:

$$I'_{th} = I_{th} \frac{\theta_n - \theta_e}{\theta_n - 40}^{1/p} \quad \text{si } \theta_e > 40 \text{ °C} \quad (16)$$

Considération sur θ_e :

θ_e dépend de la température de l'air ambiant θ_a à l'extérieur de la cellule (mesurée généralement à 1 m des parois), de la puissance calorifique transmise par les sources de chaleur internes par rayonnement et par convection, ainsi que de la ventilation de la cellule.

Pour une enveloppe ayant peu ou pas de ventilation, on peut admettre la relation suivante entre θ_e et θ_a :

$$\theta_e = \theta_a + X \Delta\theta$$

où

$\Delta\theta$ est la différence de température entre les sources de chaleur les plus importantes et la température de l'air ambiant θ_a ;

X est un coefficient de remplissage représentant la concentration du matériau à l'intérieur de l'enveloppe.

L'expérience montre que les sources de chaleur importantes (jeux de barres, fusibles) atteignent en moyenne 100 °C et que $X = 0,25$ correspond à un remplissage normal conduisant à une élévation de température de l'air de l'enveloppe de 20 K par rapport à la température de l'air ambiant.

D'où, dans ces conditions:

$$\theta_e = \theta_a + X(100 - \theta_a), \text{ avec } X = 0,25$$

A partir des hypothèses indiquées ci-dessus, on calcule le facteur de correction C_{th} . Le courant assigné (I'_{th}) pour utiliser cet appareil sous enveloppe peut être obtenu à partir de:

$$I'_{th} = C_{th} \times I_{th}$$

où

$$C_{th} = \frac{\theta_n - (1 - X)\theta_a - 100X}{\theta_n - 40} \sqrt[p]{\quad} \quad (17)$$

Les tableaux 8 et 9 donnent les valeurs du facteur de correction C_{th} , en fonction de θ_n et de θ_a , pour $X = 0,25$ et pour $X = 0,3$, prenant une valeur nominale pour p de 1,67.

Tableau 8 – Facteur de correction du courant nominal (C_{th}) pour $X = 0,25$

θ_n (°C) θ_a (°C)	55	65	70	75	80	90	100	105
0	1,52	1,33	1,28	1,24	1,21	1,17	1,14	1,13
10	1,28	1,17	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,07
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30	0,66	0,81	0,84	0,87	0,88	0,91	0,92	0,93
40	–	0,58	0,66	0,71	0,75	0,81	0,84	0,85
45	–	0,44	0,56	0,63	0,68	0,75	0,80	0,82
50	–	0,25	0,44	0,54	0,61	0,70	0,75	0,77
55	–	–	0,29	0,44	0,53	0,64	0,71	0,73

Il convient également ici de considérer la valeur de θ_n la plus faible, correspondant à l'appareil considéré dans la norme de produit applicable à l'exclusion d'organes mineurs dont les températures maximales admissibles sont faibles (boutons-poussoirs, surfaces accessibles, etc.) et qui doivent être protégés par d'autres moyens.

NOTE 1 Pour une enveloppe très remplie, comme cela se rencontre surtout en BT, on peut prendre $X = 0,3$, ce qui donne:

Tableau 9 – Facteur de correction du courant nominal (C_{th}) pour $X = 0,3$

θ_a (°C) θ_n (°C)	55	65	70	75	80	90	100	105
0	1,36	1,22	1,19	1,16	1,14	1,12	1,10	1,09
10	1,12	1,07	1,06	1,05	1,04	1,04	1,03	1,03
20	0,83	0,90	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,96
30	0,45	0,71	0,76	0,80	0,82	0,86	0,89	0,89
40	–	0,47	0,58	0,65	0,70	0,77	0,81	0,82
45	–	0,31	0,47	0,56	0,63	0,71	0,77	0,79
50	–	0,00	0,34	0,47	0,56	0,66	0,72	0,75
55	–	–	0,17	0,36	0,47	0,60	0,69	0,71

NOTE 2 Il convient de n'appliquer le facteur de correction C_{th} systématiquement que lorsque l'on ne connaît pas la valeur réelle du courant pour lequel la température admissible θ_n est obtenue. Cette valeur de courant peut être supérieure à celle du courant assigné de l'appareil.

5.2.3.3 Cas où l'appareil présente des organes dont la température maximale admissible n'est pas atteinte pour $\theta_a = 40$ °C

Dans ce cas, si la température ambiante moyenne dépasse 20 °C pendant de longues périodes, il est possible de majorer les échauffements maximaux admissibles sans que le vieillissement des organes concernés soit notablement augmenté.

Rappelons que, toutes choses étant égales par ailleurs:

- le taux de vieillissement de ces contacts en cuivre est multiplié par deux si l'échauffement ΔT_e augmente de 6,5 K ;
- le taux de vieillissement est multiplié par deux si la température θ_e augmente de 8,5 K ;
- l'échauffement total ΔT comprend l'échauffement ΔT_e de l'atmosphère interne plus l'échauffement ΔT_i de l'organe considéré par rapport à cette atmosphère.

On obtient donc

$$\Delta T = \Delta T_e + \Delta T_i$$

Si ΔT_e augmente et devient $\Delta T'_e$ par exemple, il est nécessaire de diminuer ΔT_i jusqu'à une valeur $\Delta T'_i$. Cette diminution est moindre que l'augmentation ΔT_e , de telle sorte que la nouvelle valeur de ΔT , $\Delta T' = \Delta T'_e + \Delta T'_i$ puisse être en définitive augmentée.

Un exemple numérique donné en annexe A calcule l'accroissement acceptable pour l'échauffement complet d'un contact fonctionnant dans une enveloppe à une température ambiante interne plus élevée.

5.3 Température et échauffement des conducteurs de raccordement d'un matériel électrique

5.3.1 Conducteurs de raccordement recommandés pour les essais d'échauffement

En principe, les conducteurs de raccordement doivent être disposés et raccordés comme en usage normal et leur section doit être telle qu'il ne puisse en résulter ni échauffement ni refroidissement supplémentaire pour certains organes du matériel essayé (notamment leurs bornes de connexion).

En ce qui concerne les conducteurs les mieux adaptés pour les essais d'échauffements, des recommandations sont données dans les normes de produit correspondantes.

En règle générale, pour calculer la température de l'air environnant les contacts dans une enveloppe, se référer aux normes de produit appropriées (par exemple la CEI 60890).

5.3.2 Echauffement et ses effets sur les matériaux organiques isolants. Vieillessement thermique

La plupart des matériaux organiques se détériorent en chauffant. L'état de dégradation dépend de la valeur absolue de la température et du temps d'exposition à cette température.

Il a été démontré que le taux de dégradation dans une plage de température appropriée au matériau peut être exprimée comme une fonction logarithmique de la température absolue réciproque suivant le taux de réaction chimique de la loi d'Arrhenius:

$$\log(\text{durée de vie de l'isolation}) = A' + \frac{A}{(273 + T_i)}$$

où A et A' sont des constantes pour une réaction de détérioration spécifique et T_i est la température de l'isolement en degrés Celsius.

Lorsqu'il y a plusieurs procédés de détérioration, l'équation se complique.

Des types de matériaux isolants réputés ont été classés sur la base d'une très longue durée de fonctionnement, mais plus récemment, une large gamme de polymères a été introduite et utilisée.

Une courbe de détérioration thermique d'Arrhenius, ainsi que la durée de vie, peuvent être déterminées pour tout matériau de composition précise, suivant les procédés définis dans la CEI 60216-1.

Il convient de noter ce qui suit:

- a) les caractéristiques de polymères sont déterminées par leur composition. Afin d'être certain que les caractéristiques de polymère sont maintenues, il y a lieu de faire des contrôles pendant tout le processus de production et seuls des produits chimiques de composition connue doivent être utilisés;

- b) le processus de dégradation d'un polymère peut être modifié par les matériaux avec lesquels il est en contact ainsi que la forme de l'objet auquel le polymère est appliqué. Il est donc recommandé que pour des expériences faites dans le but de définir la courbe Arrhenius pour les matériaux isolants on utilise des échantillons appropriés, par exemple des barres recouvertes d'isolants;
- c) la température et le taux d'humidité peuvent affecter les propriétés mécaniques de certains types d'isolation polymérique. Certaines sont flexibles à très hautes températures lorsqu'elles supportent les chocs mécaniques, alors qu'à basse température les mêmes matériaux peuvent s'effriter et craquer lorsqu'ils sont soumis à des chocs mécaniques tels que ceux associés aux courts-circuits;
- d) il convient de tenir compte de tout adoucissement (ou recuit) du conducteur pendant le moulage ou pendant la cuisson ou la vulcanisation du polymère;
- e) la vie de l'isolation peut aussi être affectée par les contraintes mécaniques, les vibrations et l'influence de l'environnement.

5.3.3 Cas de barres mises en parallèle

Lorsque plusieurs barres sont mises en parallèle, la résistivité apparente globale augmente, compte tenu de l'effet de peau et de l'effet de proximité du courant alternatif.

Le tableau 10 donne les valeurs typiques du coefficient par lequel il faut multiplier le courant admissible à 50 Hz à 60 Hz dans une seule barre pour obtenir le courant admissible dans une barre multiple formée de plusieurs barres élémentaires sur chant, l'échauffement étant égal dans les deux cas.

Tableau 10 – Facteurs de correction – Barres sur chant mises en parallèle
Espaceur sensiblement égal à l'épaisseur des barres

Dimensions en millimètres

Nombre de barres en parallèle	Largeur des barres										
	Epaisseur 50 mm		Epaisseur 80 mm			Epaisseur 100 mm			Epaisseur 160 mm		
	6,3	10	6,3	10	16	6,3	10	16	6,3	10	16
2	1,77	1,72	1,72	1,65	1,61	1,70	1,60	1,50	1,60	1,49	1,45
3	2,27	2,25	2,24	2,12	2,03	2,17	2,02	1,90	2,02	1,95	1,80
4	2,93	2,70	2,69	2,60	2,42	2,64	2,40	2,24	2,40	2,20	2,10

NOTE Des tableaux similaires concernant d'autres largeurs sont disponibles auprès de l'Association internationale du développement du cuivre; pour les barres d'aluminium, ils sont disponibles auprès de fournisseurs de jeux de barres aluminium.

5.4 Températures et échauffements des bornes de raccordement d'un matériel électrique – Influence sur les conducteurs raccordés

5.4.1 Formules utiles résultant de la théorie ci-dessus

La partie théorique concernant l'échauffement des bornes est traitée en E.1.

Toutefois, les relations correspondant au cas le plus fréquemment rencontré - refroidissement par rayonnement et convection naturelle, traité en E.1 sont généralement trop complexes pour une utilisation pratique, à moins d'utiliser la modélisation par ordinateur, voir article E.2.

5.4.2 Exemples numériques

Des exemples d'application numérique de la section 3 sont données en annexe A.

6 Marche générale à suivre pour la détermination des températures et échauffements admissibles

Pour un appareil donné, il est usuel de rechercher les conditions optimales d'utilisation, en fonction de ses caractéristiques propres et des conditions d'emploi: environnement, courant, régime et service.

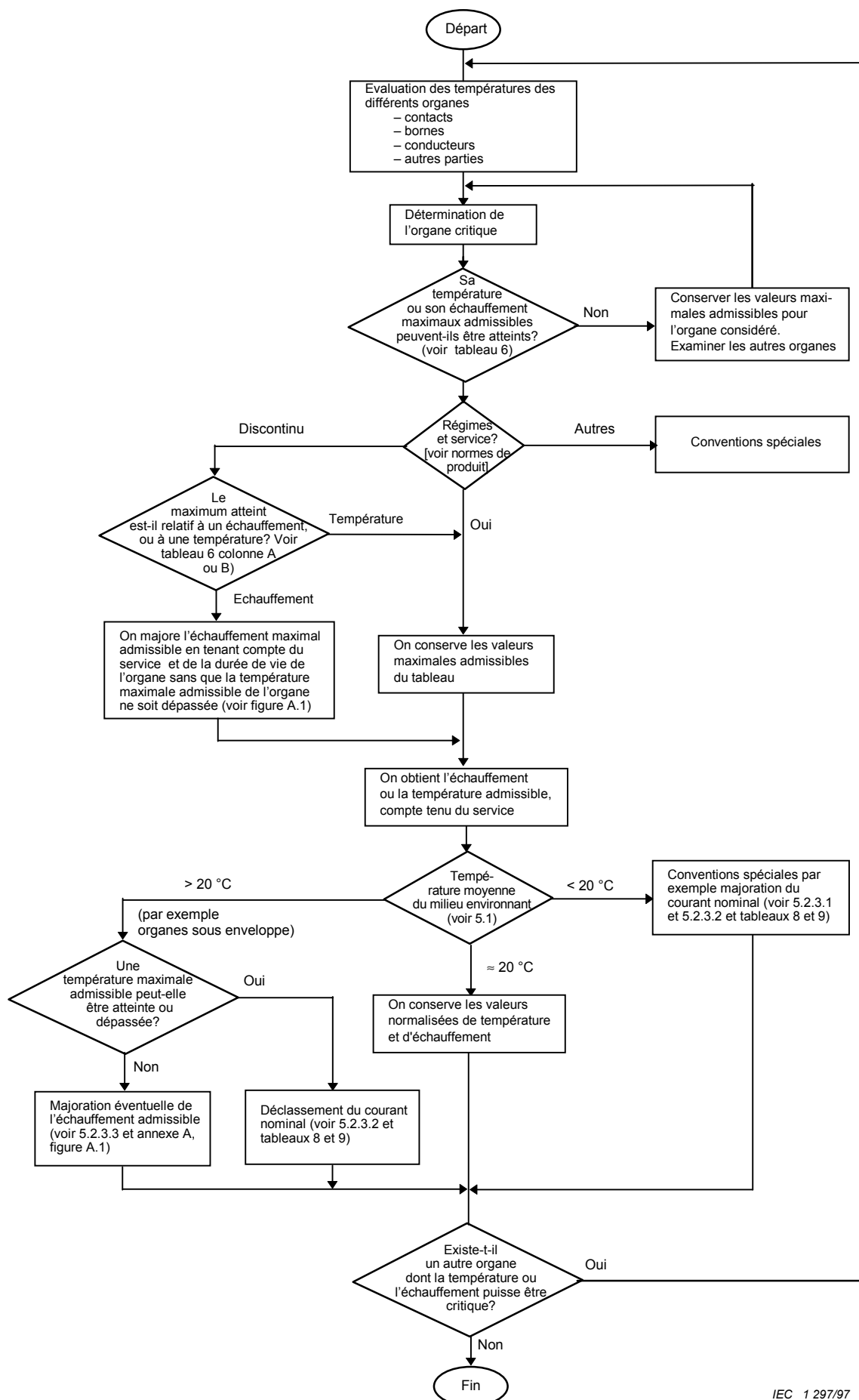
6.1 Paramètres fondamentaux

Les paramètres fondamentaux à prendre en compte pour l'utilisation d'un appareil sont:

- les caractéristiques assignées de cet appareil définies par sa norme de référence;
- le régime de service de l'appareil (continu, discontinu, etc., comme défini dans sa norme appropriée) et éventuellement sa durée de vie;
- les conditions d'environnement: l'organe est-il dans une température ambiante chaude, sous une ou plusieurs enveloppes ? Le milieu ambiant est-il pollué ou non ?

6.2 Méthode à suivre pour déterminer les températures et les échauffements maximaux admissibles

La méthode générale à suivre est représentée sous forme de l'organigramme de la figure 12.



IEC 1 297/97

Figure 12 – Organigramme de détermination des températures ou échauffements maximaux admissibles

Annexe A

Exemples numériques de l'application de la théorie et autres caractéristiques

A.1 Calculer l'effet d'une courte période de température excessive en utilisant l'équation (14)

Considérons le cas de $\theta_{an} = 20\text{ °C}$ et $\Delta T_n = 50\text{ K}$.

Si $\theta_e = 40\text{ °C}$ et $\Delta T_i = 65\text{ K}$, on obtient $K_{th} = 25,3$; la vie des contacts, en conditions normales, sera de ce fait réduite de 25,3 h pour 1 h de fonctionnement sous ces nouvelles conditions.

Il est évident que ceci ne peut pas être compensé par un fonctionnement pendant la même durée de temps à faible charge et basse température. Si, par exemple, $\theta_e = 0\text{ °C}$ et $\Delta T_i = 35\text{ K}$, on obtient $K_{th} = 0,04$; dans ces conditions, 1 h représente 0,04 h (environ 2 min) de fonctionnement normal; le gain est de 58 min seulement comparé à la réduction précédente de vie de 25,3 h.

De ce fait, il suffit simplement de vérifier sous quelles conditions la température ambiante, ou l'échauffement augmente au-dessus des niveaux normalement permis.

A.2 Exemple numérique de calcul de l'augmentation acceptable de l'échauffement total d'un contact lorsqu'il fonctionne dans une enveloppe à la température ambiante interne la plus élevée

D'après le raisonnement de la section III, en 5.2.3.3, nous voyons que:

Si ΔT_e augmente de 8,5 K et si ΔT_i diminue de 6,5 K, $\Delta T (= \Delta T_e + \Delta T_i)$ augmente de 2 K sans que le vieillissement de l'organe soit affecté.

Calcul de cette variante dans le cas le plus général:

Soit

θ_e la température ambiante à l'intérieur de l'enveloppe;

ΔT_i l'échauffement de l'organe par rapport à cette température;

θ'_e une nouvelle température ambiante à l'intérieur;

$\Delta T'_i$ un nouvel échauffement.

Le coefficient de vieillissement est calculé d'après l'équation (14), comme suit:

$$K_{th} = 2^{\frac{\theta'_e - \theta_e}{8,5} + \frac{\Delta T'_i - \Delta T_i}{6,5}}$$

En supposant que $\Delta T_e + \Delta T_i = \Delta T_n$ soit l'échauffement standard, et

que $z = \Delta T'_e - \Delta T_e$ soit l'augmentation de l'échauffement de l'atmosphère à l'intérieur de l'enveloppe, on voit que $y = (\Delta T'_e + \Delta T_i) - \Delta T_n$, augmentation de l'échauffement admissible normalisé avec K_{th} comme constante.

On obtient:

$$y = \Delta T'_e + \Delta T'_i - \Delta T_n = \Delta T'_e + \Delta T'_i - (\Delta T_e + \Delta T_i) = z + (\Delta T'_i - \Delta T_i)$$

D'où:

$$\Delta T'_i - \Delta T_i = y - z$$

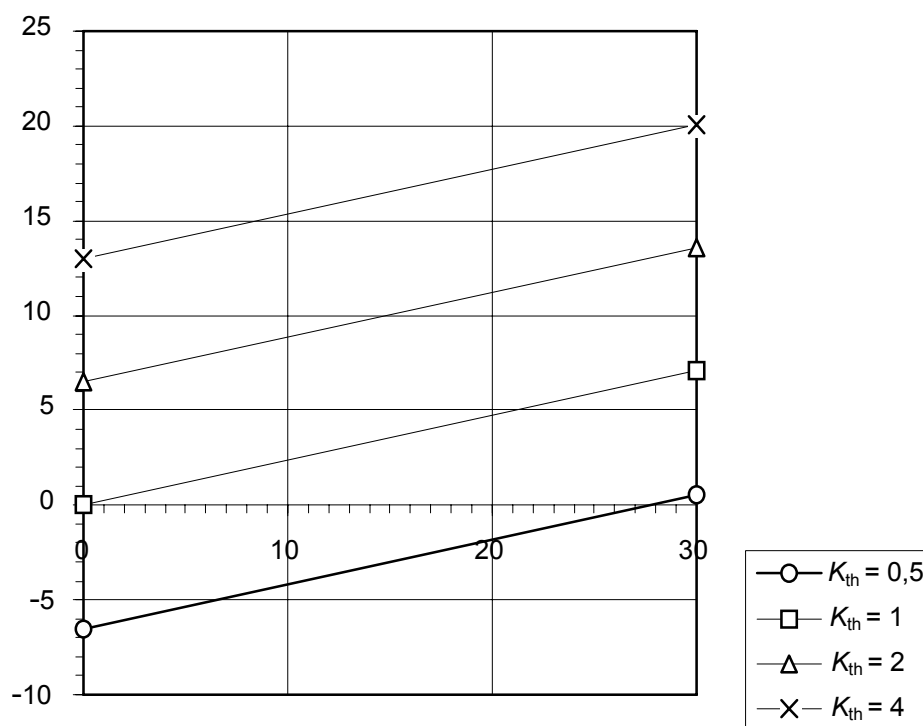
Finalement:

$$K_{th} = 2 \left(\frac{z}{8,5} + \frac{y-z}{6,5} \right)$$

Qui peut être exprimé comme suit:

$$y = 6,5 \frac{\ln K_{th}}{\ln 2} + \frac{2z}{8,5}$$

L'équation ci-dessus est graphiquement représentée à la figure A1.



IEC 1 298/97

y = Augmentation permise de la température maximale normalisée [K]

z = Augmentation de la température ambiante [K]

NOTE Cette conclusion apparemment illogique apparaît, car un courant plus petit traverse le contact pour produire un échauffement qui est de 4,7 K supérieur à la température ambiante extérieure, mais qui, lorsque l'échauffement s'élève au-dessus de la température ambiante interne (de 20 K plus élevée) sera inférieur de (20 – 4,7) K.

Figure A.1 – $y = f(z)$ Exemple d'un contact ayant un échauffement admissible normalisé de 65 K: si la température θ_e (de l'enveloppe dans laquelle il est installé, par exemple) augmente de 20 K, son échauffement admissible pourra être augmenté de 4,7 K sans changer son taux de vieillissement et 11,1 K si le taux de vieillissement peut être doublé

Annexe B

Caractéristiques physiques de quelques métaux et alliages

	Sym-bole	Masse atomi-que	Numéro atomi-que	Masse volu-mique kg/m ³	Tempé-rature de ramollis-sement °C	Tempé-rature de fusion °C	Dureté 10 ⁸ Pa	Température		Résistivité 10 ⁻⁸ Ω.m	Coefficient de température resistivité 10 ⁻³ k ⁻¹	Chaleur massique J/kg – K	Conduc-tivité thermique W/m . K	Emissivité totale		Remarques		
								°C	K					Nu	Oxydé			
Cuivre (recuit)	Cu	63,546	29	8 889	190	1 083	3,5 à 7	0	273,15	1,5881	4,265	382	390	0,05	0,7	Cuivre écroui ρ _{20 °C} =1,759 × 10 ⁻⁸ Ω.m Cuivre câblé (lignes) ρ _{20 °C} = 1,8 × 10 ⁻⁸ Ω.m		
								20	293,15	1,7241	3,93	386	387					
								36,85	310	1,838	3,69	389	382					
								60	333,15	1,995		394	378					
Laiton		70 Cu, 30 Zn		8 530		915	~ 10	0	273,15	6	1,53		119					
Cupro-tungstène		W, 35 Cu, 0,5 Ni		13 600			15	20	293,15	6,2	1,484	377	121	0,04	0,6			
								20	293,15	5,3	6		150	0,1	0,5			
Aluminium (A5L)	Al	26,9815	13	2 700	150	658	1,5 à 8	0	273,15	2,6	4,383	881	202	0,07	0,6	Conducteurs en aluminium câblé ρ _{20 °C} = 3,06 × 10 ⁻⁸ Ω.m		
								20	293,15	2,8264	4,03	891	203					
								36,85	310	3,02	3,77	900	204					
								60	333,15	3,28		910	205					
Almétec (AG5L)		Al, 0,5 Mg, 0,5 Si		2 700		552		0	273,15	3,016	3,88	890	185	0,07	0,6	Câblé Almétec ρ _{20 °C} = 3,3 × 10 ⁻⁸ Ω.m		
								20	293,15	3,25	3,6							
Alliage Al (AG3)				2 700				36,85	310	3,45	3,39	890	125	0,07	0,6			
								20	293,15	5,5								
Ductalex		Be, Cu, Mg		2 700				20	293,15	2,826	3,9	890		0,07		Alliage encore au stade expérimental		
Argent	Ag	107,868	47	10 500	180	962	2,6 à 6	0	273,15	1,47	4,08	234	418					
								20	293,15	1,59	3,77	235						
Etain	Sn	118,69	50	7 300	100	232	0,45 à 0,6	0	273,15	11	4,47	223,5	62,8	0,08	0,55	Etat amorphe (β)		
								20	293,15	12		226,4	62,5					
Nickel	Ni	58,71	28	8 900	520	1453	7,0 à 20,0	0	273,15	5,9	6,9	398	95,2	0,02		Nickel pur		
								20	293,15	6,84		412	92,5					
Exconal	Aluminium plaqué cuivre (15 % Cu en volume)			3 630				20	293,15	2,65	4,1	710	240	0,05	0,7	Surface de contact équi- valant au cuivre recuit		

Annexe C

Caractéristiques physiques de fluides diélectriques

	Pression (bar)	Température		Masse volumique ρ kg/m ³	Conduc- tivité thermique λ W/m – K	Viscosité dynamique μ_d 10 ⁻⁵ Pa . s	Compressi- bilité β 10 ⁻³ K ⁻¹	Chaleur massique C_p J/kg – K	Remarques
		°C	K						
Air	1	-23,15	250	1,4133	0,02227	1,599	4,017	1 005,4	
		0	273,15	1,2928	0,02419	1,728	3,67	1 005,6	
		20	293,15	1,205	0,02585	1,822	3,40	1 006,3	
		46,85	320	1,1033	0,02779	1,939	3,131	1 007,3	
SF ₆ Hexa- fluorure de soufre	1,3 3 5 Liquide	20	293,15	7,95	0,01355	1,52	3,33	655	Valeurs indicatives
		20	293,15	18,65	0,01355	1,52	3,33	655	
		87,5	360,65	25,3	0,0142	1,82	2,78	766	
		20	293,15	1371	0,150	29,1	7,1	1 557	
Huile	1	20	293,15	870	0,13	26	0,764	1 880	Valeurs indicatives

Annexe D

Données sur la réaction des métaux de contact
avec les substances de l'atmosphère

Métal	Réactif	Produit de réaction	Formule d'oxydation obtenue	Unités Remarques	Sources	Exemples		
						Température (°C)	Épaisseur formée × 10 ⁻¹⁰ m	
							Après 1 000 h	Après 100 000 h
Cuivre	Oxygène atmo- sphérique	Cu ₂ O	$s = \sqrt{s_0^2 + t \cdot e^{\left(34,31 - \frac{11\,700}{T_c}\right)}}$	s, s ₀ en angströms*; (s ₀ ≈ 20 Å, épaisseur d'oxyde formée immédiatement sur le métal) t = temps en heures T _c = température thermodynamique en kelvins	Rönnquist, cité par Holm (Electric Contacts, Springer Verlag)	20 55 60 85 100	21,7 35 39 87 150	37 170 210 690 1 300
Alumi- nium	Oxygène atmo- sphérique	Al ₂ O ₃	L'épaisseur d'oxyde Al ₂ O ₃ formée sur l'aluminium ne dépasse pas 50 Å, l'oxydation initiale de 20 Å étant atteinte en quelques secondes. Le film obtenu est isolant et doit être rompu pour permettre le passage du courant dans le cas de contacts électriques. La présence de vapeur d'eau favorise la croissance du film qui peut se poursuivre pendant des mois, mais très lentement			50 Å (sans préparation, inutilisable comme matériau de contact)		
Etain	Oxygène atmo- sphérique	SnO	$s = 5,22 \ln 47 t \cdot e^{\left(7,92 - \frac{2400}{T_c}\right)}$	s en angströms*, t en heures, T _c en kelvins (s ₀ ≈ 15 Å)	Britton et Bright, Metallurgica 56 (1957), p. 163	20 55 60 85 100	42 103 114 188 250	61 146 162 260 360
Nickel	Oxygène atmo- sphérique	NiO	$s = \sqrt{s_0^2 + t \cdot e^{\left(4,68 - \frac{1800}{T_c}\right)}}$	s en angströms*, t en heures, T _c en kelvins (s ₀ ≈ 10 Å)	Pilling et Bedworth, cité par Holm (Electric Contacts, Springer Verlag)	20 55 60 85 100	15,5 21 22 27 34	150 210 220 270 340
Argent	H ₂ S et vapeurs sulfu- reuses	Ag ₂ S	$t < 40 : s = 60 t^{1/3} e^{\left(27,5 - \frac{8000}{T_c}\right)}$ $40 \leq t < 70 : s = 0,121 t^{2,57} e^{\left(27,5 - \frac{8000}{T_c}\right)}$ $t \geq 70 : s = 3\,750 t^{0,15} e^{\left(27,5 - \frac{8000}{T_c}\right)}$	Dans l'air humide saturé à 20 °C contenant 2 % d'hydrogène sulfuré en volume	Frischmeister et Drott, Acta Metallurgica, vol. 7 (déc. 1959), p. 777	Dépend de la concentration en vapeurs sulfureuses Le seuil de nocivité est d'environ 1/10 ⁹ (en volume)		
	Ozone	Ag ₂ O	Reste très mince (< 10 Å) et se décompose à 200 °C Sa présence n'est pas gênante en matière de contacts			< 10 Å		
	Soufre atmo- sphérique	Ag ₂ S	$s = \sqrt{s_0^2 + t \cdot e^{\left(29 - \frac{8000}{T_c}\right)}}$	s en angströms*, t en heures, T _c en kelvins (s ₀ ≈ 16 Å)	D'après W.E. Camp- bell, Electrical Contacts, IIT 1972, p. 185	Ne dépend pas de l'humidité Dépend de la vitesse de circulation de l'air L'action du soufre libre S semble prépondérante vis-à-vis de H ₂ S ou SO ₂		

* 1 Å = 10⁻¹⁰ m.

Annexe E

Echauffement d'un conducteur refroidi par rayonnement et convection près d'une borne

NOTE 1 Lorsque les numéros d'équations ne sont pas précédés par E, elles viennent du texte principal, avec le même numéro.

NOTE 2 Pour bien comprendre le contenu de la présente annexe, il convient que le lecteur étudie les références 3, 4 et 5 de l'annexe G.

E.1 Dérivation analytique d'une équation représentant l'échauffement d'un conducteur au voisinage d'une borne, dans le cas de refroidissement par rayonnement et convection naturelle

Comme la densité de flux thermique φ peut être exprimée par l'équation $\varphi = \gamma \Delta T_x^\delta$, l'équation différentielle peut prendre la forme suivante:

$$\lambda_c S \frac{d^2(\Delta T_x)}{dx^2} - \gamma B \Delta T_x^\delta = 0 \quad (\text{E.1})$$

qui a pour solution particulière (satisfaisant aux limites $\frac{d\Delta T_x}{dx} \rightarrow 0$ pour $\Delta T_x \rightarrow 0$) après tous les calculs:

$$\Delta T_x = \frac{A}{(x+C)^{\frac{2}{\delta-1}}}$$

où

$$\begin{cases} A = \left(\frac{2(\delta+1)\lambda_c S}{(\delta-1)^2 \gamma B} \right)^{\frac{1}{\delta-1}} \\ C = \left(\frac{\gamma B A^\delta (\delta-1)}{W(\delta+1)} \right)^{\frac{\delta-1}{\delta+1}} \end{cases} \quad (\text{E.2})$$

On peut de ce fait démontrer que:

- l'échauffement supplémentaire de la borne

$$\Delta T_0 = \left(W \sqrt{\frac{\delta+1}{2\lambda_c S \gamma B}} \right)^{\frac{2}{\delta+1}} \quad (\text{E.3})$$

- la constante spatiale Δx à laquelle l'échauffement est divisé par e est donné par

$$\Delta x = \left(e^{\frac{\delta-1}{2}} - 1 \right) C \quad (\text{E.4a})$$

qui peut prendre la forme suivante:

$$\Delta x = \left(e^{\frac{\delta-1}{2}} - 1 \right) \times \frac{2^{\frac{\delta}{\delta+1}} (\delta+1)^{\frac{1}{\delta+1}}}{\delta-1} \times \frac{(\lambda_c S)^{\frac{\delta}{\delta+1}}}{(\gamma B)^{\frac{1}{\delta+1}} W^{\frac{\delta-1}{\delta+1}}}$$

ou

$$\Delta x = K \times \frac{(\lambda_c S)^{\frac{\delta}{\delta+1}}}{(\gamma B)^{\frac{1}{\delta+1}} W^{\frac{\delta-1}{\delta+1}}} \quad (\text{E.4b})$$

Les valeurs de K étant données en fonction de δ du tableau E.1:

Tableau E.1 – Valeur de K en fonction de δ

δ	K
1,0	1,0 (conditions de 4.3.1)
1,1	1,050
1,15	1,074
1,20	1,098
1,25	1,122
1,3	1,146

De l'équation

$$\Delta T_o = \frac{A}{C^{\frac{2}{\delta-1}}}$$

l'on peut déduire que

$$C = \left(\frac{A}{\Delta T_o} \right)^{\frac{\delta-1}{2}}$$

D'où:

$$\Delta T_x = \frac{A}{\left[x + \left(\frac{A}{\Delta T_o} \right)^{\frac{\delta-1}{2}} \right]^{\frac{2}{\delta-1}}} = \left[\frac{x}{\sqrt{\frac{2(\delta+1)}{(\delta-1)^2} \frac{\lambda_c S}{\gamma B}}} + \frac{1}{\Delta T_o^{\frac{\delta-1}{2}}} \right]^{\frac{-2}{\delta-1}}$$

et

$$\Delta x = \left(e^{\frac{\delta-1}{2}} - 1 \right) \frac{1}{\Delta T_o^{\frac{\delta-1}{2}}} \sqrt{\frac{2(\delta+1)}{(\delta-1)^2} \frac{\lambda_c S}{\gamma B}}$$

qui peut prendre la forme suivante:

$$\Delta x = K' \frac{\sqrt{\frac{\lambda_c S}{\gamma B}}}{\Delta T_o \frac{\delta-1}{2}} \quad (\text{E.4c})$$

K' étant donné en fonction de δ au tableau E.2:

Tableau E.2 – Valeur de K' en fonction de δ

δ	K'
1,0	1,0 (conditions de 4.3.1)
1,1	1,051
1,15	1,077
1,20	1,103
1,25	1,130
1,3	1,157

E.2 Modélisation thermique analogique

E.2.1 Introduction

En variante aux équations analytiques ou numériques décrivant les procédés thermiques dans les installations électriques, la méthode de modélisation analogique du réseau peut être utilisée comme un outil puissant et relativement simple. La méthode est basée sur le fait que les comportements du flux thermique et électrique sont décrits avec le même type d'équations différentielles. Par exemple, l'équation concernant la conduction de la chaleur thermique est tout à fait équivalente à la loi d'Ohms:

$$q = \lambda_o \frac{dT}{dx} \quad \Leftrightarrow \quad j = k \frac{dV}{dx}$$

De ce fait, les quantités thermiques tels que le flux thermique spécifique q et la température T sont respectivement équivalentes aux quantités électriques de la densité du courant j , et de la tension V . Aussi les organes tels que les résistances thermiques et électriques sont définis selon des expressions identiques.

Dans le modèle, la situation thermique réelle est de ce fait représentée par des quantités électriques données par le tableau ci-après:

Tableau E.3 – Quantités équivalentes

	Réalité	Modèle
P	Puissance (W)	Courant (A)
T	Température (K)	Tension (V)
R	Résistance thermique ($l/\lambda_c s$)	Résistance électrique ($l/\kappa s$)

L'avantage est que cette méthode n'a aucune base mathématique et il n'est nul besoin de posséder un logiciel compliqué. De plus, la relation avec les organes physiques réels peut être reconnue directement.

Pour réussir à déterminer la distribution de température au sein d'un matériel électrique, il est nécessaire de suivre les différentes phases suivantes:

- Subdivision du matériel en éléments: la taille et la nature nécessaires de l'élément sont déterminées par la structure de la configuration macroscopique (en une, deux ou trois dimensions), ainsi que par la variation des propriétés des matériaux.

Pour des fonctionnements permanents (pendant les conditions de charge normales), ces conditions sont suffisantes pour déterminer les valeurs équivalentes des résistances. En cas de fonctionnements discontinus (par exemple courant d'appel ou de courts-circuits), les dimensions sont également représentées par des condensateurs équivalents. Dans ce cas, les dimensions correctes de la subdivision en éléments sont principalement définies par l'échelle temps et le temps de réponse correspondants. Il convient que les dimensions de l'élément soient suffisamment petites afin de s'assurer que le résultat de la constante de temps thermique $t = RC$ soit infime en comparaison du temps de réponse. La finesse de la division est utile pour évaluer la partie de la région entière à modeler.

- Détermination des sources de chaleur, de la puissance de refroidissement, de la conduction et du stockage par exemple, c'est-à-dire soit en sources virtuellement ponctuelles dans les contacts de constriction, soit en répartition linéaire dans le cas d'un conducteur chauffé électriquement et plus particulièrement dans un fusible. Les pertes diélectriques et les radiations solaires peuvent également influencer le résultat. Il convient de localiser les pertes de chaleur par conduction, par convection et par rayonnement.
- Calcul des éléments électriques équivalents: la chaleur fournie électriquement dépend du carré du courant multiplié par la résistance qui peut dépendre de la température. Pour toutes ces sources thermiques, les sources électriques équivalentes peuvent être choisies. Les éléments passifs représentant la conduction thermique et l'accumulation de chaleur découlent immédiatement des dimensions de l'élément.
- Performance effective de la simulation: lorsque la modélisation analogique est faite, la simulation peut être effectuée à l'aide de programme informatisé. En plus de cette programmation particulière, plusieurs logiciels sont disponibles sur le marché pour réaliser une telle simulation.

En tant qu'exemple typique des possibilités d'un modèle analogique, l'échauffement dû au courant le long d'un conducteur est déterminé ci-dessous.

E.2.2 Détermination de la température du conducteur au voisinage d'un contact, par modèle analogique

En variante à la méthode analytique utilisée dans l'exemple numérique de l'annexe A, un modèle analogique fondé sur les possibilités usuelles de description d'un écoulement thermique et électrique, est utilisé ci-après à l'aide des équations de E.1.

Afin de permettre la comparaison des résultats, il y a lieu de prendre des conditions identiques à celles de l'exemple donné en annexe A. Le conducteur, dont la surface en cuivre est légèrement oxydée, est non isolé (émissivité $\varepsilon = 0,1$, et résistivité tunnel $\sigma_0 = 5 \times 10^{-12}$), et en position horizontale. Le conducteur a une section efficace $S = 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ et une longueur de 1 m. D'un côté, le conducteur est pressé contre un autre conducteur avec une force $F = 100 \text{ N}$. Le courant passant au travers du conducteur est de 300 A. L'on prendra en considération la convection naturelle et forcée ($v = 0,3 \text{ m/s}$).

Les constantes et dimensions correspondantes sont regroupées dans la liste suivante. Les constantes du cuivre ont été prises dans l'annexe B, et les constantes de l'air à 20 °C dans l'annexe C:

$I = 300$ [A]	courant continu
$l = 1$ m	longueur de la barre de cuivre
$S = 10^{-4}$ [m ²]	section efficace de la barre de cuivre
$B = 0,04$ [m]	périmètre extérieur du conducteur diffusant la chaleur
$D_h = 0,01$ [m]	hauteur hors tout du conducteur
$S_c = 0,01 \times 0,2 \times 4$ [m ²]	partie de la surface refroidissante du conducteur 0,2 m
$T_e = 293,15$ °C	température moyenne de l'air ambiant
ΔT_s	échauffement du conducteur en un point éloigné de tout contact
$\rho_0 = 1,5881 \times 10^{-8}$ [Wm]	résistivité du cuivre à 0 °C
$\alpha = 4,265 \times 10^{-3}$ [K ⁻¹]	coefficient de la résistivité du cuivre à la température
$R_0 = \rho_0 l / S = 1,5881 \times 10^{-4}$	résistance du conducteur à 0 °C
$\lambda_c = 387$ [W/mK]	conductivité thermique du cuivre
$\sigma = 5,670 \times 10^{-8}$ [Wm ⁻² K ⁻⁴]	constante de Stefan Boltzmann
$\varepsilon = 0$ à 1 (ici $\varepsilon = 0,1$)	émissivité du conducteur de cuivre
$M = 1,205$ [kg m ⁻³]	densité massique de l'air
$\beta = 3,4 \times 10^{-3}$ [K ⁻¹]	compressibilité de l'air
$g = 9,81$ [ms ⁻²]	accélération terrestre
$C_p = 1006,3$ [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]	chaleur massique de l'air à pression constante
$\lambda = 0,02585$ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	conductivité thermique de l'air
$\mu_d = 1,822 \times 10^{-5}$ [Pa s]	viscosité dynamique de l'air

Pour la méthode analogique, la barre sera divisée en cinq parties de 0,2 m chacune.

La barre de cuivre et le modèle électrique équivalent sont représentés à la figure E.1

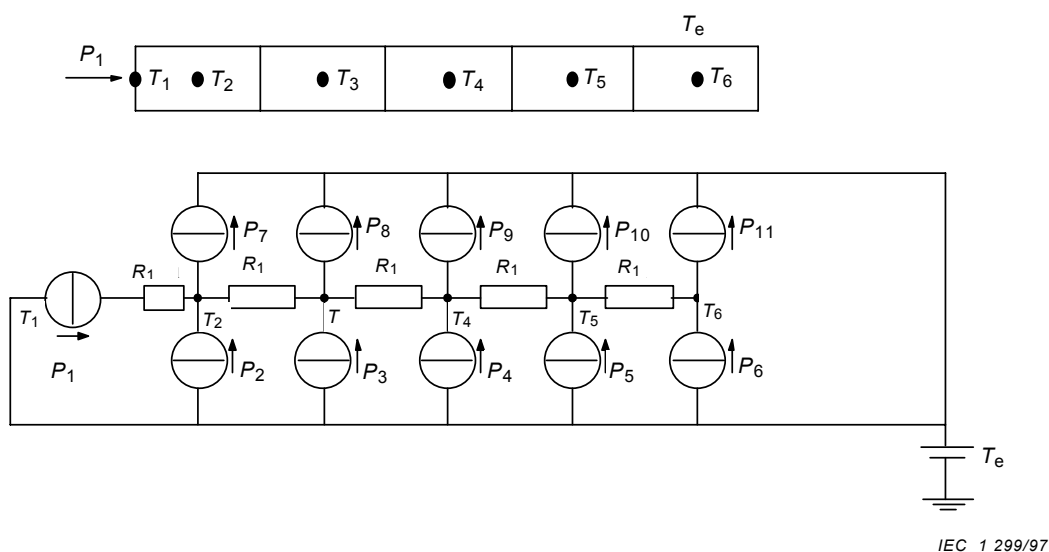


Figure E.1 – Modèle thermique pour la barre et la méthode analogique électrique

La température de l'environnement est représentée par la source de tension $T_e = 293,15$ K.

Les valeurs de la puissance thermique de Joule P_1 à P_6 sont représentées par des sources de courant positives et les pertes de puissance P_7 à P_{11} sont représentées par des sources de courant négatives.

a) *Détermination des sources thermiques*

Pour la résistance de contact, l'équation (7) est utilisée:

$$R_c = \frac{\rho}{2na} + \frac{\sigma_o}{n\pi a^2} \quad 0(7)$$

Les constantes du cuivre ont été prises en annexe B:

$\rho = 1,8 \times 10^{-8}$ [Wm]	résistivité électrique du conducteur
$\sigma_o = 5 \times 10^{-12}$ [Wm ²]	résistivité tunnel du contact de surface
$n = n_k H^{0,625} F^{0,2}$	nombre de points élémentaires de contact
$n_k = 2,5 \times 10^{-5}$	
$H = 5,5 \times 10^8$	dureté du contact
$\xi = 0,15$	coefficient de platitude
$a = \sqrt{\frac{F}{n\pi\xi H}}$	rayon du contact élémentaire

La substitution conduit à $n = 18$ et $a = 0,086$ mm et la résistance de contact $R_c = 18$ [$\mu\Omega$].

Un flux thermique W va du contact vers le conducteur.

$$W = \frac{1}{2} R_c I^2 = 0,81$$
 [W]

Ce flux thermique W est représenté par son équivalent électrique, la source de courant P_1 :

$$P_1 = \frac{1}{2} R_c I^2 = 0,81$$
 [A]0

Les pertes Joule, pour chaque élément du conducteur de 0,2 m, sont représentées par les sources de courant P_2 à P_6 , dépendantes de la température ambiante, c'est-à-dire:

$$P_2 = I^2 \frac{l}{5S} \rho_o [1 + \alpha(T_2 - 273,15)]0$$

La substitution des valeurs conduit à $P_2 = -0,4716 + 0,01219 T_2$.

Des expressions semblables sont valables pour les sources P_3 à P_6 .

b) *Représentation des résistances électriques des éléments de barre de cuivre*

La résistance électrique R_i représente la résistance thermique d'un élément de la barre de cuivre:

$$R_i = \frac{l}{5 \lambda_c S} = \frac{0,2}{387 \times 100 \times 10^{-6}} = 5,168 [\Omega] 0$$

c) *Représentation du refroidissement par convection et rayonnement*

A distance du contact où la convection et le rayonnement équilibrent l'effet Joule, l'échauffement ΔT_s du conducteur est exprimé par

$$\Delta T_s = \frac{\left((T_e + \Delta T_s - 273,15) \alpha + 1 \right) R_0 I^2 + r \varphi_s S_r}{Bl \left[\sigma \varepsilon \frac{(T_e + \Delta T_s)^4 - T_e^4}{\Delta T_s} + \frac{\lambda}{D_h} N_u \right]} \quad (10)$$

Dans le cas général des contacts et bornes d'intérieur, avec convection naturelle:

$$N_u = 0,8(G_r P_r)^{0,05} + 0,35(G_r P_r)^{0,27} \quad (11a)$$

où

$$G_r P_r = \frac{M^2 \beta_g C_p D_h^3 \Delta T_s}{\mu_d \lambda} \quad (11b)$$

Pour deux valeurs de courant $I = 200$ et 300 [A], l'échauffement ΔT_s et le flux thermique φ peuvent être définis par les équations (10), (11a) et (11b):

I A	ΔT_s K	φ Wm^{-2}
300	36,45	443,4
200	17,55	184,3

Si l'on suppose la relation $\varphi = \gamma \Delta T_s^\delta$, les constantes peuvent être calculées: $\gamma = 5,9$ et $\delta = 1,2$.

Dans le cas de **convection forcée**, il convient d'utiliser les équations (12a) et (12b) pour calculer le nombre Nusselt:

$$N_u = 0,65 R_e^{0,2} + 0,23 R_e^{0,61} \quad (12a)$$

où

$$R_E = \frac{M \nu D_h}{\mu_d} \text{ (le nombre Reynolds)} \quad (12b)$$

En cas de convection forcée ($v = 0,3$ m/s), l'échauffement ΔT_s et le flux thermique φ peuvent être déterminés par les équations (10), (12a) et (12b). La substitution des deux valeurs de courant $I = 300$ A et 200 A donnent les résultants suivants:

I A	ΔT_s K	φ Wm^{-2}
300	20,48	419
200	8,73	178

Si l'on suppose à nouveau la relation $\varphi = \gamma \Delta T_s^\delta$, les constantes deviennent respectivement $\gamma = 20,3$ et $\delta = 1,0$.

Pour chaque élément de 0,2 m du conducteur, le flux thermique total découle de la multiplication de φ par la surface de refroidissement S_c . Cette puissance de refroidissement par convection et rayonnement est représentée par les sources de courant P_7 à P_{11} .

$$P_7 = S_c \gamma \Delta T_s^\delta$$

Les paramètres $\gamma = 5,9$ et $\delta = 1,2$ sont utilisés dans le cas d'une *convection libre*:

$$P_7 = 0,0472 (T_2 - T_e)^{1,2}$$

Les paramètres $\gamma = 20,33$ et $\delta = 1,0$ sont utilisés pour une *convection forcée* ($v = 0,3$ m/s):

$$P_7 = 0,1626 (T_2 - T_e)$$

Des expressions similaires peuvent être obtenues pour P_8 à P_{11} .

Le résultat final de la simulation analogique est représentée à la figure E.2.

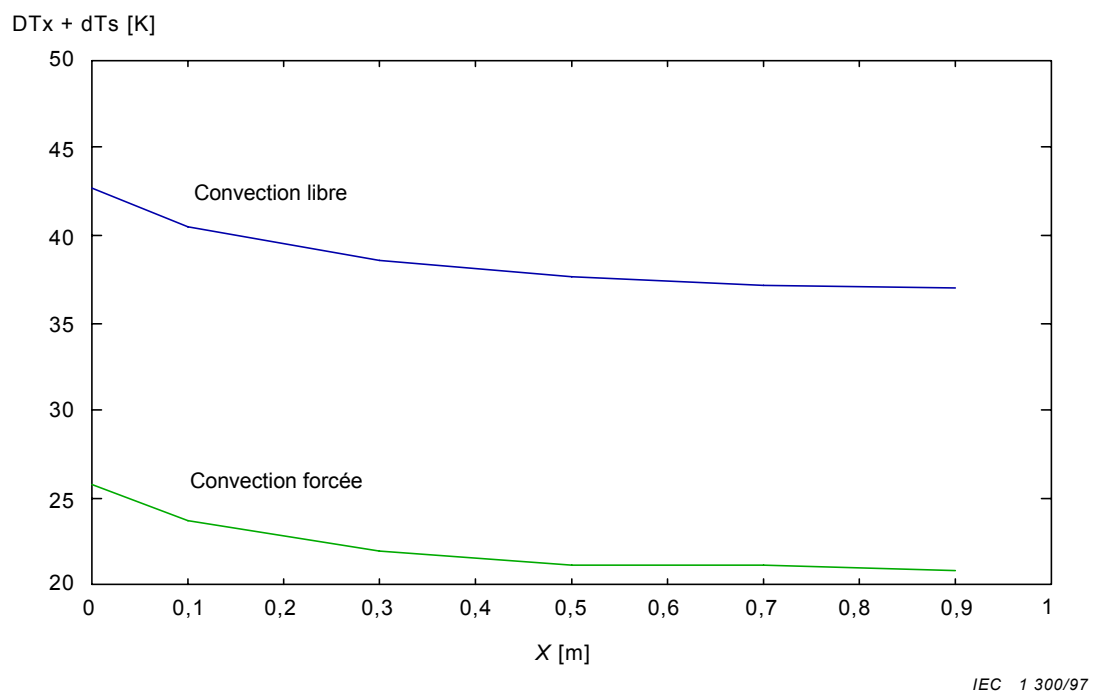


Figure E.2 – Décrément de l'échauffement le long de la barre de cuivre

Annexe F

Liste des symboles littéraux utilisés

Symbole	Désignation	Unité
A	Coefficient de la loi d'Arrhenius	K
A'	Constante de la loi d'Arrhenius	K
a	Rayon de contact élémentaire	m
B	Périmètre externe du conducteur participant à l'évacuation de la chaleur	m
C_{th}	Coefficient de correction du courant assigné	
D_h	Diamètre du conducteur aboutissant au contact, ou hauteur hors tout du conducteur, s'il s'agit d'un conducteur de section quelconque	m
e	Nombre de Néper	2,718
F	Force de pression de contact	N
G_r	Nombre de Grashof	
g	Accélération de la pesanteur	9,81 m s ⁻¹
H	Pression de rupture à l'écrasement	Pa
K_{th}	Facteur de vieillissement global (facteur de correction d'intensité)	
K_e	Facteur de vieillissement par variation de la température ambiante	
K_i	Facteur de vieillissement par variation d'échauffement	
k	Constante de Boltzmann	1,381E-23 JK ⁻¹
k_1, k_2	Constantes dans l'équation résistance/force de contact	
l	Distance moyenne entre contacts élémentaires	m
l	Longueur du conducteur considéré	m
M	Masse volumique du fluide ambiant	kg m ⁻³
N	Nombre de Nusselt	
n	Nombre de points de contact élémentaire	
n_k	Coefficient de calcul du nombre de contacts élémentaires	2,5E-5(SI)
P	Durée de vie au régime assigné	année(mois)
P_r	Nombre de Prandtl	
$R_{(a,l)}$	Résistance à la distance l du rayon de constriction a	Ω
R_c	Résistance totale du contact	Ω
R_e	Résistance de constriction du contact	Ω
R_i	Résistance de film contact	Ω
R_0	Résistance linéaire de l (m) du conducteur considéré à 0 °C	Ω
r	Coefficient de réceptivité du flux solaire	$0 \leq r \leq 1$
S	Section du conducteur	m ²
s	Épaisseur d'une couche d'oxyde	m
S_n	Surface réelle de contact: surface d'appui	m ²
S_r	Surface du conducteur recevant φ_s	m ²
T, θ	Température	K ou °C
T_a, θ_a	Température de l'air ambiant	K ou °C
T_{an}, θ_{an}	Température normalisée de l'air ambiant	K ou °C
T_c, θ_c	Température d'un contact	K ou °C
T_e, θ_e	Température moyenne du fluide environnant l'organe	K ou °C
T'_e, θ'_e	Température moyenne du fluide environnant un organe	K ou °C
T_{e1}, θ_{a1}	Une température moyenne spécifique	K ou °C
T_{e2}, θ_{a2}	Une température moyenne spécifique	K ou °C
T_n, θ_n	Valeur maximale admissible normalisée de la température de l'organe considéré	K ou °C
T'_i	Température d'isolation	K ou °C
T_s, θ	Température normalisée du conducteur	K ou °C

Symbole	Désignation	Unité
t	Temps	s
W	Puissance évacuée par la borne dans le conducteur	W
w	Energie d'activation des réactions d'oxydation	J
x	Distance	m
X	Coefficient de remplissage d'une cellule	
y	Accroissement tolérable de l'échauffement normalisé	K
z	Accroissement de l'échauffement de l'air environnant un organe $z = \Delta T_e$	K
α	Coefficient de résistivité du conducteur en fonction de la température	K ⁻¹
β	Coefficient de dilatation à pression constante du fluide ambiant	K ⁻¹
γ	Coefficient d'émission	k
Δ_e	Constante de doublement pour l'augmentation de l'air ambiant	K
Δ_i	Constante de doublement relative à une augmentation de la température ambiante	K
ΔT	Echauffement de l'organe considéré par rapport à la température T de l'air ambiant	K
Δt_e	Echauffement du fluide environnant l'organe, considéré par rapport à la température ambiante externe	K
ΔT_i	Echauffement de l'organe par rapport au fluide environnant (valeur moyenne)	K
Δt_{i1}	Echauffement initial d'un organe par rapport au fluide environnant	K
ΔT_{i2}	Echauffement final d'un organe par rapport au fluide environnant	K
$\Delta T'_i$	Echauffement d'un organe par rapport au fluide environnant	K
$\Delta \eta$	Chute de température à une distance Δl de la borne	K
ΔT_n	Echauffement maximal admissible normalisé de l'organe considéré par rapport à la température ambiante T_{an}	K
$\Delta \tau_p$	Echauffement, dû à la constriction, au niveau des contacts élémentaires	K
$\Delta \tau_s$	Echauffement du conducteur en l'absence de contact ou à grande distance du contact	K
$\Delta \tau_x$	Echauffement à une distance x du contact	K
ΔT_0	Valeur de ΔT_x pour $x = 0$	
Δx	Constante spatiale	m
δ	Exposant de ΔT dans l'expression $\varphi = \gamma \Delta T^\delta$	$0 < \delta < 1$
ε	Emissivité totale du conducteur	
λ	Conductivité thermique du fluide ambiant	Wm ⁻¹ K ⁻¹
λ_c	Conductivité thermique du conducteur	Wm ⁻¹ K ⁻¹
k	Conductivité électrique = $1/\rho$	$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$
x	Coefficient de planéité	
ρ	Résistivité	Ωm
ρ_0	Résistivité à 0 °C	Ωm
s	Constante de Stefan-Boltzmann	5,67E-8
s_0	Résistivité de l'effet tunnel de la couche d'oxyde	Ωm^2
j	Densité du flux thermique évacué à la surface du conducteur	Wm ⁻²
j_s	Densité du flux thermique solaire	Wm ⁻²

Annexe G

Bibliographie

- [1] Holm, R., *Electric Contacts* (4^e édition 1967) – Springer Verlag.
 - [2] Llewellyn Jones, *The Physics of Electrical Contacts* (1957), Oxford, Clarendon Press.
 - [3] Johannet, P., Private Communication.
 - [4] Britton et Bright, *Metallurgica* 56 (1957), p.163
 - [5] Frischmeister et Drott, *Acta Metallurgica*, vol. 7 (déc.1959), p.777
 - [6] Campbell, W.E., *Electrical Contacts*, III, 1972, p.185.
-

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch