

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC
60943**

Deuxième édition
Second edition
1998-01

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

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



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60943:1998

Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant des amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
Accès en ligne*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement (Accès en ligne)*

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Validity of this publication

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

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

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

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
On-line access*
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates (On-line access)*

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

IEC publications prepared by the same technical committee

The attention of readers is drawn to the end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

* See web site address on title page.

RAPPORT TECHNIQUE – TYPE 3

**CEI
IEC**

TECHNICAL REPORT – TYPE 3

60943

Deuxième édition
Second edition
1998-01

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

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

© IEC 1998 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembe Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

XA

*Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue*

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	6
INTRODUCTION	10
Articles	
Section 1: Généralités	
1 Généralités	14
1.1 Domaine d'application et objet	14
1.2 Documents de référence	14
1.3 Définitions.....	16
1.4 Symboles	16
Section 2: Théorie	
2 Généralités sur la nature du contact électrique, le calcul et le mesurage de la résistance ohmique des contacts	18
2.1 Contacts électriques et bornes de raccordement	18
2.2 Nature du contact électrique.....	18
2.3 Calcul de la résistance de contact	22
3 Mécanismes de vieillissement des contacts et des bornes de raccordement	30
3.1 Généralités	30
3.2 Contacts de métaux différents	32
3.3 Mécanismes de vieillissement par oxydation	36
3.4 Résultats relatifs au vieillissement des contacts en cuivre	40
3.5 Mise en oeuvre et précautions à prendre lors de l'utilisation des matériaux de contact.....	46
4 Calcul des échauffements des conducteurs, des contacts et des bornes de raccordement	48
4.1 Représentation symbolique	48
4.2 Echauffement ΔT_s d'un conducteur par rapport à la température T_e du fluide environnant	52
4.3 Echauffement ΔT_o au voisinage du contact: échauffement des bornes de raccordement	54
4.4 Echauffement des points de contact élémentaires	54
Section 3: Application	
5 Valeurs admissibles des températures et des échauffements	56
5.1 Température de l'air ambiant θ_a	56
5.2 Température et échauffement des différents organes d'un matériel électrique	58
5.3 Température et échauffement des conducteurs de raccordement d'un matériel électrique	74
5.4 Températures et échauffements des bornes de raccordement d'un matériel électrique – Influence sur les conducteurs raccordés	76

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
INTRODUCTION	11
Clause	
Section 1: General	
1 General.....	15
1.1 Scope and object	15
1.2 Reference documents	15
1.3 Definitions.....	17
1.4 Symbols.....	17
Section 2: Theory	
2 General considerations concerning the nature of electric contact and the calculation and measurement of the ohmic resistance of contacts.....	19
2.1 Electric contacts and connection terminals.....	19
2.2 Nature of electrical contact.....	19
2.3 Calculation of contact resistance	23
3 Ageing mechanisms of contacts and connection terminals	31
3.1 General.....	31
3.2 Contacts of dissimilar metals.....	33
3.3 Oxidation ageing mechanisms	37
3.4 Results concerning ageing of copper contacts	41
3.5 Usage and precautions to be taken in the use of copper contact materials	47
4 Calculation of temperature rise of conductors, contacts and connection terminals .	49
4.1 Symbolic representation	49
4.2 Temperature rise ΔT_s of a conductor with respect to the temperature T_e of the surrounding medium.....	53
4.3 Temperature rise ΔT_o in the vicinity of the contact: temperature rise of connection terminals	55
4.4 Temperature rise of the elementary contact points.....	55
Section 3: Application	
5 Permissible temperature and temperature rise values.....	57
5.1 Ambient air temperature θ_a	57
5.2 Temperature and temperature rise of various equipment components	59
5.3 Temperature and temperature rise of conductors connecting electrical equipment.....	75
5.4 Temperature and temperature rise of connection terminals for electrical equipment – Influence on connected conductors.....	77

Articles	Pages
6 Marche générale à suivre pour la détermination des températures et échauffements admissibles	78
6.1 Paramètres fondamentaux	78
6.2 Méthode à suivre pour déterminer les températures et les échauffements maximaux admissibles	78
Annexes	
A Exemples numériques de l'application de la théorie et autres caractéristiques	82
B Caractéristiques physiques de quelques métaux et alliages	88
C Caractéristiques physiques de fluides diélectriques	90
D Données sur la réaction des métaux de contact avec les substances de l'atmosphère	92
E Echauffement d'un conducteur refroidi par rayonnement et convection près d'une borne	94
F Liste des symboles littéraux utilisés	112
G Bibliographie	116

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 60943:1998

Clause	Page
6 General procedure to be followed for determining permissible temperature and temperature rise.....	79
6.1 Basic parameters	79
6.2 Method to be followed for determining maximum permissible temperature and temperature rise	79

Annexes

A Numerical examples of the application of the theory and other data	83
B Physical characteristics of selected metals and alloys.....	89
C Physical characteristics of fluid dielectrics	91
D Information on the reaction of contact metals with substances in the atmosphere...	93
E Temperature rise of a conductor cooled by radiation and convection in the vicinity of a terminal	95
F List of symbols used in this report.....	113
G Bibliography	117

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 60943:1998

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 deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 1989.

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 second edition cancels and replace the first edition which was issued in 1989.

Le texte de ce rapport technique est issu des documents suivants:

Projet de comité	Rapport de vote
32/142/CDV	32/148/RVC

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de ce rapport technique.

Les annexes sont données à titre d'information.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 60943:1998

The text of this technical report is based on the following documents:

Committee draft	Report on voting
32/142/CDV	32/148/RVC

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

Annexes are for information only.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 60943:1998

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.

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.

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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 60943:1998

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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 60943:1998

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*

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*

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.

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: 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.

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.

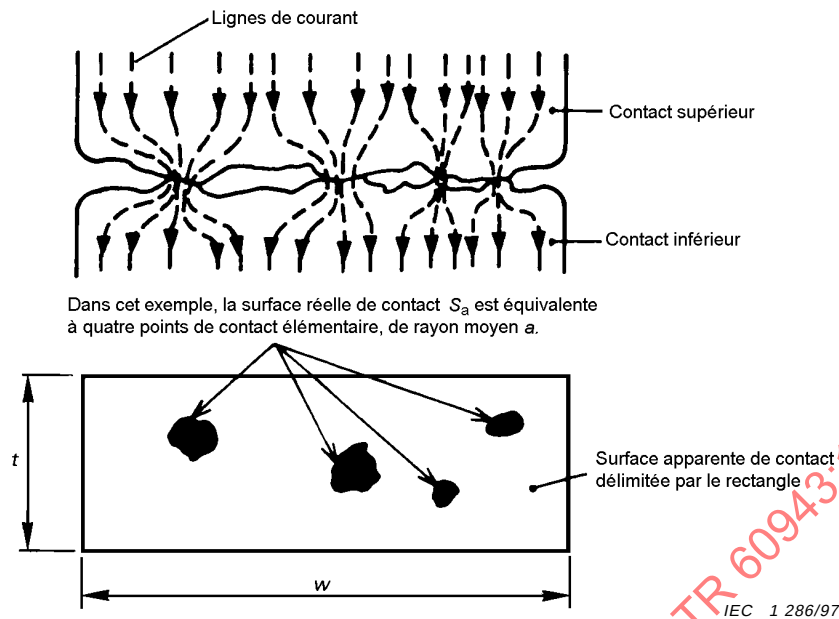


Figure 1 – Illustration des surfaces apparente et réelle de contact

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:

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

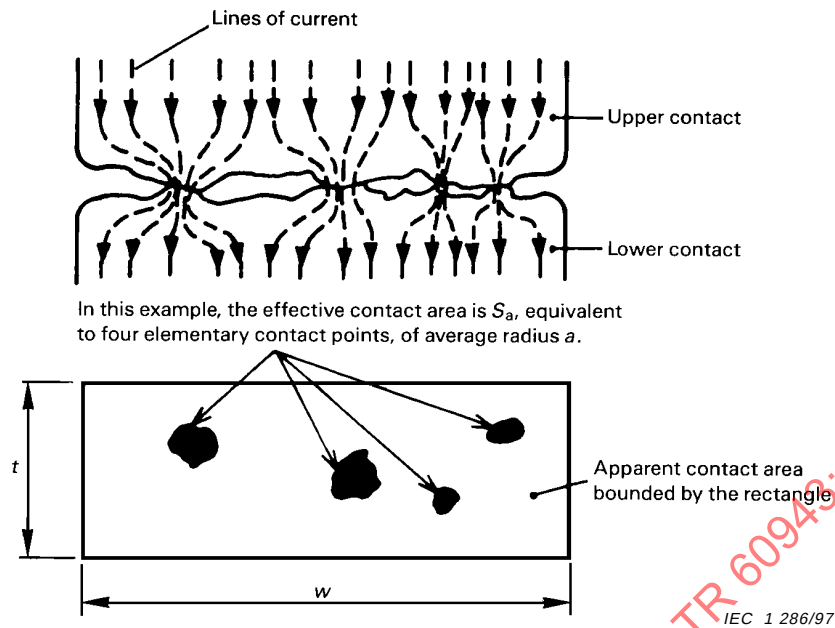


Figure 1 – Illustration of apparent contact and effective contact areas

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:

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

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)

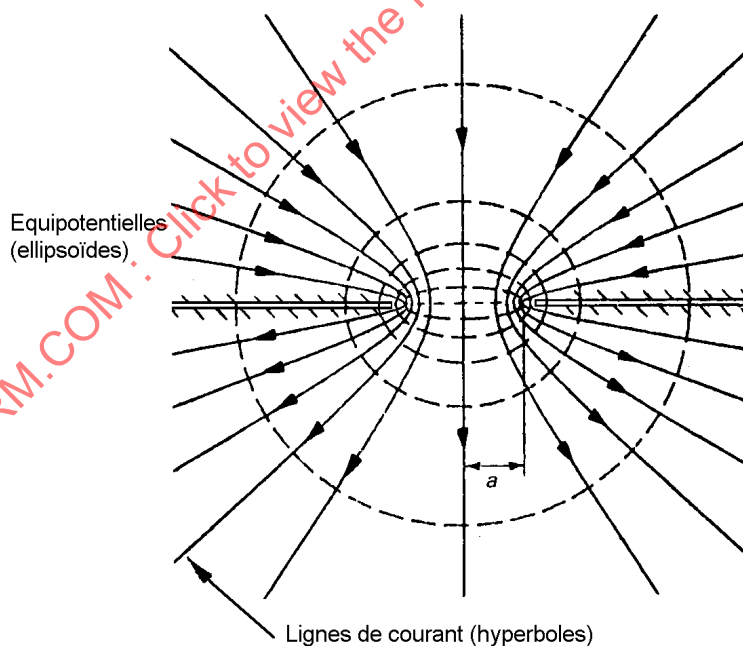
2.3 Calcul de la résistance de contact

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 équipotentiellles sont des ellipsoïdes aplatis de mêmes foyers.



IEC 1 287/97

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

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).

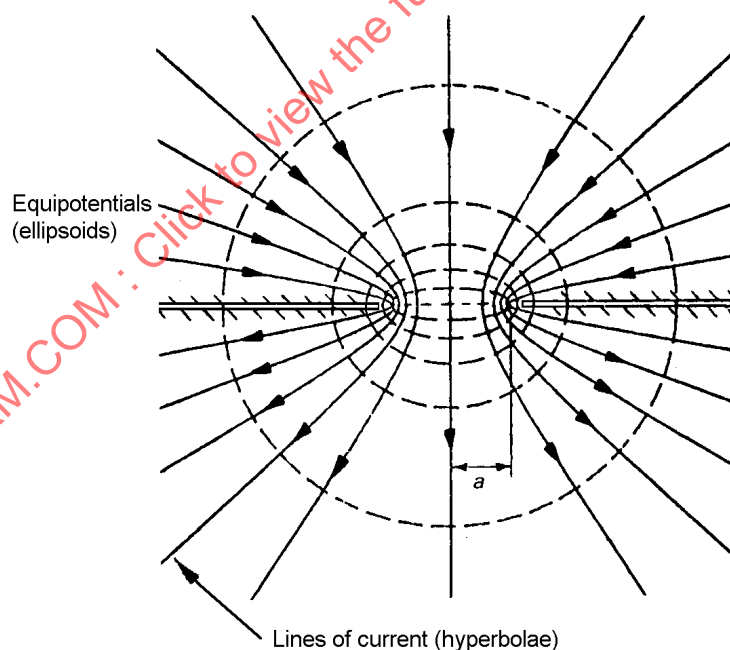
2.3 Calculation of contact resistance

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

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.

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.

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:

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:

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

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

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

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

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

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

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 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 H_2S , 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 H_2S ou SO_2).

Ces deux aspects sont couverts dans le présent rapport.

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 H_2S 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 H_2S or SO_2).

These two aspects are covered in this report.

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

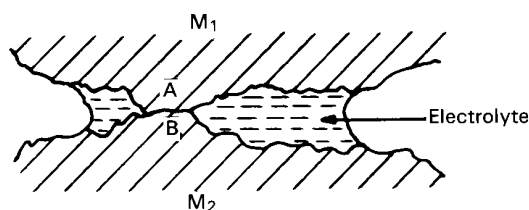


Figure 3 – Contacts entre métaux différents en présence d'humidité (adsorption d'eau)

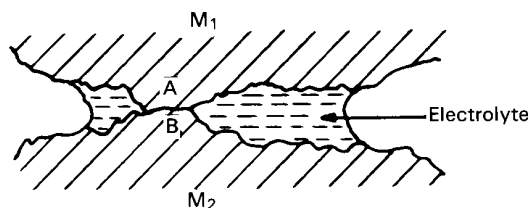
La corrosion de contacts de métaux différents M₁ et M₂ se produit si les conditions suivantes sont réunies:

- 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.

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 M_1 and M_2 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 M_1 and M_2 in figure 3 with the contacts open are given in table 3.

Tableau 3 – Tensions développées aux contacts bimétalliques

Valeurs en millivolts

Pole négatif / Pole positif	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
Argent	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	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	040	060	080	090	160	300	310	340	390	540	550	600	600	620	920	930	940	1420
Cupro/nickel (70/30)					0	020	040	060	070	140	280	290	320	370	520	530	580	580	600	900	910	920	1400
Cuivre						0	020	040	060	140	260	290	320	370	520	530	580	580	600	900	910	920	1400
Soudure à l'argent							0	020	040	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
Bronze rouge								0	040	080	220	230	260	310	460	470	520	520	540	840	850	860	1340
Laitons*									0	070	210	220	250	300	450	460	510	510	530	830	840	850	1330
Aciers inox *											140	150	180	230	380	390	440	440	460	760	770	780	1280
Etain											0	010	040	090	240	250	300	300	320	620	630	640	1120
Soudure étain-plomb												0	030	080	230	240	290	290	310	610	620	630	1110
Soudure étain-argent													0	050	200	210	260	260	280	580	590	600	1080
Plomb														0	150	160	210	210	230	530	540	550	1030
Fonte grise															0	010	060	060	080	380	390	400	880
Aciers doux																0	050	050	070	370	380	390	870
Alliages d'aluminium*																	0	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

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.

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*
Silver	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	620	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*										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.

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_0 s'épaissit progressivement.

Ces deux mécanismes sont considérés successivement ci-dessous.

3.3.1 Réduction de section des contacts élémentaires

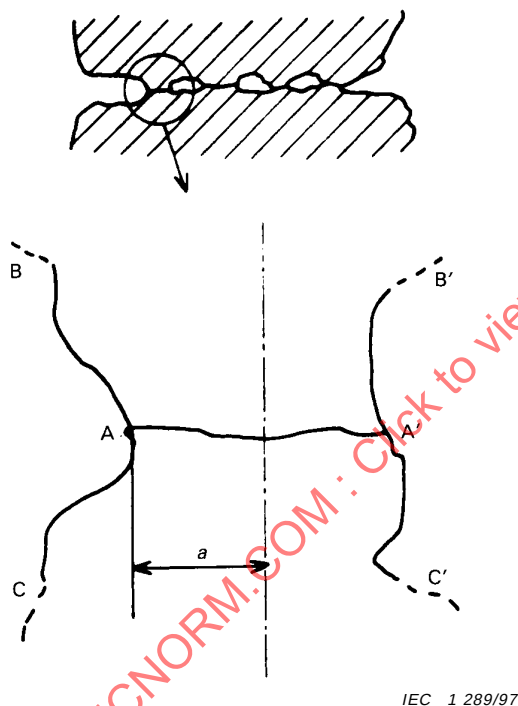


Figure 4 – Point de contact élémentaire de rayon a

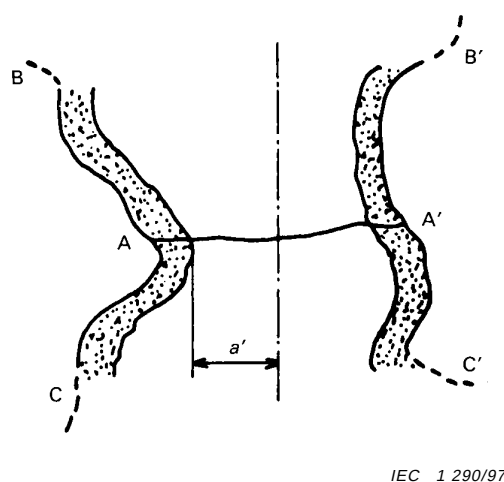


Figure 5 – Oxydation d'un point de contact élémentaire

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).

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.

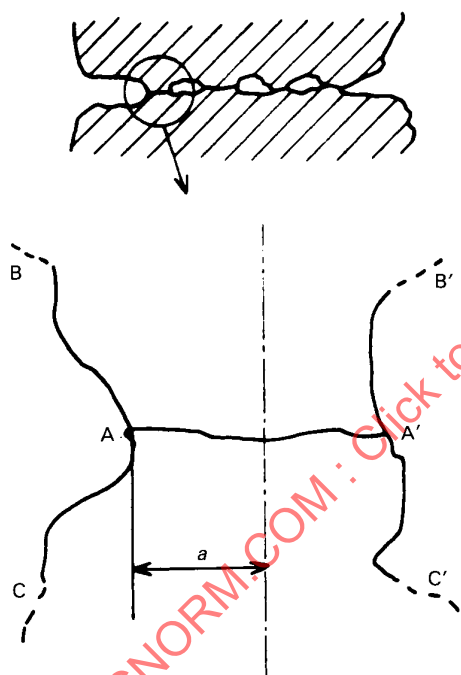
3.3 Oxidation ageing mechanisms

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

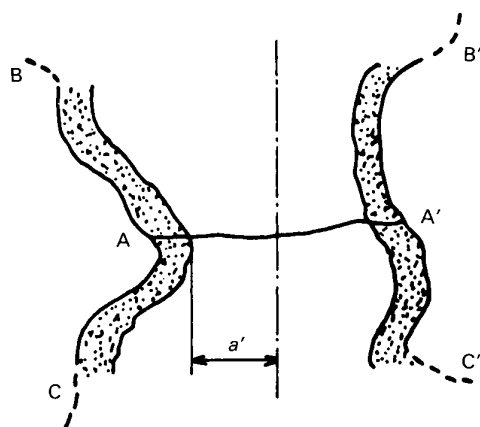
These two mechanisms are considered below.

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.

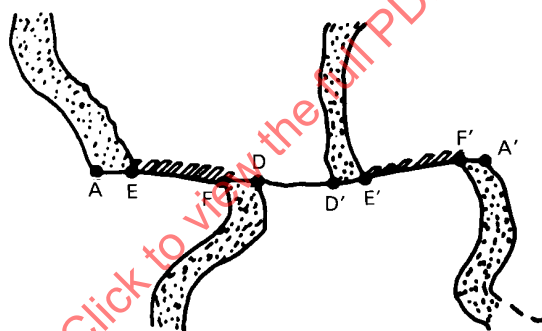
As a result, the elementary contact radius gradually decreases and the contact resistance rises (see figure 5).

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).

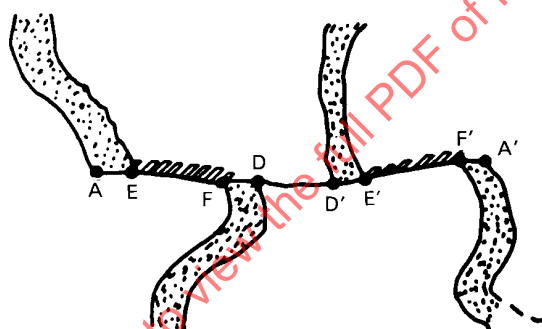
On peut supposer que, par suite des mouvements de contact (contraintes, vibrations, chocs), ainsi que par diffusion dans les interstices des deux surfaces (1) et (2) l'oxygène a partiellement accès à ces surfaces et crée entre les deux pièces de contact un film d'oxyde supplémentaire qui accroît la résistivité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

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.



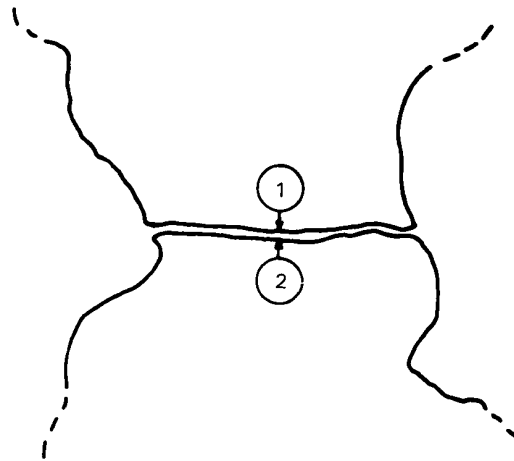
IEC 1 291/97

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 – 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.

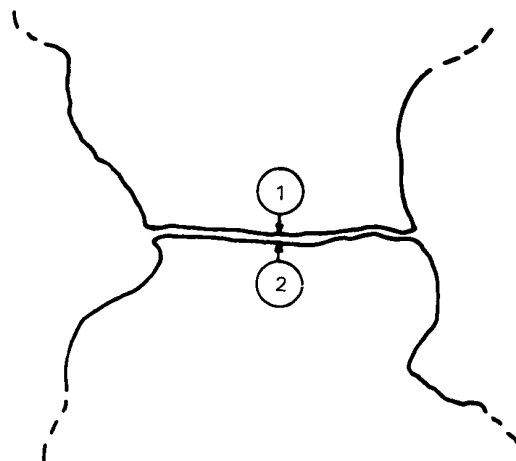
Ils dépendent:

- 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).



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).

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} :

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

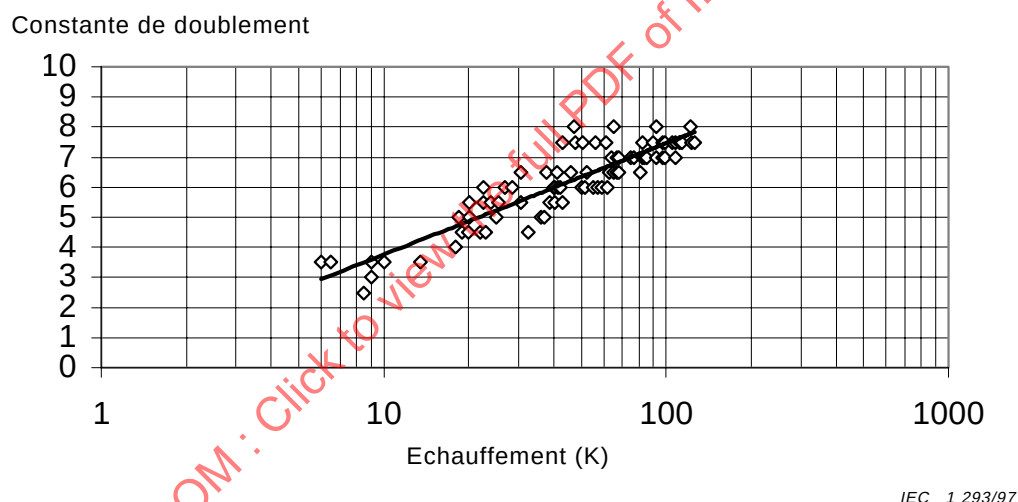


Figure 8 – Constante de doublement Δ_i en fonction de l'échauffement (résultats empiriques pour des contacts en cuivre)

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.

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:

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

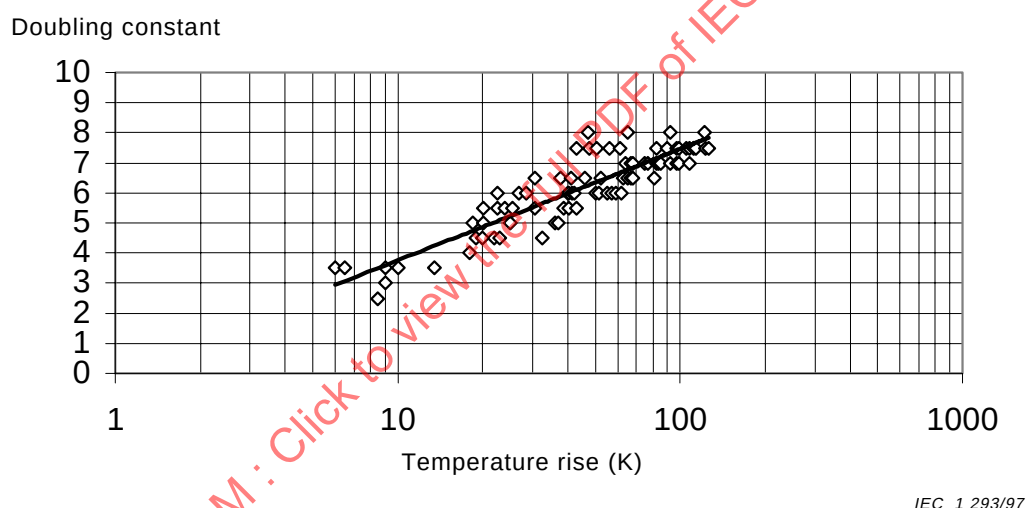


Figure 8 – Doubling constant Δ_i as a function of temperature rise (empirical results on copper contacts)

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.

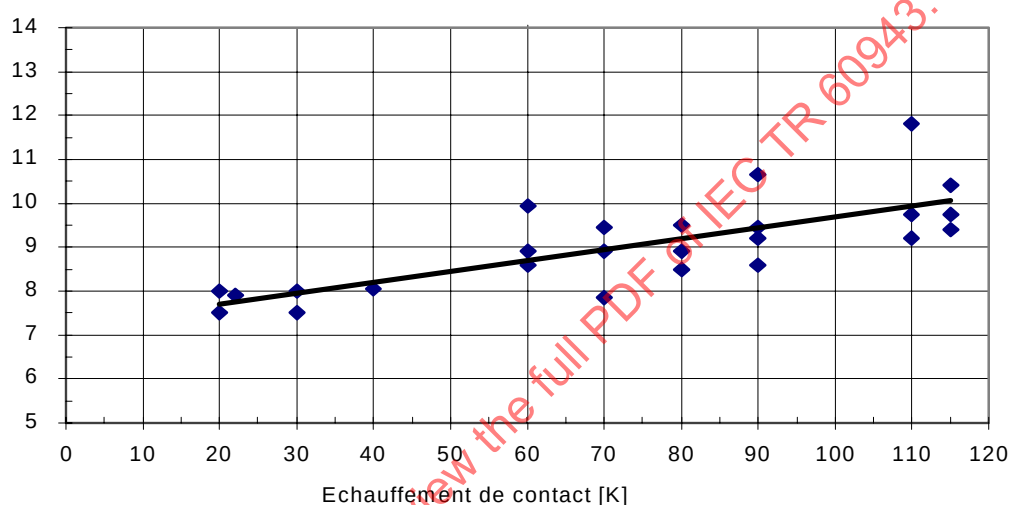
3.4.2 Influence de la température ambiante

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:

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

Constante de doublement



IEC 1 294/97

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:

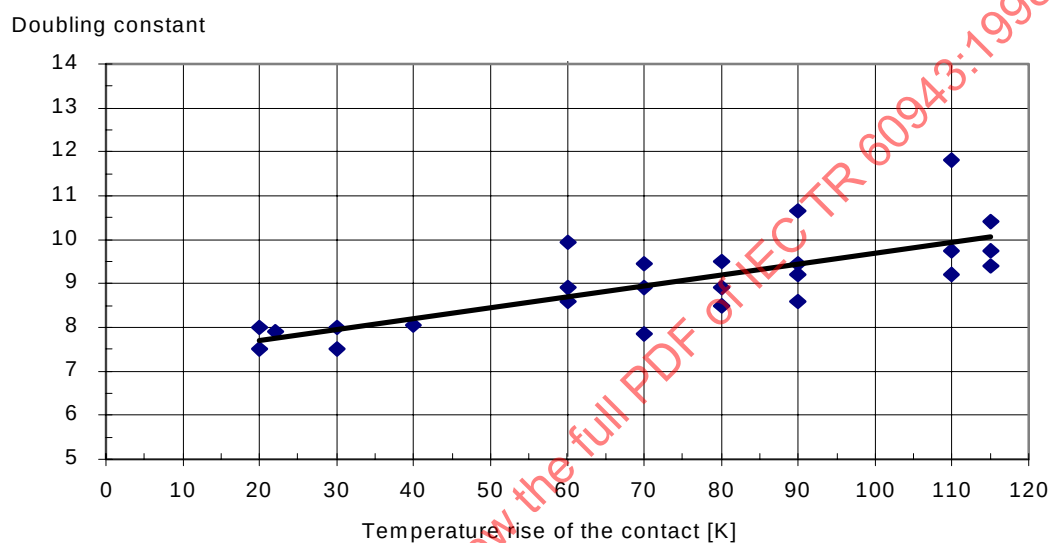
$$K_{th} = 2^{[x+y]} \quad (9)$$

3.4.2 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 Δ_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:

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



IEC 1 294/97

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:

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

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.

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 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.

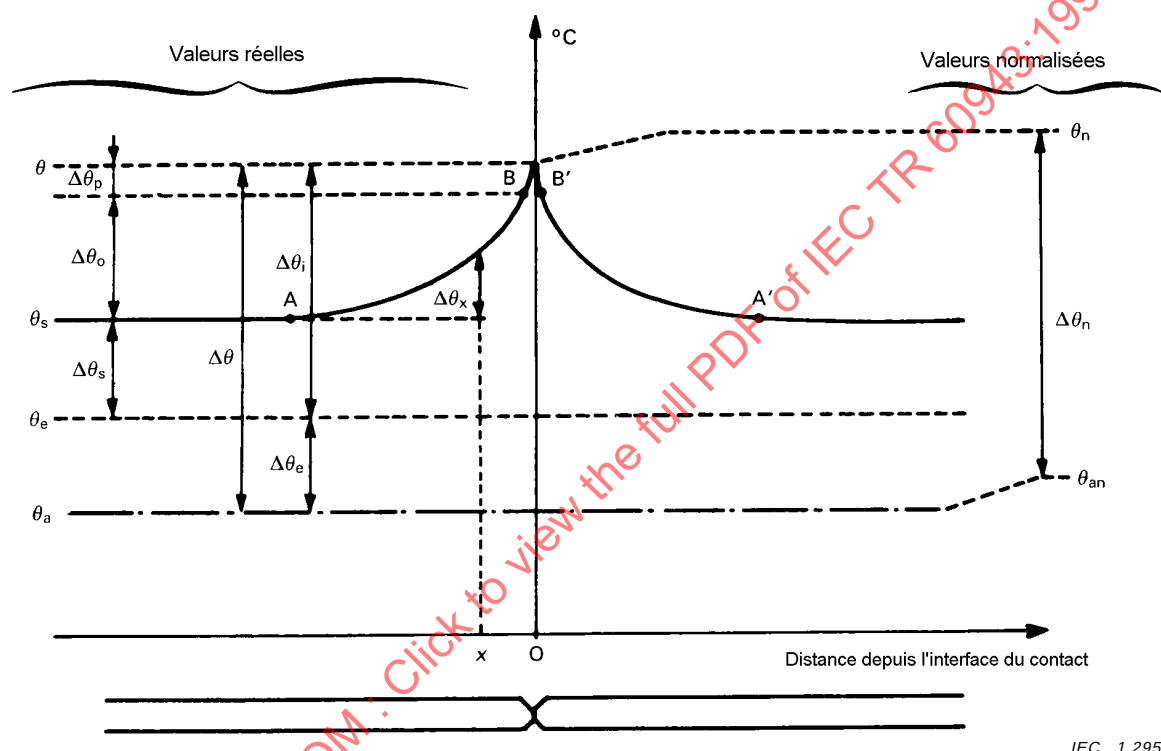


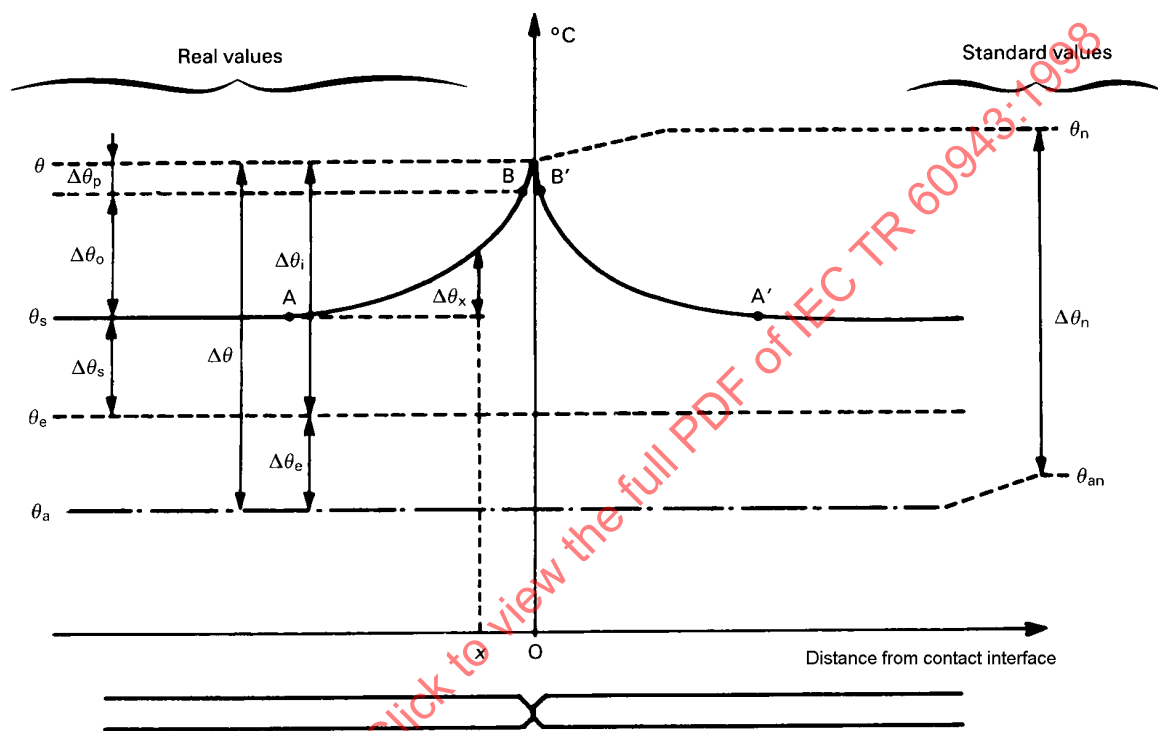
Figure 10 – Symboles utilisés pour la représentation des températures et des échauffements; exemple choisi: contacts en bout

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.

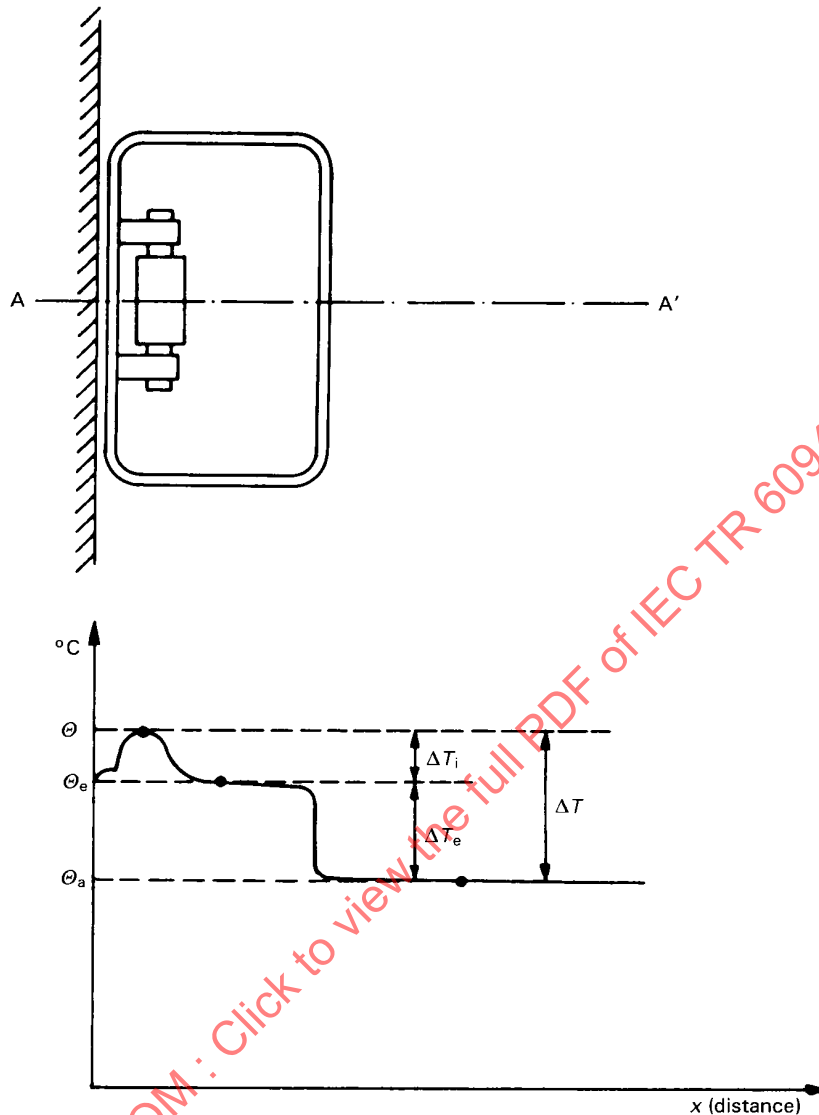
In the case of real contacts (e.g. a conductor leading to a terminal), the temperature variation along the conductor is generally not symmetrical.



IEC 1 295/97

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

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.

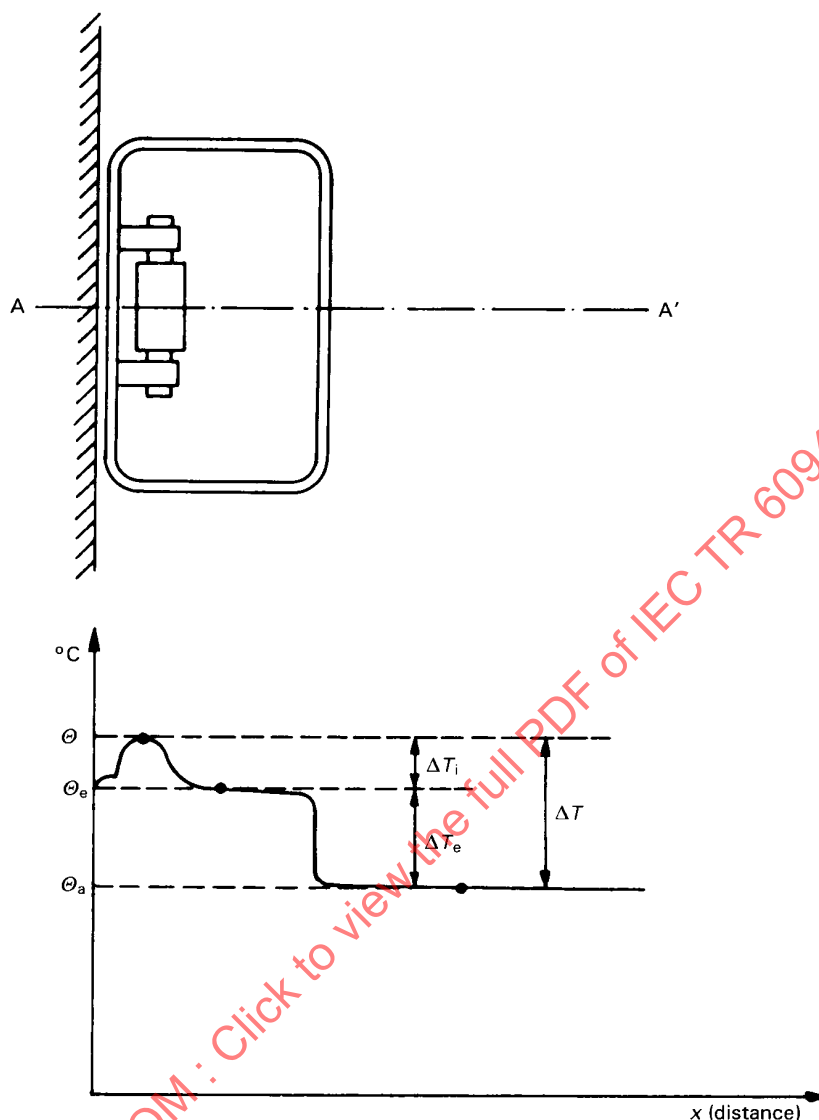
Cette température maximale Θ est la somme des termes suivants:

$$\Theta = \Theta_a + \Delta T_e + \Delta T_s + \Delta T_o + \Delta T_p$$

où

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

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 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_0 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 :

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

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.)

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_0 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:

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

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.)

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:

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

où

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

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

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

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

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

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 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.

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 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.

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.

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 $\Theta_c = \Theta_{an} = 20\text{ °C}$ et température maximale admissible pour $\Theta_{an} = 40\text{ °C}$.

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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 60943:1998

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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 60943:1998

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

Désignation de l'organe			Colonne A Echauffement maximal K ($\theta_{an} = 20\text{ °C}$)	Colonne B Température maximale °C ($\theta_{an} = 40\text{ °C}$)	Remarques
Nature du contact ^{1),3), 5)}	Contacts élastiques	Cuivre et alliage de cuivre, nus – dans l'air – dans le SF ₆ – dans l'huile Etamés, dans l'air, le SF ₆ , l'huile ^{2) 5)} Argentés ^{2), 19)} ou nickelés ²⁾ – dans l'air ou le SF ₆ – dans l'huile Pour contacteurs, dans l'huile	35 ¹⁶⁾ 65 40 50 65 ¹⁷⁾ 50	 105	Dégradation de l'huile
	Connexions boulonnées	Cuivre, aluminium et leurs alliages, nus – dans l'air – dans le SF ₆ Etamés ²⁾ dans l'air ou le SF ₆ , Argentés ^{2) 19)} ou nickelés ²⁾ – dans l'air ou le SF ₆ – dans l'huile Pour contacteurs, dans l'huile	50 ¹⁷⁾ 75 ¹⁷⁾ 75 ¹⁷⁾	 105 100 105	Fluage de l'étain Dégradation de l'huile Dégradation de l'huile
	Bornes ^{4), 6),18)}	Destinées à être raccordées à des conducteurs extérieurs au moyen de vis ou de boulons, Nues Etamées ²⁾ Argentées ou nickelées ²⁾	50 65	 105	Fluage de l'étain
	Autres matériaux de contact		7), 8)		
	Pièces métalliques	En contact avec	Les isolations de la classe ⁹⁾ : Y A E B F H Email: à base d'huile synthétique formant ressort à l'endroit d'une soudure à l'étain	 <	

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

Description of component			Column A Maximum temperature rise K ($\theta_{an} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Column B Maximum temperature °C ($\theta_{an} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Remarks
Nature of contact 1),3), 5)	Spring contacts	Copper and copper alloys uncoated – in air – in SF ₆ – in oil Tinned in air, SF ₆ , oil ^{2) 5)} Silver- ^{2), 19)} or nickel-plated ²⁾ – in air or SF ₆ – in oil For contactors, in oil	35 ¹⁶⁾ 65 40 50 65 ¹⁷⁾ 50	105	Deterioration of the oil
	Bolted connections	Copper, aluminium, and copper alloys, uncoated – in air – in SF ₆ Tinned ²⁾ in air or SF ₆ , Silver- ^{2), 19)} or nickel-plated ²⁾ – in air or SF ₆ – in oil For contactors, in oil	50 ¹⁷⁾ 75 ¹⁷⁾ 75 ¹⁷⁾	105 100 105	Creep point of tin Deterioration of the oil
	Terminals ^{4), 6),18)}	To be connected to exterior conductors by screws or bolts Uncoated Tinned ²⁾ Silver- or nickel-plated ²⁾	50 65	105	Creep point of tin
	Other contact materials		7), 8)		
	Metallic parts	In contact with	Insulation class ⁹⁾ : Y A E B F H enamel: oil base synthetic acting as springs at position of soldering		90 105 120 130 155 180 100 120 10) 100 ¹¹⁾
Oil for oil-immersed switchgear ^{12), 13)} All parts which are metallic or of insulating material in contact with oil, except for contacts ¹³⁾				90 100	Deterioration of the oil
Electric motors and resistance			14)		
Surfaces ¹⁵⁾	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 70 80 80 90	IEC 60364-4-42
	* For notes, see following page.				

NOTES

- 1) 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 le SF₆ sont les mêmes pour le cuivre argenté ou nickelé et pour le cuivre nu, en raison de l'absence d'oxygène.
- 2) 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:
 - a) après les essais d'établissement et de coupure (s'ils existent);
 - b) après l'essai du courant de courte durée admissible;
 - c) 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.

- 3) 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:
 - a) pour les contacts élastiques, ceux dont le matériau de surface a la valeur admissible la plus faible dans le tableau 6;
 - b) pour les connexions boulonnées, ceux dont le matériau de surface a la valeur admissible la plus élevée dans le tableau 6.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Les valeurs de température et d'échauffement sont valables même si le conducteur relié aux bornes n'est pas protégé par un revêtement.
- 7) Lorsque d'autres matériaux que ceux qui sont indiqués dans le tableau 6 sont utilisés, leurs propriétés doivent être prises en considération.
- 8) Limité par la nécessité de ne pas endommager les pièces environnantes.
- 9) La classification des isolations est indiquée dans la CEI 60085.
- 10) La température ne doit pas atteindre une valeur telle que l'élasticité du matériau soit diminuée.
- 11) Lorsque la soudure est le mode de raccordement principal de deux pièces; dans le cas contraire, cette limite peut être portée à 110 °C.
- 12) La mesure doit être faite à la partie supérieure de l'huile.
- 13) 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.
- 14) Règles en vigueur.
- 15) Pour les organes de commande manuels disposés à l'intérieure 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 les concernant lorsque ces normes fixent des limites de températures ou d'échauffements pour les surfaces accessibles.

- 16) 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.
- 17) Dans le cas des appareils de branchement basse tension définis dans la note 16: limités par l'obligation de n'entraîner aucun dommage aux pièces voisines et en particulier aux isolants en contact.
- 18) Pour les bornes destinées à être raccordées à des conducteurs isolés, voir 5.3.2.
- 19) Pour certains appareillages industriels à basse tension, l'échauffement n'est limité que par la nécessité de ne pas endommager les pièces environnantes.

NOTES

- 1) 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 SF₆ are the same for silver-plated or nickel-plated copper as for bare copper, because of the absence of oxygen.
- 2) 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:
 - a) after the making and breaking tests (if any);
 - b) after the permissible short period current test;
 - c) 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.
- 3) When engaging parts have different coatings, or one part is of bare metal, the permissible temperatures and temperature rises shall be:
 - a) for spring-contacts, those of the surface material having the lowest value permitted in table 6;
 - b) for bolted connections, those of the surface material having the highest value permitted in table 6.
- 4) Values of the tightening torque for screws are given in the appropriate product standard, for example table IV of IEC 60947-1.
- 5) 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.
- 6) The temperature and temperature rise values are valid even if the conductor connected to the terminals is not protected by a covering.
- 7) When materials other than those shown in table 6 are used, their properties shall be taken into consideration.
- 8) Limited by the necessity of not damaging surrounding parts.
- 9) The classification of insulation is given in IEC 60085.
- 10) Temperature shall not reach such a value that the elasticity of the material is reduced.
- 11) This applies when soldering is the main method of joining the two parts; otherwise, this limit may be increased to 110 °C.
- 12) The measurement must be made in the upper part of the oil.
- 13) It is recommended that particular attention be paid to questions of vaporisation and oxidation when using oil with a low flash-point.
- 14) Regulations in force.
- 15) 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.
- 16) 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 hour, intermittent or temporary service, where conditions of use are those permitted in the appropriate product standards.
- 17) In the case of units on LV supply defined in note 16: limited by the necessity of causing no damage to adjacent parts and in particular to the insulation in contact.
- 18) For terminals intended for connection to insulated conductors, see 5.3.2.
- 19) For some low-voltage industrial equipment the temperature rise is limited only by the need not to damage surrounding parts.

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:

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

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.

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:

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

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

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

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:

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

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:

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

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.

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 $\theta_a = 40^\circ\text{C}$

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:

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

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.

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:

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

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.

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

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

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

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

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.

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 $\theta_a = 40$ °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 K;
- the ageing rate is multiplied by two if the temperature θ_e increases by 8,5 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.

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. Vieillesse 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'isolation 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;

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) 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
Espacement 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.

- 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.

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.

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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TP 60943:1998

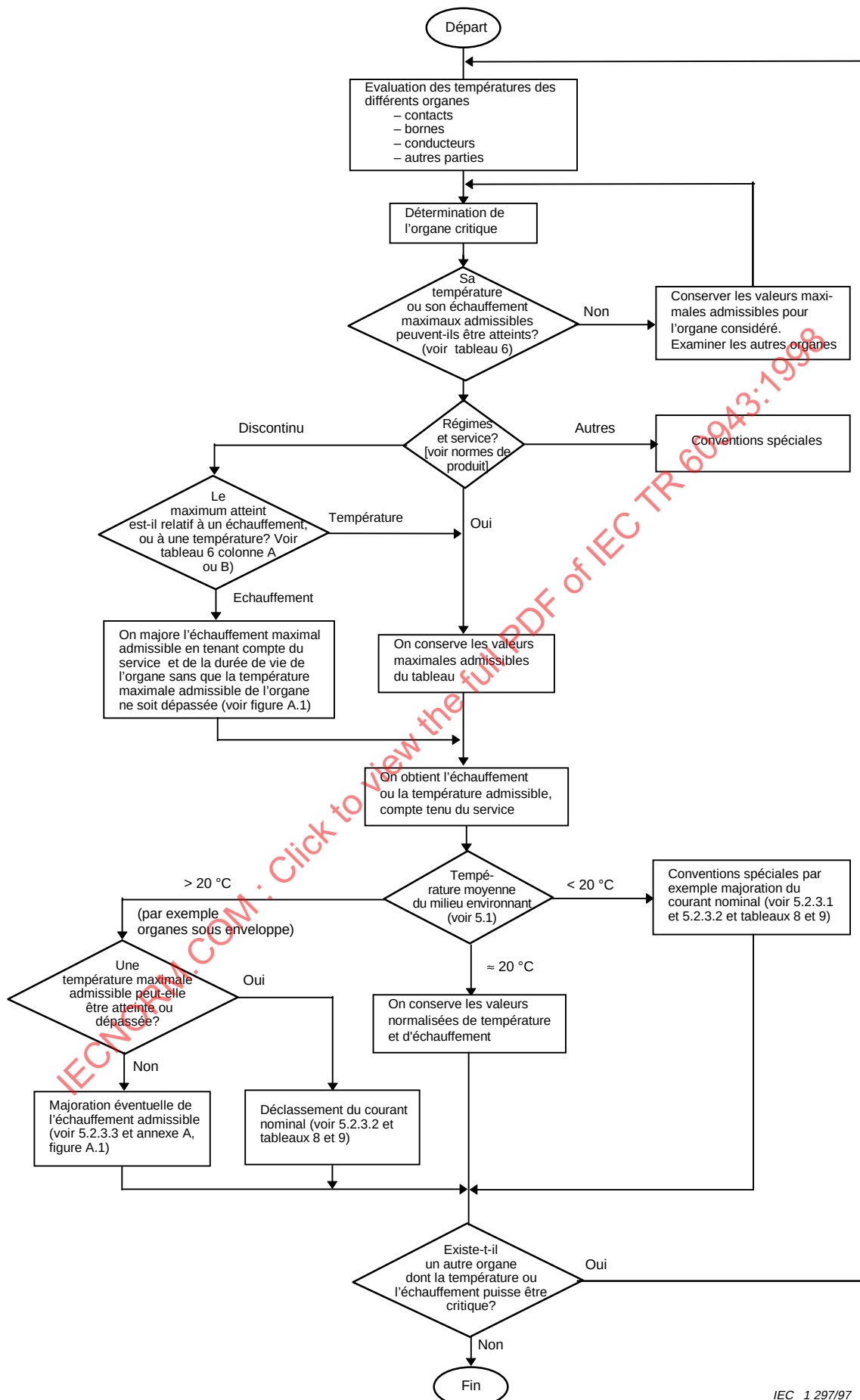


Figure 12 – Organigramme de détermination des températures ou échauffements maximaux admissibles

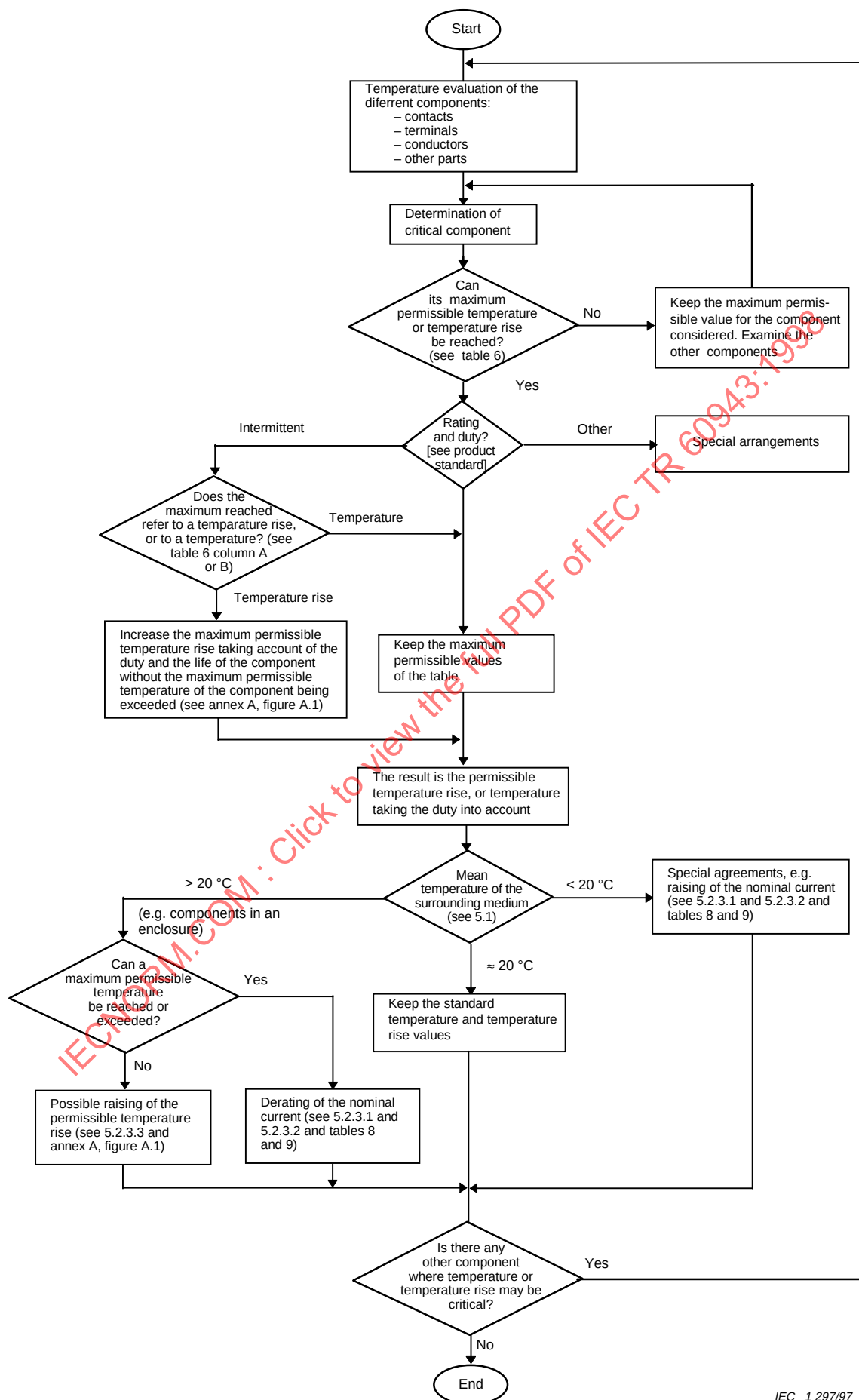


Figure 12 – Chart for determining the maximum permitted temperature of temperature rise

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:

$$K_{th} = 2^{\left(\frac{\Theta'_e - \Theta_e}{8,5} + \frac{\Delta T'_i - \Delta T_i}{6,5} \right)}$$

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:

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

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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 60943:1998

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:

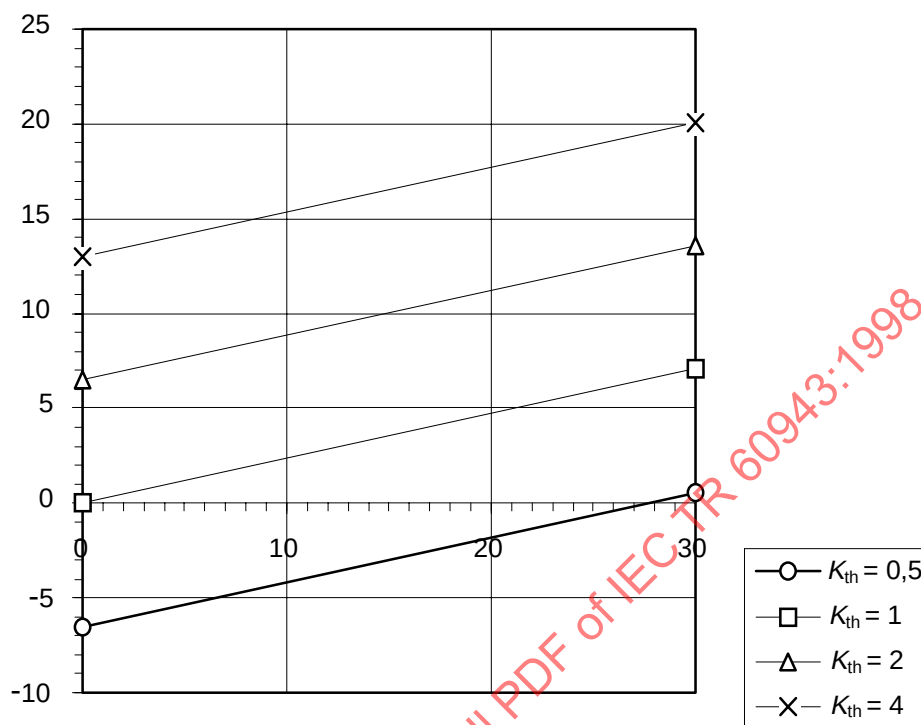
$$K_{th} = 2^{\left(\frac{z}{8,5} + \frac{y-z}{6,5}\right)}$$

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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 60943:1998



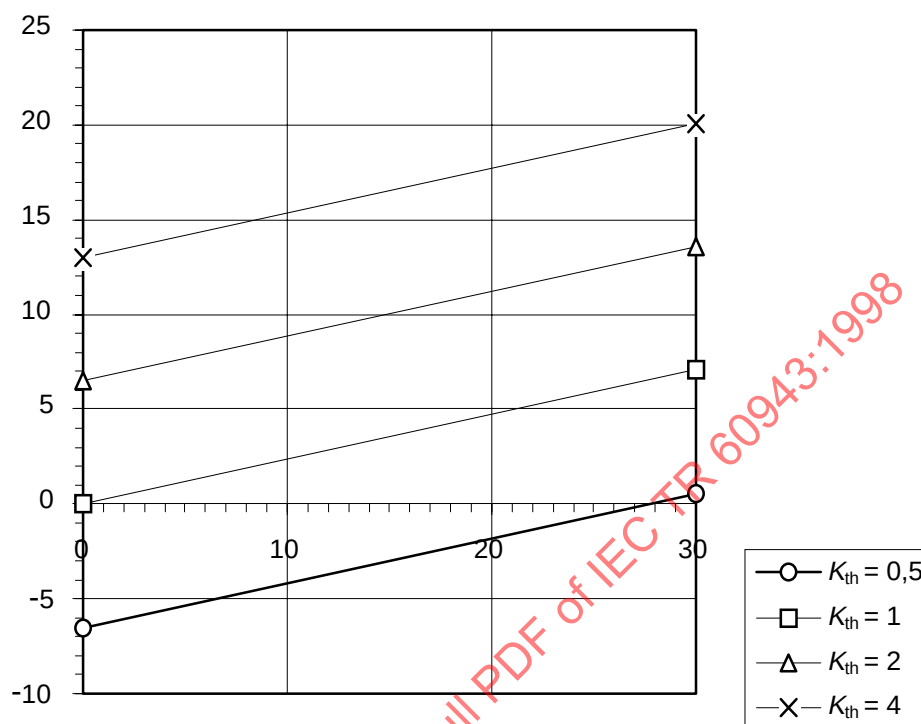
IEC 1 298/97

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



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

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 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	Cuivre écroui ρ _{20 °C} = 1,759 × 10 ⁻⁸ Ω.m Cuivre câblé (lignes) ρ _{20 °C} = 1,8 × 10 ⁻⁸ Ω.m
Laiton		70 Cu, 30 Zn		8 530		915	~ 10	0 20	273,15 293,15	6 6,2	1,53 1,484	377	119 121	0,04	0,6	
Cupro- tungstène		W, 35 Cu, 0,5 Ni		13 600			15	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 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	Conducteurs en aluminium câblé 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	Cablé Almélec ρ _{20 °C} = 3,3 × 10 ⁻⁸ Ω.m
Alliage Al (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		Alliage encore au stade expérimental
Argent	Ag	107,868	47	10 500	180	962	2,6 à 6	0 20	273,15 293,15	1,47 1,59	4,08 3,77	234 235	418			
Etain	Sn	118,69	50	7 300	100	232	0,45 à 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	Etat amorphe (β)
Nickel	Ni	58,71	28	8 900	520	1453	7,0 à 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		Nickel pur
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

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 conduct- tivity W/m · K	Total emissivity		Remarks
								°C	K							
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	Oxidized	Hard-drawn copper $\rho_{20\text{ °C}} = 1,759 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ Copper conductors in cables $\rho_{20\text{ °C}} = 1,8 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
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 0,6		
Cupro- tungsten		W, 35 Cu, 0,5 Ni		13 600			15	20	293,15	5,3	6		150	0,1 0,5		
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 $\rho_{20\text{ °C}} = 3,06 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
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 $\rho_{20\text{ °C}} = 3,3 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
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 4,7	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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 60943:1998

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 60943:1998

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 atmosphérique	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 1300
Aluminium	Oxygène atmosphérique	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 atmosphérique	SnO	$s = 5,22 \ln 47 \cdot t \cdot e^{\left(7,92 - \frac{2400}{T_c}\right)}$	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 atmosphérique	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 sulfureuses	Ag ₂ S	$t < 40 : s = 60 \cdot t^{1/3} \cdot e^{\left(27,5 - \frac{8000}{T_c}\right)}$ $40 \leq t < 70 : s = 0,121 \cdot t^{2,57} \cdot e^{\left(27,5 - \frac{8000}{T_c}\right)}$ $t \geq 70 : s = 3\,750 \cdot t^{0,15} \cdot e^{\left(27,5 - \frac{8000}{T_c}\right)}$	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 atmosphérique	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. Campbell, 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.

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	$s = \sqrt{s_0^2 + t \cdot e^{\left(34.31 - \frac{11\,700}{T_c}\right)}}$	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)	Rönquist, 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	$s = 5.22 \ln 47 t \cdot e^{\left(7.92 - \frac{2400}{T_c}\right)}$	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	$s = \sqrt{s_0^2 + t \cdot e^{\left(4.68 - \frac{1800}{T_c}\right)}}$	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	$t < 40: s = 60 t^{1/3} e^{\left(27.5 - \frac{8000}{T_c}\right)}$ $40 \leq t < 70: s = 0.121 t^{2.57} e^{\left(27.5 - \frac{8000}{T_c}\right)}$ $t \geq 70: s = 3\,750 t^{0.15} e^{\left(27.5 - \frac{8000}{T_c}\right)}$	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	$s = \sqrt{s_0^2 + t \cdot e^{\left(29 - \frac{8000}{T_c}\right)}}$	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.

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 $\phi = \gamma \Delta T_x^\delta$, 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: