

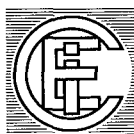
RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT

**CEI
IEC
943**

Première édition
First edition
1989-02

**Guide pour la spécification des températures
et des échauffements admissibles
pour les parties des matériels électriques,
en particulier les bornes de raccordement**

**Guide for the specification of permissible
temperature and temperature rise for parts of
electrical equipment, in particular for terminals**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 943: 1989

Révision de la présente publication

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

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

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement

Terminologie

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

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit repris du VEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Symboles graphiques et littéraux

Pour les symboles graphiques, symboles littéraux et signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera:

- la Publication 27 de la CEI: Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique;
- la Publication 617 de la CEI: Symboles graphiques pour schémas.

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit repris des Publications 27 ou 617 de la CEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Publications de la CEI établies par le même Comité d'Etudes

L'attention du lecteur est attirée sur le deuxième feuillet de la couverture, qui énumère les publications de la CEI préparées par le Comité d'Etudes qui a établi la présente publication.

Revision of this publication

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

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

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
- **Catalogue of IEC Publications**
Published yearly

Terminology

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

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the IEV or have been specifically approved for the purpose of this publication.

Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to:

- IEC Publication 27: Letter symbols to be used in electrical technology;
- IEC Publication 617: Graphical symbols for diagrams.

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC Publications 27 or 617, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

IEC publications prepared by the same Technical Committee

The attention of readers is drawn to the back cover, which lists IEC publications issued by the Technical Committee which has prepared the present publication.

RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT

CEI
IEC
943

Première édition
First edition
1989-02

**Guide pour la spécification des températures
et des échauffements admissibles
pour les parties des matériels électriques,
en particulier les bornes de raccordement**

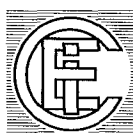
**Guide for the specification of permissible
temperature and temperature rise for parts of
electrical equipment, in particular for terminals**

© CEI 1989 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.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembé Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE 86

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

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
INTRODUCTION	8
Articles	
1. Généralités	10
1.1 Domaine d'application	10
1.2 Objet	10
2. Généralités sur la nature du contact électrique et le calcul de résistance ohmique des contacts	10
2.1 Contacts électriques et bornes de raccordement	10
2.2 Calcul de la résistance de contact	16
3. Mécanismes de vieillissement des contacts et des bornes de raccordement	28
3.1 Généralités	28
3.2 Contacts de métaux différents	28
3.3 Mécanismes de vieillissement par oxydation	32
3.4 Résultats relatifs au vieillissement des contacts	36
3.5 Mise en œuvre et précautions à prendre lors de l'utilisation des matériaux de contact	42
4. Calcul des échauffements des conducteurs, des contacts et des bornes de raccordement	42
4.1 Définitions	42
4.2 Échauffement ΔT_s d'un conducteur par rapport à la température T_e du fluide environnant	48
4.3 Échauffement ΔT_0 au voisinage du contact: échauffement des bornes de raccordement	50
4.4 Échauffement des points de contact élémentaire	60
4.5 Exemple numérique	60
5. Valeurs admissibles des températures et des échauffements	70
5.1 Définitions	70
5.2 Températures et échauffements des différents organes d'un matériel électrique	80
5.3 Températures et échauffements des conducteurs de raccordement d'un matériel électrique	98
5.4 Températures et échauffements des bornes de raccordement d'un matériel électrique — Influence sur les conducteurs raccordés	112
6. Marche générale à suivre pour la détermination des températures et échauffements admissibles	128
6.1 Paramètres fondamentaux	128
6.2 Méthode à suivre pour la détermination des températures et des échauffements maximaux admissibles	130
6.3 Organigramme de détermination des températures ou échauffements maximaux admissibles	134
RÉFÉRENCES	136
ANNEXE A — Caractéristiques de certains métaux et alliages	138
ANNEXE B — Caractéristiques physiques de quelques diélectriques	140
ANNEXE C — Données sur la réaction des métaux de contact avec les substances de l'atmosphère	142
ANNEXE D — Bornes et connexions boulonnées: couples de serrage recommandés	144
ANNEXE E — Classes d'isolation	146
ANNEXE F — Liste des symboles littéraux utilisés	148
ANNEXE G — Dérivation d'une équation représentant l'échauffement d'un conducteur au voisinage d'une borne dans le cas de refroidissement par rayonnement et convection naturelle	154

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
INTRODUCTION	9
Clause	
1. General considerations	11
1.1 Scope	11
1.2 Object	11
2. General considerations concerning the nature of electric contact and the calculation of the ohmic resistance of contacts	11
2.1 Electric contacts and connection terminals	11
2.2 Calculation of contact resistance	17
3. Ageing mechanisms of contacts and connection terminals	29
3.1 General	29
3.2 Contacts of dissimilar metals	29
3.3 Oxidation ageing mechanisms	33
3.4 Results concerning ageing of contacts	37
3.5 Usage and precautions to be taken in the use of contact materials	43
4. Calculation of temperature rise of conductors, contacts and connection terminals	43
4.1 Definitions	43
4.2 Temperature rise ΔT_s of a conductor with respect to the temperature T_s of the surrounding medium	49
4.3 Temperature rise ΔT_0 in the vicinity of the contact: temperature rise of connection terminals	51
4.4 Temperature rise of the elementary contact points	61
4.5 Numerical example	61
5. Permissible temperature and temperature rise values	71
5.1 Definitions	71
5.2 Temperature and temperature rise of various equipment components	81
5.3 Temperature and temperature rise of conductors connecting electrical equipment	99
5.4 Temperature and temperature rise of connection terminals for electrical equipment — Influence on connected conductors	113
6. General procedure to be followed for determining permissible temperature and temperature rise	129
6.1 Basic parameters	129
6.2 Method to be followed for determining maximum permissible temperature and temperature rise	131
6.3 Chart for determining maximum permitted temperature or temperature rise	135
REFERENCES	137
APPENDIX A — Characteristics of selected metals and alloys	139
APPENDIX B — Physical characteristics of certain dielectrics	141
APPENDIX C — Information on the reaction of contact metals with substances in the atmosphere	143
APPENDIX D — Bolted (screwed) terminals and connections: recommended clamping torques	145
APPENDIX E — Insulation classes	147
APPENDIX F — List of letter symbols used	149
APPENDIX G — Derivation of an equation representing the temperature rise of a conductor in the vicinity of a terminal, in the case of cooling by radiation and natural convection	155

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**GUIDE POUR LA SPÉCIFICATION DES TEMPÉRATURES
ET DES ÉCHAUFFEMENTS ADMISSIBLES POUR LES PARTIES
DES MATÉRIELS ÉLECTRIQUES,
EN PARTICULIER LES BORNES DE RACCORDEMENT**

PRÉAMBULE

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

PRÉFACE

Le présent rapport a été établi par le Sous-Comité 32B: Coupe-circuit à fusibles à basse tension, du Comité d'Etudes n° 32 de la CEI: Coupe-circuit à fusibles.

Le texte de ce rapport est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapport de vote
32B(BC)66 I et II	32B(BC)68

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

Les publications suivantes de la CEI sont citées dans le présent rapport:

- Publications nos:
- 50(05) (1956): Vocabulaire Electrotechnique International (VEI), Chapitre 05: Définitions fondamentales. (Cette publication a été remplacée par les Publications 50(101, 111, 121, 131 et 151).)
 - 50(10) (1956): Chapitre 10: Machines et transformateurs. (Cette publication a été remplacée par la Publication 50(411).)
 - 50(151) (1978): Chapitre 151: Dispositifs électriques et magnétiques.
 - 50(411) (1973): Chapitre 411: Machines tournantes.
 - 50(441) (1984): Chapitre 441: Appareillage et fusibles.
 - 85 (1984): Evaluation et classification thermiques de l'isolation électrique.
 - 157-1 (1973): Appareillage à basse tension, Première partie: Disjoncteurs. (La réimpression de la deuxième édition comprend les compléments A [1976] et B [1979].)
 - 157-1B (1979): Deuxième complément à la Publication 157-1(1973). (La réimpression de la deuxième édition de la Publication 157-1 inclut ce complément B.)
 - 158-1B (1979): Deuxième complément à la Publication 158-1 (1970): Appareillage de commande à basse tension, Première partie: Contacteurs. (La réimpression de la deuxième édition de la Publication 158-1 [1970] inclut ce complément B.)
 - 216: Guide pour la détermination des propriétés d'endurance thermique de matériaux isolants électriques.
 - 364-4-42 (1980): Installations électriques des bâtiments, Quatrième partie: Protection pour assurer la sécurité, Chapitre 42: Protection contre les effets thermiques.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

GUIDE FOR THE SPECIFICATION OF PERMISSIBLE TEMPERATURE AND TEMPERATURE RISE FOR PARTS OF ELECTRICAL EQUIPMENT, IN PARTICULAR FOR TERMINALS

FOREWORD

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

PREFACE

This report has been prepared by Sub-Committee 32B: Low-voltage Fuses, of IEC Technical Committee No. 32: Fuses.

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

Six Months' Rule	Report on Voting
32B(CO)66 I and II	32B(CO)68

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

The following IEC publications are quoted in this report:

- Publications Nos. 50(05)(1956): International Electrotechnical Vocabulary (IEV), Chapter 05: Fundamental definitions. (This publication has been superseded by Publications 50(101, 111, 121, 131 and 151).)
- 50(10)(1956): Chapter 10: Machines and transformers. (This publication has been superseded by Publication 50(411).)
- 50(151)(1978): Chapter 151: Electrical and magnetic devices.
- 50(411)(1973): Chapter 411: Rotating machines.
- 50(441)(1984): Chapter 441: Switchgear, controlgear and fuses.
- 85(1984): Thermal evaluation and classification of electrical insulation.
- 157-1(1973): Low-voltage switchgear and controlgear, Part 1: Circuit-breakers. (The reprint of the second edition includes Supplements A [1976] and B [1979].)
- 157-1B(1979): Second supplement to Publication 157-1(1973). (The reprint of the second edition of Publication 157-1 includes this Supplement B.)
- 158-1B(1979): Second supplement to Publication 158-1(1970): Low-voltage controlgear, Part 1: Contactors. (The reprint of the second edition of Publication 158-1 [1970] includes this Supplement B.)
- 216: Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials.
- 364-4-42(1980): Electrical installations of buildings, Part 4: Protection for safety, Chapter 42: Protection against thermal effects.

- 364-5-523 (1983): Cinquième partie: Choix et mise en œuvre des matériels électriques, Chapitre 52: Canalisations. Section 523: Courants admissibles.
- 493: Guide pour l'analyse statistique de données d'essais de vieillissement.
- 685-2-2 (1983): Appareils de connexion (jonction et/ou dérivation) pour installations électriques fixes, domestiques et similaires, Deuxième partie: Règles particulières — Bornes à vis pour raccordement de conducteurs en cuivre.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TR 60943:1989

Withdrawing

- 364-5-523 (1983): Part 5: Selection and erection of electrical equipment, Chapter 52: Wiring systems.
Section 523: Current-carrying capacities.
- 493: Guide for the statistical analysis of ageing test data.
- 685-2-2 (1983): Connecting devices (junction and/or tapping) for household and similar fixed electrical installations, Part 2: Particular requirements — Screwtype terminals for connecting copper conductors.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TR 60943:1989

Withd 2020

GUIDE POUR LA SPÉCIFICATION DES TEMPÉRATURES ET DES ÉCHAUFFEMENTS ADMISSIBLES POUR LES PARTIES DES MATÉRIELS ÉLECTRIQUES, EN PARTICULIER LES BORNES DE RACCORDEMENT

INTRODUCTION

- 1) Les échauffements rencontrés en appareillage par suite 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 de l'appareillage, où de nombreux organes dissipant de l'énergie (contacteurs, fusibles, résistance, etc.), en particulier les dispositifs modulaires (voir paragraphe 5.2.4.2), 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 y a lieu d'en limiter les effets pour la bonne tenue des isolants de ces conducteurs pendant la durée de vie de l'installation.

- 2) 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;
 - proposer des règles élémentaires pour la spécification des températures et des échauffements admissibles.

- 3) 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.

- 4) 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 câbles 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

GUIDE FOR THE SPECIFICATION OF PERMISSIBLE TEMPERATURE AND TEMPERATURE RISE FOR PARTS OF ELECTRICAL EQUIPMENT, IN PARTICULAR FOR TERMINALS

INTRODUCTION

- 1) The temperature rise encountered in switchgear 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 switchgear, where numerous components dissipating energy (contactors, fuses, resistors, etc.), in particular modular devices (see Sub-clause 5.2.4.2), 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.

- 2) 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 for specifying permissible temperatures and temperature rises.
- 3) 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.
- 4) 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 cables connected 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

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 (paragraphe 5.2.3.2.) qui précise les valeurs du coefficient de remplissage à utiliser dans quelques cas pratiques.

Note. — 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.

Il est fortement conseillé d'étudier les ouvrages cités en référence à la fin de ce rapport avant de tenter d'appliquer les données à un problème pratique.

1. Généralités

1.1 *Domaine d'application*

Le présent rapport est destiné à servir de guide lorsqu'il s'agit de spécifier des valeurs admissibles pour les températures et les échauffements de parties de matériels électriques.

Ce rapport s'applique plus particulièrement aux contacts et aux bornes de raccordement de l'appareillage. Il ne s'applique pas aux enroulements des machines électriques tournantes et des transformateurs.

1.2 *Objet*

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 des échauffements des contacts et des bornes de raccordement;
- les températures et échauffements maximaux admissibles pour différents organes d'appareillage, en particulier les contacts, les bornes de connexion et les câbles qui leur sont raccordés;
- la marche générale à suivre pour spécifier les températures et échauffements admissibles.

2. Généralités sur la nature du contact électrique et le calcul de 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.

2.1.1 *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

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 (Sub-clause 5.2.3.2) which specifies the values of the coefficient of filling to be used in several practical cases.

Note. — 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 values may be obtained by direct measurement on given items of electrical equipment.

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.

1. General considerations

1.1 Scope

This report is intended for guidance in specifying the permissible values for temperature and temperature rise of component parts of electrical equipment.

This report applies more particularly to switchgear contacts and connection terminals. It does not apply to the windings of rotating electrical machines or transformers.

1.2 Object

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 switchgear components, in particular the contacts, the connection terminals and the cables connected to them;
- the general procedure to be followed for specifying the permissible temperature and temperature rise.

2. General considerations concerning the nature of electric contact and the calculation 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.

2.1.1 The 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”.

appelés «contacts élémentaires». La section effective totale de ces contacts est égale à la surface d'appui S_a^* , 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 paragraphe 2.2), est normalement présente.

Dans ce qui suit, on suppose, pour la commodité des calculs et pour une meilleure compréhension des mécanismes de contact, 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, égale à la surface d'appui, est alors:

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

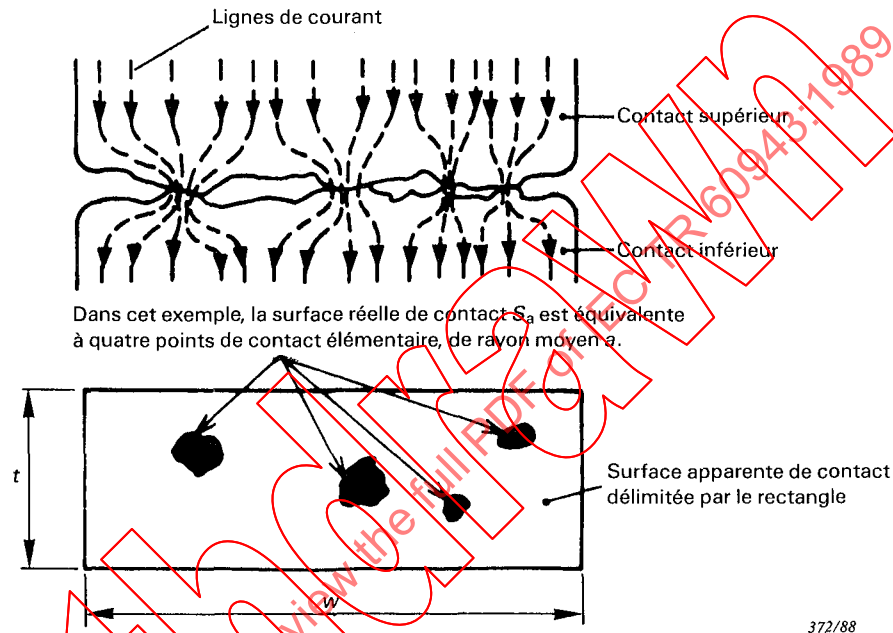


FIG. 1. — Illustration des surfaces apparente et réelle de contact.

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.

Si l'on admet que la pression exercée sur la surface d'appui est égale à la pression de rupture à l'écrasement du métal (H), on obtient:

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

* Pour l'explication des symboles utilisés dans ce rapport, se reporter à l'annexe F.

The effective total cross-sectional area of these contacts is equal to the effective contact area S_a^* , 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 Sub-clause 2.2).

In the following, for ease of calculation and for a better understanding of the contact mechanisms, we make the simplifying assumption 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:

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

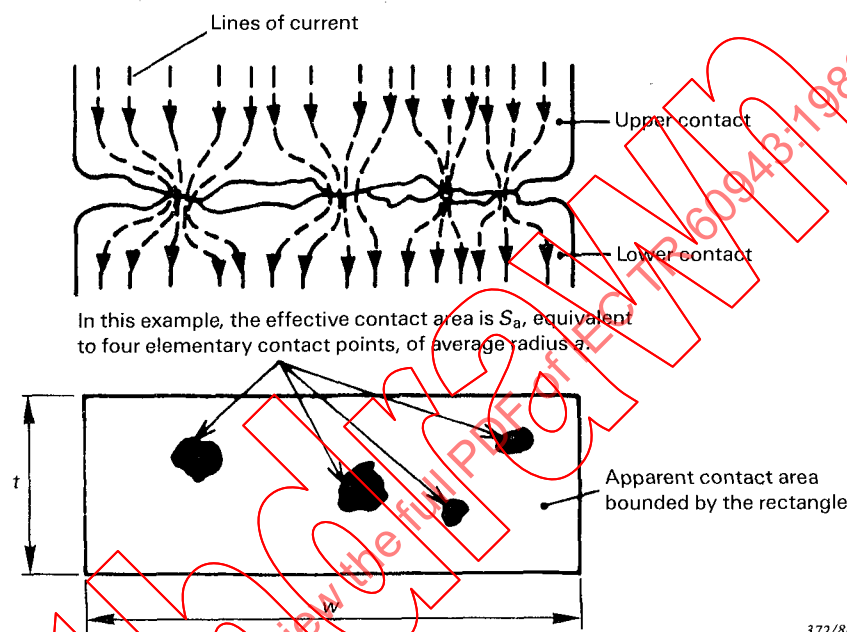


FIG. 1. — Illustration of apparent contact and effective contact areas.

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 material characterized by the "hardness" of the 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 (in the order of 1/100 mm) and are crushed even by small forces in the order of 0.1 N.

If we assume that the pressure exerted upon the contact area is equal to the contact hardness of the metal (H), we obtain:

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

* For an explanation of the symbols used in this report, see Appendix F.

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

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

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

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

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

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

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

où:

$$n_k \approx 2,5 \times 10^{-5} \text{ (S I)}$$

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} (S I).

2.1.2 Exemple numérique

Soit un contact formé par la jonction en bout de deux barres conductrices en cuivre, de section carrée de $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} = 100 \text{ mm}^2$, appliquées avec une force de contact $F = 100$ N.

Pour le cuivre, l'annexe A donne $H = 5,5 \times 10^8$ Pa, d'où:

$$n = 2,5 \times 10^{-5} \times (5,5 \times 10^8)^{0,625} \times 100^{0,2} = 18,2, \text{ soit } n \approx 18 \text{ points de contact.}$$

On en déduit:

$$a = \sqrt{\frac{100}{18 \times \pi \times 0,45 \times 5,5 \times 10^8}} = 85 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Le rayon de chaque contact élémentaire est donc de l'ordre de 0,085 mm.

La surface d'appui, supposée égale à la surface en réel contact physique, est donnée par:

$$S_a = \frac{F}{\xi H} = n \pi a^2 = 0,4 \text{ mm}^2$$

La surface active, par où passe la totalité du courant, ne représente de ce fait que 4‰ de la surface apparente de contact; si l'intensité totale est de 300 A (3 A/mm² dans le conducteur), la densité de courant aux contacts est de 750 A/mm².

La densité de courant aux points de contact élémentaire est donc très importante, du même ordre que celle qui est habituellement rencontrée dans les semi-conducteurs.

Note. — La pression de rupture H d'une surface de contact dépend de la durée d'application de la force de contact uniforme, ainsi que de la température existant à ce point de contact [1], [2]*. Lors du calcul de l'échauffement d'un contact, on a supposé ici une valeur constante de H par souci de simplicité.

* Les chiffres entre crochets se rapportent aux références données page 136.

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

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

where ξ is a dimensionless “coefficient of flatness” dependent upon the state of the surfaces in contact, usually having a value of between 0.3 and 0.6 for normal forces, but which can be much smaller after extensive polishing of the contact surfaces against each other.

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

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

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

$$n = n_k H^{0.625} F^{0.2} \quad (2)$$

where:

$$n_k \approx 2.5 \times 10^{-5} \text{ (S I)}$$

This 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 0.5×10^{-5} and 30×10^{-5} (S I).

2.1.2 Numerical example

Let us take a contact formed by the end-to-end meeting of two conductive copper bars, of square section measuring $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} = 100 \text{ mm}^2$, applied with a contact force $F = 100$ N.

For copper, Appendix A gives $H = 5.5 \times 10^8$ Pa, hence:

$$n = 2.5 \times 10^{-5} \times (5.5 \times 10^8)^{0.625} \times 100^{0.2} = 18.2, \text{ i.e. } n \approx 18 \text{ points of contact.}$$

We thus obtain:

$$a = \sqrt{\frac{100}{18 \times \pi \times 0.45 \times 5.5 \times 10^8}} = 85 \times 10^{-6} \text{ m}$$

The radius of each elementary contact is thus of the order of 0.085 mm.

The contact area, taken to be equal to the area in actual physical contact, is given by:

$$S_a = \frac{F}{\xi H} = n \pi a^2 = 0.4 \text{ mm}^2$$

The active area, through which the whole of the current passes, is therefore only 4‰ of the apparent contact area; if the total current is 300 A (3 A/mm² in the conductor), the current density at the contacts is 750 A/mm².

The current density at the elementary contact points is thus very large, in the same order as that usually found in semiconductors.

Note. — The contact hardness H of a contact surface depends on the duration of a uniform contact force and also on the temperature prevailing at the contact point [1], [2]*. When calculating the rise in temperature of a contact, a *constant* contact hardness has here been assumed for simplicity.

* The figures in square brackets refer to the references given on page 137.

2.2 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.

2.2.1 Calcul de la résistance de constriction

Soit (voir 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 A et B situés aux extrémités du diamètre du contact élémentaire et les surfaces équipotentiellles sont des ellipsoïdes aplatis de mêmes foyers.

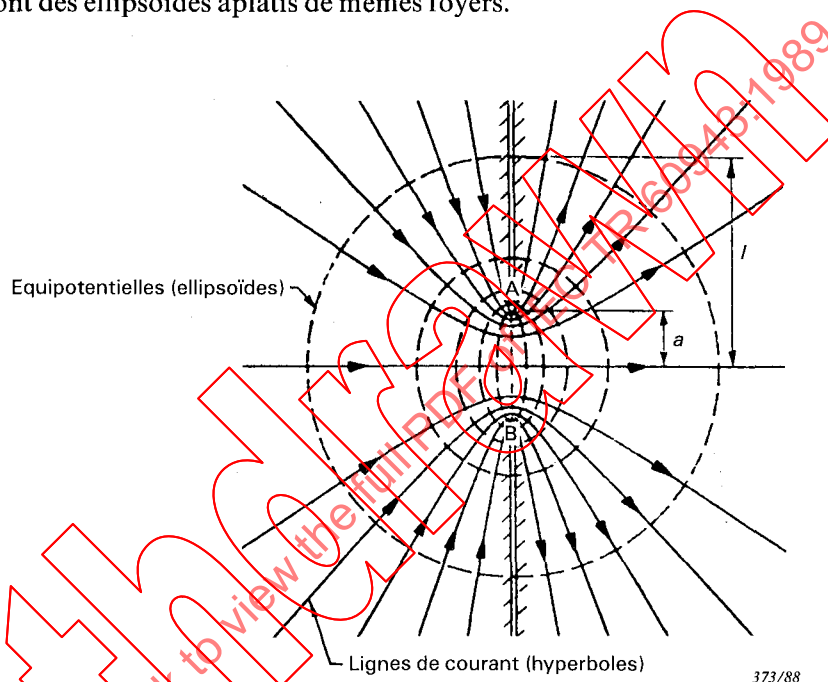


FIG. 2. — Equipotentiellles et lignes de courant au niveau d'un contact élémentaire.

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

$$R_{(a,l)} = \frac{\rho}{\pi a} \arctan \frac{\sqrt{l^2 - a^2}}{a}; \quad (\rho = \text{résistivité du métal})$$

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

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

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

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

2.2 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.

2.2.1 Calculation of the constriction resistance

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

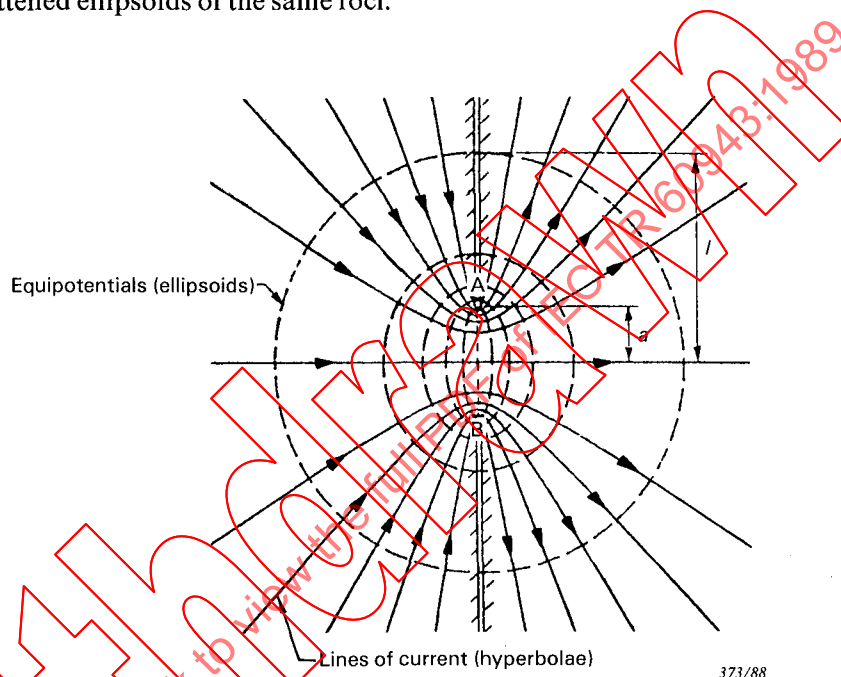


FIG. 2. — Equipotentials and lines of current at an elementary contact point.

The resistance $R_{(a,l)}$ between the point of contact AB and the semi-ellipsoid of major semi-axis l (l being the average distance between neighbouring elementary contacts) is equal to half the contact resistance, and is written:

$$R_{(a,l)} = \frac{\rho}{\pi a} \arctan \frac{\sqrt{l^2 - a^2}}{a}; \quad (\rho = \text{resistivity of the metal})$$

i.e., if l is large compared with a , which is the more common case:

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

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

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

2.2.2 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 est «passivé»; 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 C 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 électronvolts, il faut multiplier w par $1,6021 \times 10^{-19} \text{ J/eV}$. X est une constante et k est la constante de Boltzmann.

Cette couche d'oxyde, de faible épaisseur, ne présente pas, au passage du courant, une résistance purement ohmique telle qu'on pourrait l'évaluer par la formule $\frac{\rho \times \text{longueur}}{\text{section}}$; elle peut en effet être franchie par les électrons suivant un mécanisme d'«effet tunnel».

On utilise, pour caractériser les propriétés conductrices de cette couche, la «résistivité d'effet tunnel» σ_0 qui s'exprime en Ωm^2 ; elle dépend de la nature de l'oxyde et de son épaisseur (voir figure 3). Il s'agit dans ce cas de l'épaisseur «pratique» et non de l'épaisseur théorique d'un réseau d'oxyde cristallin idéal, pour lequel les abscisses devraient être multipliées par un facteur compris entre 0,5 et 0,1.

σ_0 dépend également de la force de contact, car le réseau cristallin d'oxyde peut être déformé. L'indépendance de σ_0 en fonction de la température ne s'applique plus dans le cas de températures plus élevées (pour $\Theta > 30^\circ\text{C}$) qui peut uniquement être produit, par exemple, par des pertes dues au courant dans le contact. (Θ est la température Celsius. Note $T = \Theta + 273,15$.)

2.2.2 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 Appendix C 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 1.6021×10^{-19} J/eV. X is a constant and k is the Boltzmann constant.

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

$\frac{\rho \times \text{length}}{\text{cross-section area}}$; the electrons can in fact pass through it by a “tunnel effect” mechanism.

The “tunnel effect resistivity” σ_o which is used to characterize the conductive properties of this layer is expressed in Ωm^2 ; this depends on the nature of the oxide and its thickness (see Figure 3). It is a question in this case of “practical” thickness rather than the theoretical thickness of an ideal crystalline oxide network, for which the abscissae should be multiplied by a factor of between 0.5 and 0.1.

σ_o is also dependent on the contact force, as the crystalline oxide network may be deformed. The independence of σ_o in relation to temperature does not apply in the case of higher temperatures (for $\Theta > 30^\circ\text{C}$) which can only, for example, be produced by current heat losses in the contact. (Θ is the Celsius temperature. Note $T = \Theta + 273.15$.)

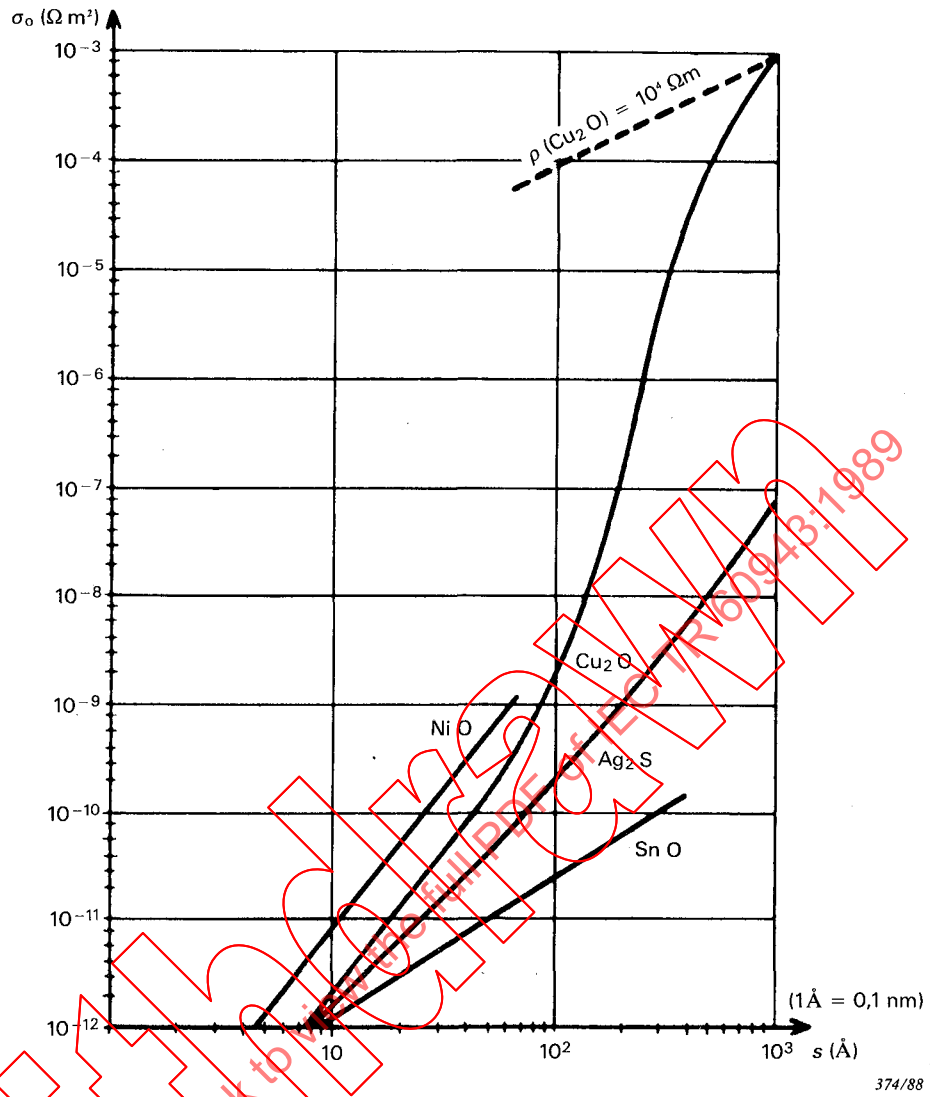


FIG. 3. — Résistivité superficielle σ_o en fonction de l'épaisseur s de la couche d'oxyde.

Si la couche d'oxyde recouvre uniformément la surface réelle de contact S_a , la résistance R_i apparaissant 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:

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

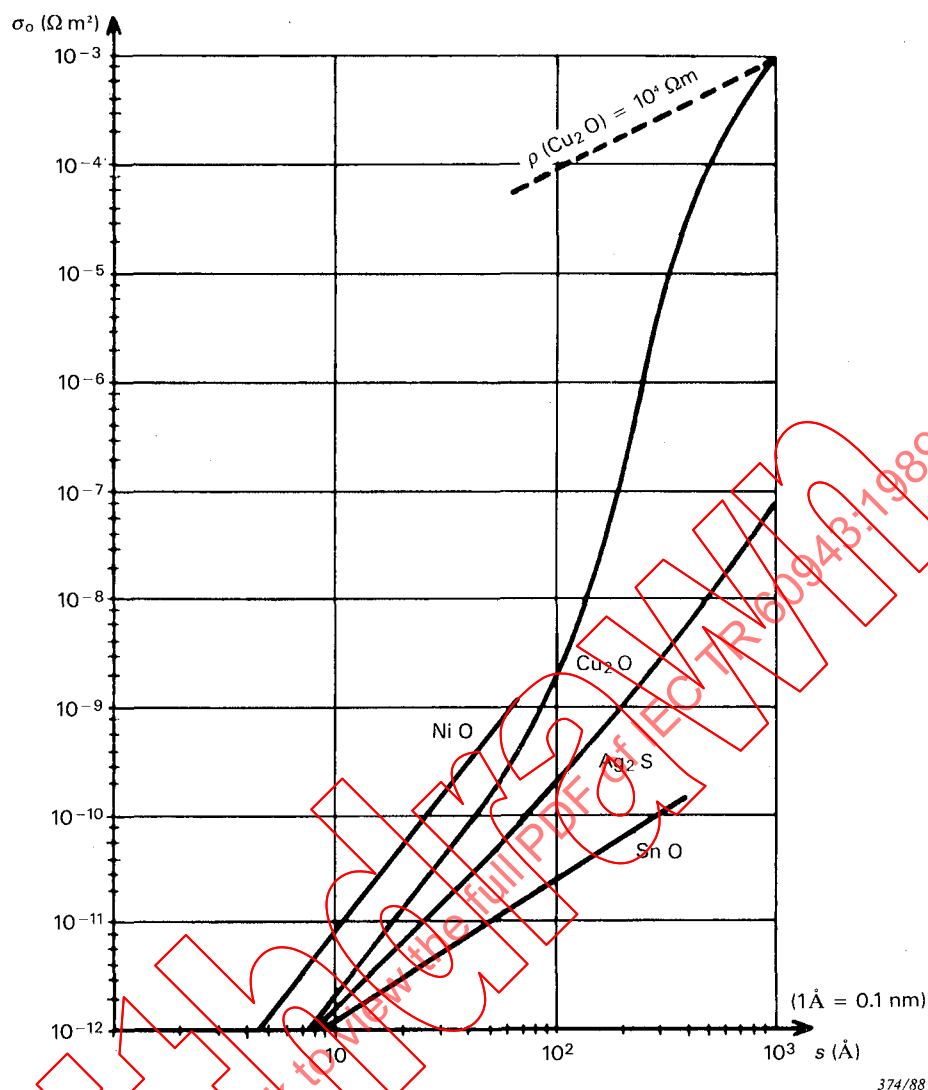


FIG. 3. — Surface resistivity σ_o as a function of the thickness s of the layer of oxide.

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:

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

2.2.3 Expression de la résistance totale de contact

La résistance de contact R_c est la somme de la résistance de constriction R_e (formule (4)) et de la résistance de film R_f (formule (6)), soit:

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

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

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

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

on obtient l'expression suivante pour R_c :

$$R_c = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi \xi}{n_k}} H^{0,1875} F^{-0,6} + \frac{\sigma_0 \xi}{2} H F^{-1} \quad (8)$$

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

TABEAU I

Valeurs typiques des constantes de résistance de contact, calculées pour des surfaces relativement propres

Métal	Résistance de contact $R_c = k_1 F^{-0,6} + k_2 \sigma_0 F^{-1}$	
	Résistance de constriction k_1 $\times 10^{-5}$	Résistance de film k_2 $\times 10^6$
Cuivre	9	247
Laiton	36	450
Aluminium (A5L)	13	135
Almelec	15	135
Argent	8,1	225
Étain	40	22,5
Nickel	42	585
Cuivre argenté	8,8	225
Cuivre étamé	5,7	22,5
Aluminium étamé	9,3	22,5
Laiton argenté	31	225
Laiton étamé	20	22,5

2.2.3 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_f (equation (6)), i.e.:

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

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

$$n = n_k H^{0.625} F^{0.2} \quad \text{with } n_k \approx 2.5 \times 10^{-5} \text{ (S I)}$$

$$a = \sqrt{\frac{F}{n \pi \xi H}} \quad \text{with } \xi \approx 0.45$$

we obtain the following expression for R_c :

$$R_c = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi \xi}{n_k}} H^{0.1875} F^{-0.6} + \sigma_0 \xi H F^{-1} \quad (8)$$

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

TABLE I

Typical values of contact resistance constants, calculated for relatively clean surfaces

Metal	Contact resistance $R_c = k_1 F^{-0.6} + k_2 \sigma_0 F^{-1}$	
	Constriction resistance k_1 $\times 10^{-5}$	Film resistance k_2 $\times 10^6$
Copper	9	247
Brass	36	450
Aluminium (A5L)	13	135
Almelec	15	135
Silver	8.1	225
Tin	40	22.5
Nickel	42	585
Silvered copper	8.8	225
Tinned copper	5.7	22.5
Tinned aluminium	9.3	22.5
Silvered brass	31	225
Tinned brass	20	22.5

2.2.4 Comparaison avec les résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux issus des travaux de différents auteurs sont donnés à la figure 4, page 26, pour le cuivre, le cuivre étamé, l'argent et l'aluminium. Les références correspondantes sont:

- 1: cuivre neuf
- 2: cuivre oxydé
- 3: cuivre nettoyé
- 4: cuivre étamé (caractéristiques directe et inverse)
- 5: cuivre argenté
- 6: contacts en argent dans l'air (contact en bout)
- 7: contacts en argent dans le vide (les caractéristiques directe et inverse sont confondues; contact en bout)
- 8: contacts en bout en aluminium, revêtus de graisse contactale (caractéristiques directe et inverse)
- 9: contact en aluminium (caractéristiques directe et inverse)

Les valeurs obtenues dans la pratique pour σ_0 en fonction de ces données sont celles du tableau II ci-dessous.

- Notes 1. — 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.
2. — Dans le cas de contacts entre métaux différents, la résistance globale est la moitié de la somme des résistances de chaque membre de la paire de contacts.

TABIEAU II
Valeurs typiques de la résistivité superficielle d'effet tunnel

Métal	Etat	σ_0 (Ωm^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} pouvant atteindre $2,5 \times 10^{-11}$
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 adsorbées, soit $2 \times 2,72 \text{ \AA} = 5,4 \text{ \AA}$.

Les valeurs maximales obtenues pour σ_0 sont de $10^{-10} \Omega\text{m}^2$ pour le cuivre oxydé et de 7×10^{-11} à $10^{-9} \Omega\text{m}^2$ pour l'aluminium, cela étant dû à la forte épaisseur de la couche d'alumine (40 Å) existant toujours à la surface de ce métal après exposition à l'air.

D'une manière générale, les courbes théoriques tracées avec ces valeurs de σ_0 sont en bonne coïncidence avec les résultats expérimentaux.

2.2.4 Comparison with experimental results

Experimental results taken from the work of various authors are given in Figure 4, page 27, for copper, tinned copper, silver and aluminium. The corresponding references are:

- 1: new copper
- 2: oxidized copper
- 3: cleaned copper
- 4: tinned copper (direct and inverse characteristics)
- 5: silvered copper
- 6: silver contacts in air (end contact)
- 7: silver contacts in vacuum (the direct and inverse characteristics are mixed; end contact)
- 8: end contacts of aluminium, covered with contact grease (direct and inverse characteristics)
- 9: aluminium contact (direct and inverse characteristics)

The values obtained in practice for σ_o in the case of these data are those given in Table II.

- Notes 1. — 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.
2. — In the case of contacts of dissimilar metals, the overall resistance is half the sum of the resistance of each member of the contact pair.

TABLE II
Typical values of the tunnel effect surface resistivity

Metal	State	$\sigma_o (\Omega m^2)$
Copper	New	2×10^{-12} to 3×10^{-11}
	Oxidized	10^{-10}
	Tinned	10^{-12} to 4×10^{-11}
Silver		4.6×10^{-13} to 4×10^{-12} and up to 2.5×10^{-11}
Aluminium		7×10^{-11} to 10^{-9}

The values obtained are low for new contacts. The minimum value of 4.6×10^{-13} for silver corresponds to the limit thickness of two adsorbed mono-molecular layers of oxygen, i.e. $2 \times 2.72 \text{ \AA} = 5.4 \text{ \AA}$.

The maximum values obtained for σ_o are $10^{-10} \Omega m^2$ for oxidized copper and 7×10^{-11} to $10^{-9} \Omega m^2$ for aluminium, the latter being due to the considerable thickness of the layer of alumina (40 Å) always existing on the surface of this metal after exposure to air.

In general, the theoretical curves drawn with these σ_o values coincide closely with experimental results.

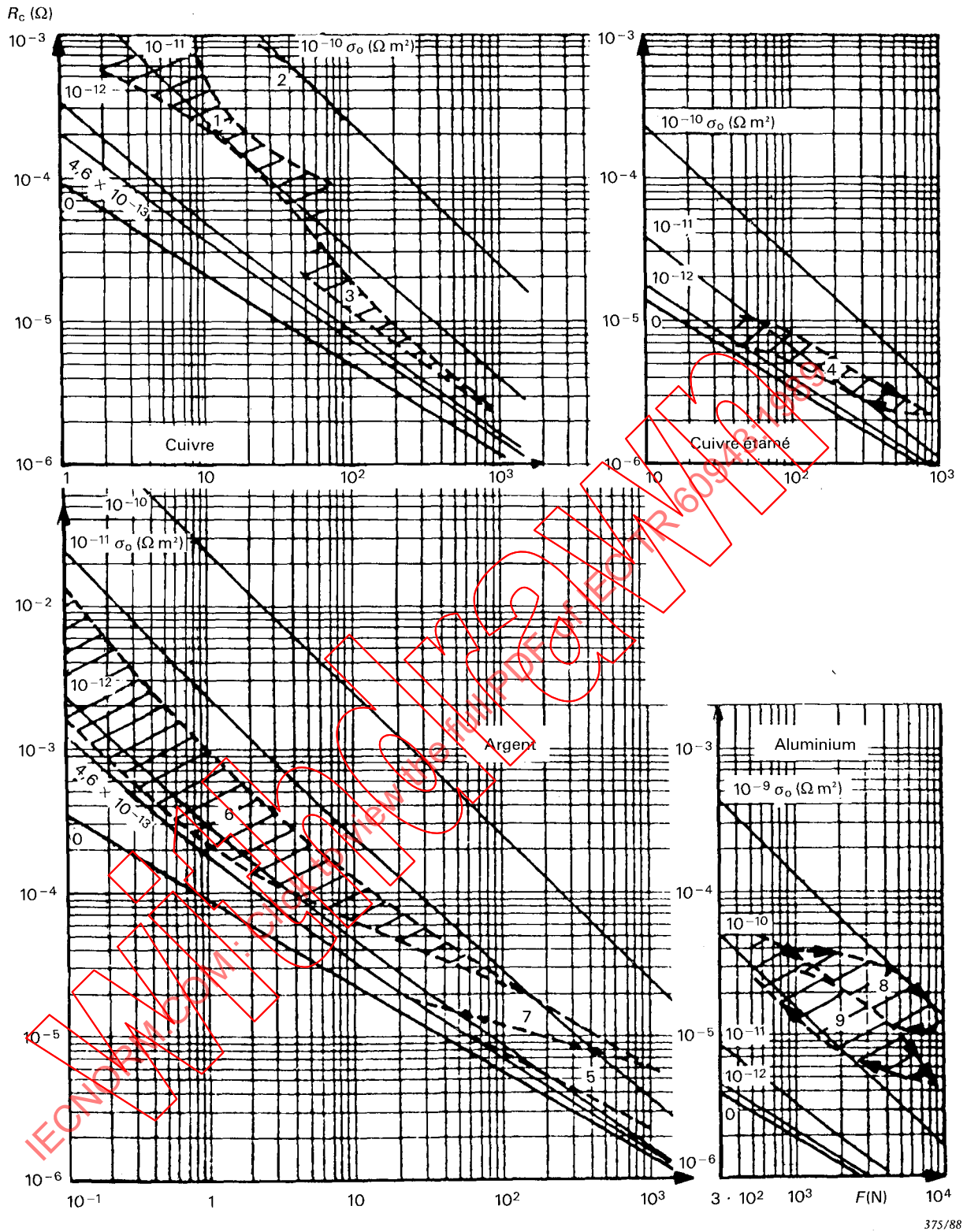
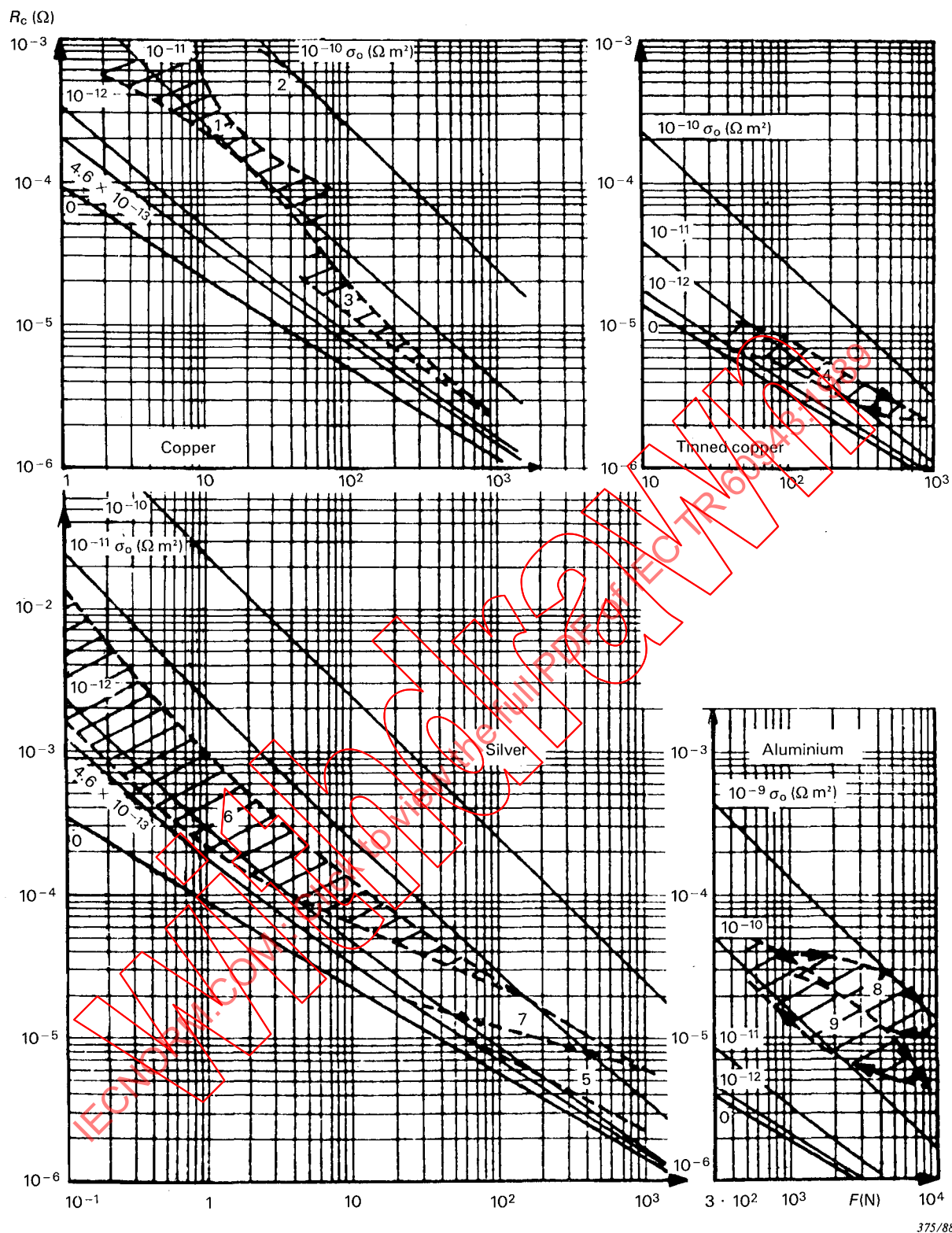


FIG. 4. — Comparaison des courbes théoriques de résistance de contact (R_c) en fonction de la force appliquée (F) (trait continu pour plusieurs valeurs de la résistivité superficielle σ_o (de $4,6 \times 10^{-13}$ à 10^{-9})) avec les résultats expérimentaux (trait interrompu; courbes indiquant la résistance en fonction de la force appliquée pour le cuivre, le cuivre étamé, l'argent et l'aluminium). (Les chiffres 1 à 9 des graphiques ci-dessus font référence aux matériaux énumérés au premier alinéa du paragraphe 2.2.4.)



375/88

FIG. 4. — Comparison of the theoretical curves of contact resistance (R_c) as a function of applied force (F) (continuous line for various values of the superficial resistivity σ_o (from 4.6×10^{-13} to 10^{-9})) with experimental results (broken line, curves showing resistance as a function of applied force for copper, tinned copper, silver and aluminium). (Numbers 1 to 9 on the graphs refer to the materials enumerated in the first paragraph of Sub-clause 2.2.4.)

On notera le phénomène d'hystérésis auquel est soumise la résistance de contact lorsque l'on fait subir au contact des charges cycliques croissantes et décroissantes, en évitant au maximum de faire glisser les deux faces du contact l'une sur l'autre lors du cyclage de la charge mécanique.

2.2.5 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 est légèrement inférieure à celle du cuivre. Cependant, dans le cas de contacts étamés de type élastique ou soumis à des vibrations, il y aura lieu de tenir compte des phénomènes d'«effritement par corrosion»* de la couche d'étain, évoqués au paragraphe 3.5.

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, etc.).

2.2.6 Exemple numérique

On se reportera à l'exemple du paragraphe 4.5 qui traite complètement le problème du contact formé par la jonction en bout de deux barres conductrices en cuivre.

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 l'oxydation des métaux à l'interface des contacts.

Cette oxydation peut être:

- d'origine électrochimique: 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).

3.2 Contacts de métaux différents

La corrosion de contacts de métaux différents M_1 et M_2 se produit si les conditions suivantes sont réunies:

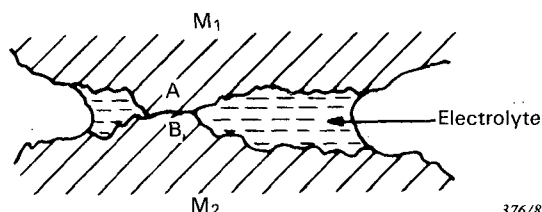


FIG. 5. — Contact entre métaux différents en présence d'humidité (adsorption d'eau).

* Terme communément désigné par «fretting corrosion» en anglais.

The hysteresis phenomenon to which the contact resistance is subject will be noted when the contact is made to undergo increasing and decreasing cyclic loading, care being taken to prevent the two faces of the contact from sliding against each other when cycling the mechanical load.

2.2.5 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 subject to vibration, account must be taken of "fretting corrosion" phenomena on the layer of tin, mentioned in Sub-clause 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, etc.).

2.2.6 Numerical example

Refer to the example in Sub-clause 4.5 which deals fully with the problem of the contact formed by the end-to-end meeting of two conductive copper bars.

3. Ageing mechanisms of contacts and connection terminals

3.1 General

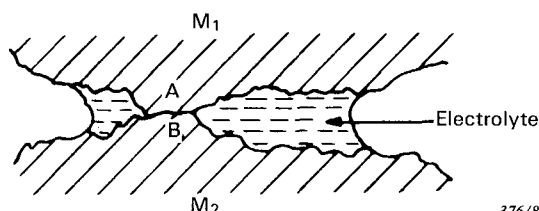
The ageing of closed electric contacts not subjected to arc erosion (the case with terminals in particular) is essentially due to the oxidation of the metals at the contact interface.

This oxidation can be:

- of electrochemical origin: 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).

3.2 Contacts of dissimilar metals

Corrosion of contacts of dissimilar metals M_1 and M_2 will occur if the following conditions are met:



376/88

FIG. 5. — Contact between dissimilar metals in the presence of humidity (water adsorption).

- Métaux différents — La différence de potentiel électrochimique apparaissant entre les bornes A et B avant contact doit être, en pratique, de l'ordre de 0,5 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 donneur 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 sur les surfaces A et B en circuit ouvert (contact non encore réalisé) sont données dans le tableau III.

TABLEAU III
Tensions en 10^{-2} V développées aux contacts bimétalliques

Anode (-) \ Cathode (+)	Argent	Nickel	Monel (30% Cu)	Cupro-nickel (70-30)	Cuivre	Soudure à l'argent	Bronzes*	Bronze rouge	Laitons*	Aciers inox.*	Etain	Soudure étain-plomb	Soudure étain-argent	Plomb	Fonte grise	Aciers	Alliages d'aluminium*	Aluminium	Cadmium	Fer ou acier galvanisé	Alliages de zinc*	Zinc	Alliages de magnésium*
Argent	0	15	17	19	19	21	23	25	26	33	47	48	51	56	71	72	77	77	79	109	110	111	159
Nickel		0	02	04	04	06	08	10	11	16	32	33	36	41	53	57	62	62	64	94	95	96	144
Monel (30% Cu)			0	02	02	04	06	08	09	16	30	31	34	39	54	55	60	60	62	92	93	94	142
Cupro-nickel (70-30)				0	0	02	04	06	07	14	28	29	32	37	52	53	58	58	60	90	91	92	140
Cuivre					0	02	04	06	07	14	28	29	32	37	52	53	58	58	60	90	91	92	140
Soudure à l'argent						0	02	04	05	12	26	27	30	35	50	51	56	56	58	88	89	90	138
Bronzes*							0	02	03	10	24	25	28	33	48	49	54	54	56	86	87	88	136
Bronze rouge								0	01	06	22	23	26	31	46	47	52	52	54	84	85	86	134
Laitons*									0	07	21	22	25	30	45	46	51	51	53	83	84	85	133
Aciers inox.*										0	14	15	18	23	38	39	44	44	46	76	77	78	128
Etain											0	01	04	09	24	25	30	30	32	62	63	64	112
Soudure étain-plomb												0	03	08	23	24	29	29	31	61	62	63	111
Soudure étain-argent													0	05	20	21	26	26	28	58	59	60	108
Plomb														0	15	16	21	21	23	53	54	55	103
Fonte grise															0	01	06	06	08	38	39	40	88
Aciers																0	05	05	07	37	38	39	87
Alliages d'aluminium*																	0	0	02	32	33	34	82
Aluminium																		0	02	32	33	34	82
Cadmium																			0	30	31	32	80
Fer ou acier galvanisé																				0	01	02	50
Alliages de zinc*																					0	01	49
Zinc																						0	45
Alliages de magnésium*																							0

*Valeurs caractéristiques.

- a) Different metals — The difference in electrochemical potential between terminals A and B before contact must in practice be in the order of 0.5 V or more.
- b) Presence of an electrolyte — The film of water adsorbed on the surfaces in contact as a result of ambient humidity can play this role.
- c) Presence of an oxidizing agent — The term “oxidizing” is taken here in the general sense of giving up electrons, whose presence is necessary to depolarize the cell formed and allow the passage of current. Ambient air is sufficient.
- d) Contact closed, in order to conduct the corrosion current.

The potential differences appearing at surfaces A and B in open circuit (contact not yet made) are given in Table III.

TABLE III
Voltages in 10^{-2} V developed on bi-metallic contacts

Anode (–) Cathode (+)	Silver	Nickel	Monel (30% Cu)	Cupro-nickel (70-30)	Copper	Silver solder	Bronzes*	Red bronze	Brasses*	Stainless steels*	Tin	Tin-lead solder	Tin-silver solder	Lead	Cast-iron	Steels	Aluminium alloys*	Aluminium	Cadmium	Galvanized iron or steel	Zinc alloys*	Zinc	Magnesium alloy*
Silver	0	15	17	19	19	21	23	25	26	33	47	48	51	56	71	72	77	77	79	109	110	111	159
Nickel		0	02	04	04	06	08	10	11	16	32	33	36	41	53	57	62	62	64	94	95	96	144
Monel (30% Cu)			0	02	02	04	06	08	09	16	30	31	34	39	54	55	60	60	62	92	93	94	142
Cupro-nickel (70-30)				0	0	02	04	06	07	14	28	29	32	37	52	53	58	58	60	90	91	92	140
Copper					0	02	04	06	07	14	28	29	32	37	52	53	58	58	60	90	91	92	140
Silver solder						0	02	04	05	12	26	27	30	35	50	51	56	56	58	88	89	90	138
Bronzes*							0	02	03	10	24	25	28	33	48	49	54	54	56	86	87	88	136
Red bronze								0	01	06	22	23	26	31	46	47	52	52	54	84	85	86	134
Brasses*									0	07	21	22	25	30	45	46	51	51	53	83	84	85	133
Stainless steels*										0	14	15	18	23	38	39	44	44	46	76	77	78	128
Tin											0	01	04	09	24	25	30	30	32	62	63	64	112
Tin-lead solder												0	03	08	23	24	29	29	31	61	62	63	111
Tin-silver solder													0	05	20	21	26	26	28	58	59	60	108
Lead														0	15	16	21	21	23	53	54	55	103
Cast-iron															0	01	06	06	08	38	39	40	88
Steels																0	05	05	07	37	38	39	87
Aluminium alloys*																	0	0	02	32	33	34	82
Aluminium																		0	02	32	33	34	82
Cadmium																			0	30	31	32	80
Galvanized iron or steel																				0	01	02	50
Zinc alloys*																					0	01	49
Zinc																						0	45
Magnesium alloy*																							0

*Characteristic values.

Les combinaisons acceptables conduisent à des différences de potentiel généralement notablement inférieures à 50×10^{-2} V, les valeurs les plus basses étant les meilleures.

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

3.3 Mécanismes de vieillissement par oxydation

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

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

Ces deux mécanismes sont considérés successivement ci-dessous:

3.3.1 Réduction de section des contacts élémentaires

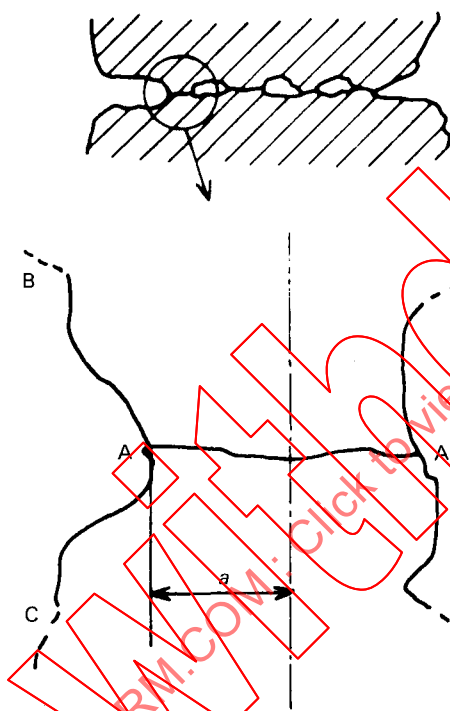


FIG. 6. — Point de contact élémentaire de rayon a .

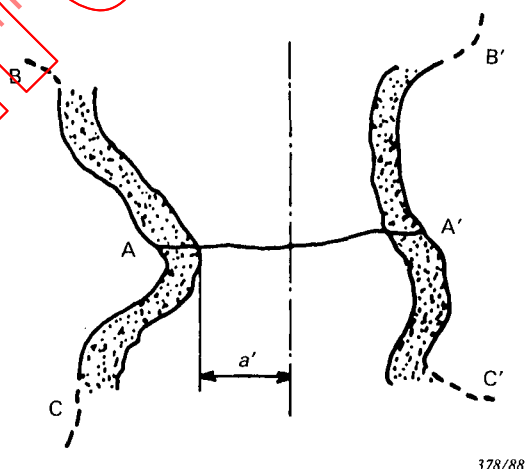


FIG. 7. — Oxydation d'un point de contact élémentaire.

Soit, sur un contact non oxydé, un point de contact élémentaire de rayon a (voir figure 6).

La surface de contact AA' contient relativement peu d'air, en partie chassé par la fermeture du contact, et peut produire seulement 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.

Acceptable combinations give potential differences generally significantly less than 50×10^{-2} V; 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_o gradually thickens.

These two mechanisms are considered below:

3.3.1 Reduction in cross-section of the elementary contacts

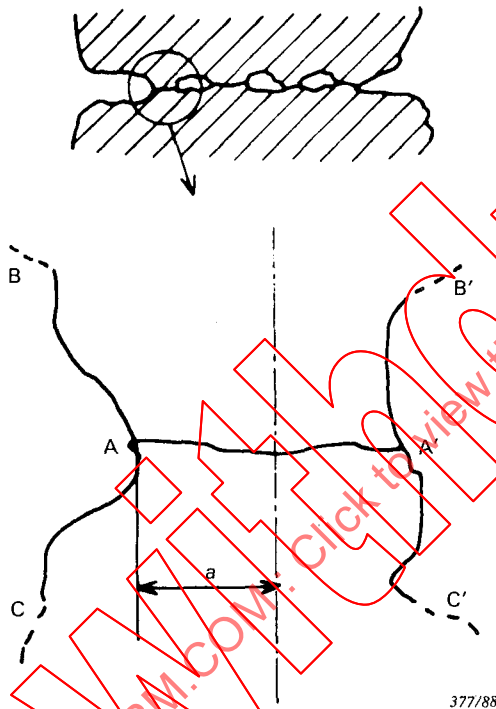


FIG. 6. — Elementary contact point of radius a .

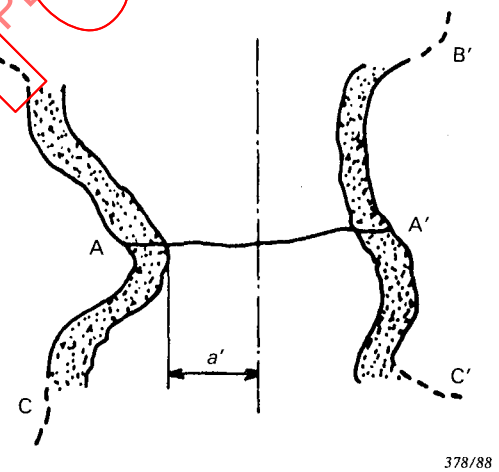


FIG. 7. — Oxidation of an elementary contact point.

On a non-oxidized contact an elementary contact point of radius a is considered (see Figure 6).

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.

Par suite, le rayon du contact élémentaire diminue progressivement et la résistance de contact augmente (voir figure 7, page 32).

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 7) peut se réduire à DD' (voir figure 8). Les surfaces EF et $E'F'$ (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 détermine 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 à serrage électrique que pour les bornes de raccordement à serrage forcé.

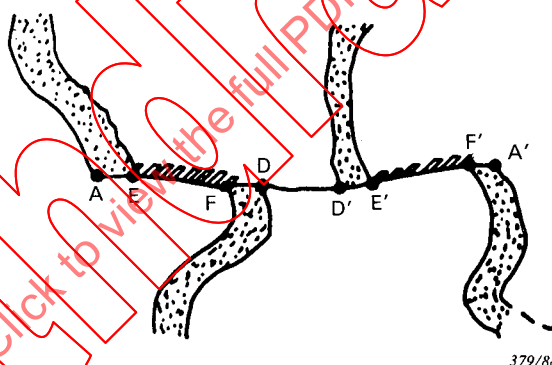


FIG. 8. — Influence d'un microdéplacement relatif sur l'oxydation d'un contact élémentaire.

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

Le deuxième mécanisme de vieillissement est le suivant (voir figure 9, page 36):

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.

As a result, the elementary contact radius gradually decreases and the contact resistance rises (see Figure 7, page 33).

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 lead 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 7 may be reduced to DD' (see Figure 8). The surfaces EF and $E'F'$ (initially protected) are now exposed to corrosion and, when the contacts return to their initial position, the non-oxidized 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 than on tightened-down connection terminals.

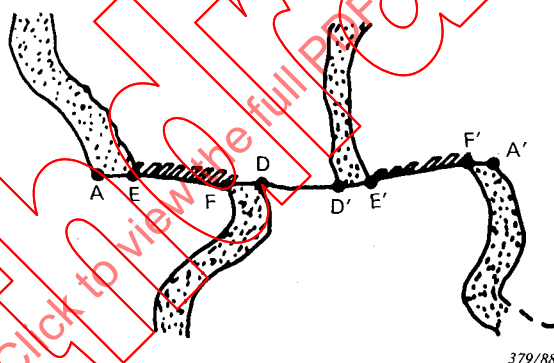


FIG. 8. — Influence of a relative micro-movement on the oxidation of an elementary contact.

3.3.2 Growth in the layer of oxide at the contact interface

The second ageing mechanism is as follows (see Figure 9, page 37):

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.

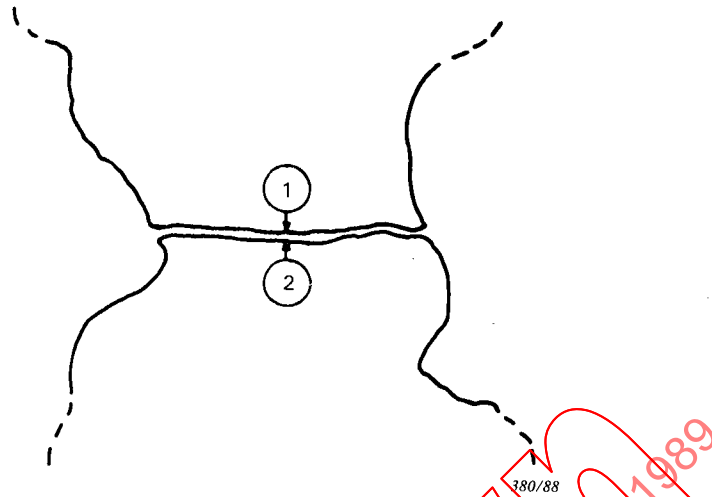


FIG. 9. — Oxydation des faces en regard dans un contact.

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 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

A partir des hypothèses de vieillissement, 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).

3.4.1 Influence de l'échauffement

Toutes choses étant égales par ailleurs, un contact ou une borne 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 (voir figure 10, page 38). ΔT_i est l'échauffement du composant par rapport au fluide environnant.

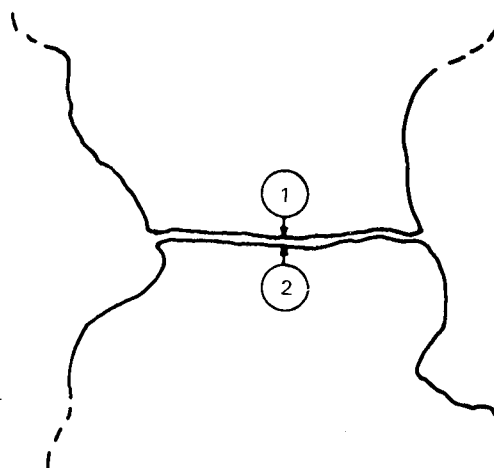


FIG. 9. — Oxidation of the opposite faces of a contact.

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 oxidizing 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 contacts

Starting from ageing hypotheses, 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).

3.4.1 Influence of temperature rise

All other things being equal, a contact or a terminal 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 (see Figure 10, page 39). ΔT_i is the temperature rise of the component relative to the surrounding fluid.

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} :

$$K_i = 2^{\frac{\Delta T_{i1} - \Delta T_{i2}}{\Delta_i}}$$

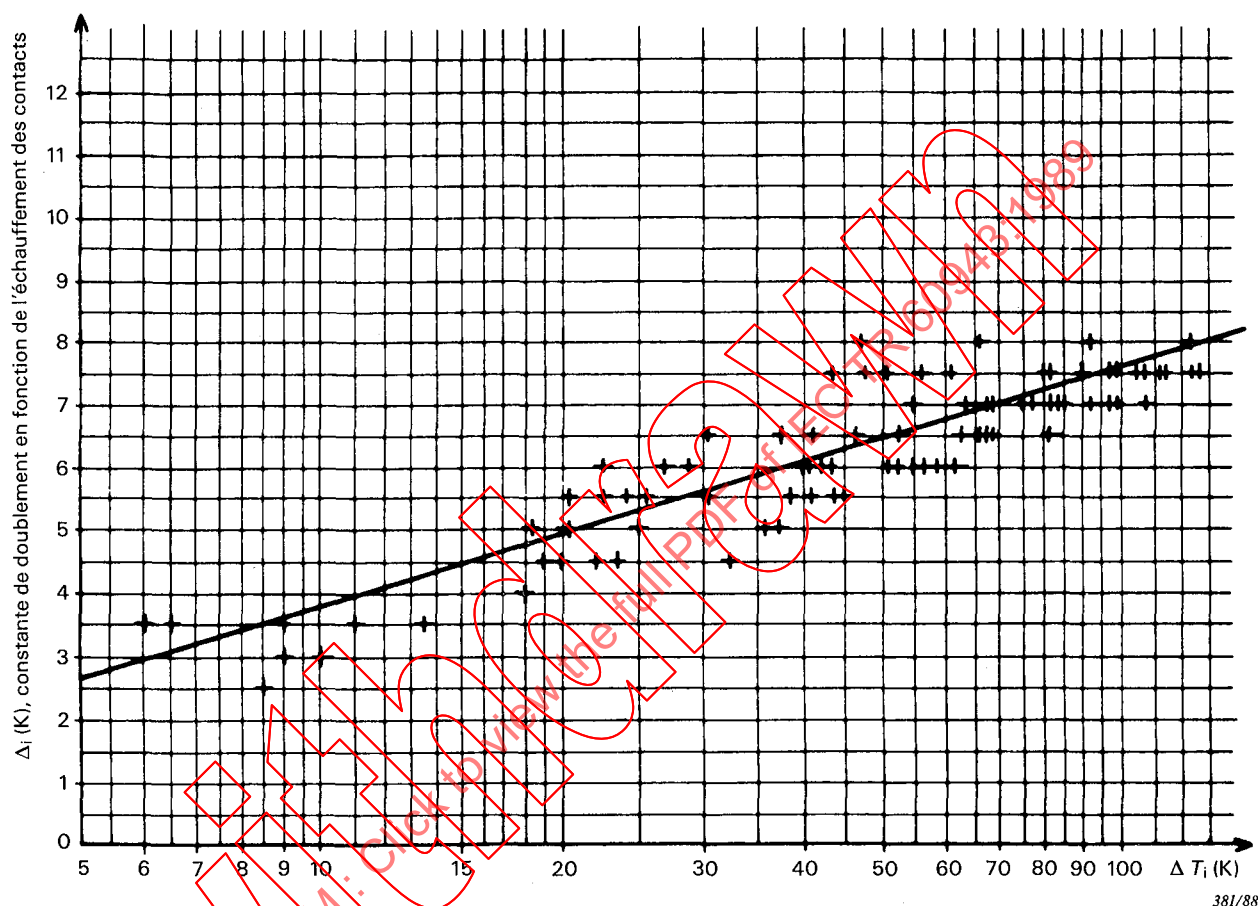


FIG. 10. — Constante de doublement Δ_i en fonction de l'échauffement (pour des contacts en cuivre).

Exemple: Soit, par exemple, 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

$$2^{\left(\frac{35 - 45}{6}\right)} = 0,315$$

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

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

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:

$$K_i = 2^{\frac{\Delta T_{i1} - \Delta T_{i2}}{\Delta_i}}$$

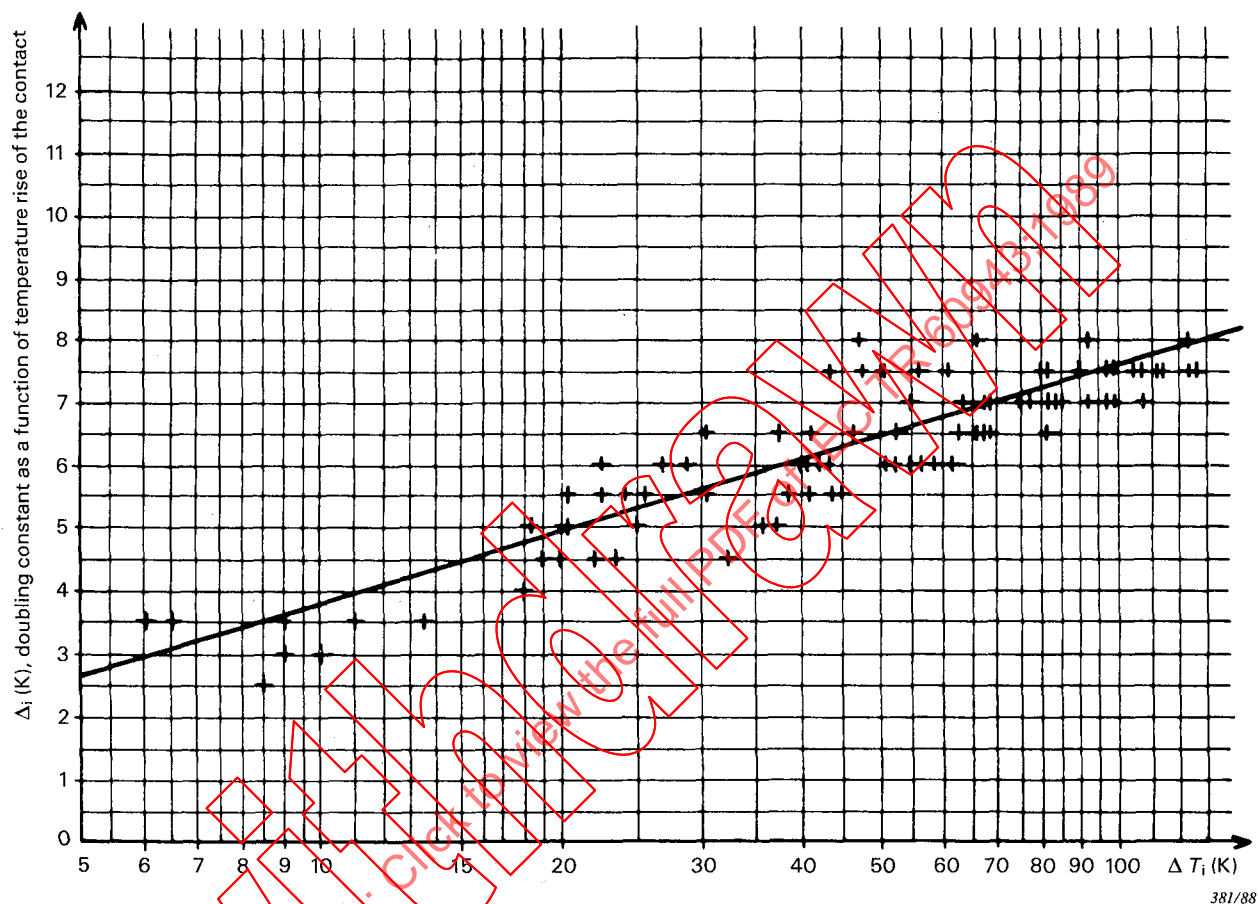


FIG. 10. — Doubling constant Δ_i as a function of temperature rise (for copper contacts).

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

$$2^{\left(\frac{35 - 45}{6}\right)} = 0.315$$

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 $\Delta_e(K)$, Δ_e étant donné à la figure 11 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:

$$K_e = 2^{\frac{T_{e1} - T_{e2}}{\Delta_e}}$$

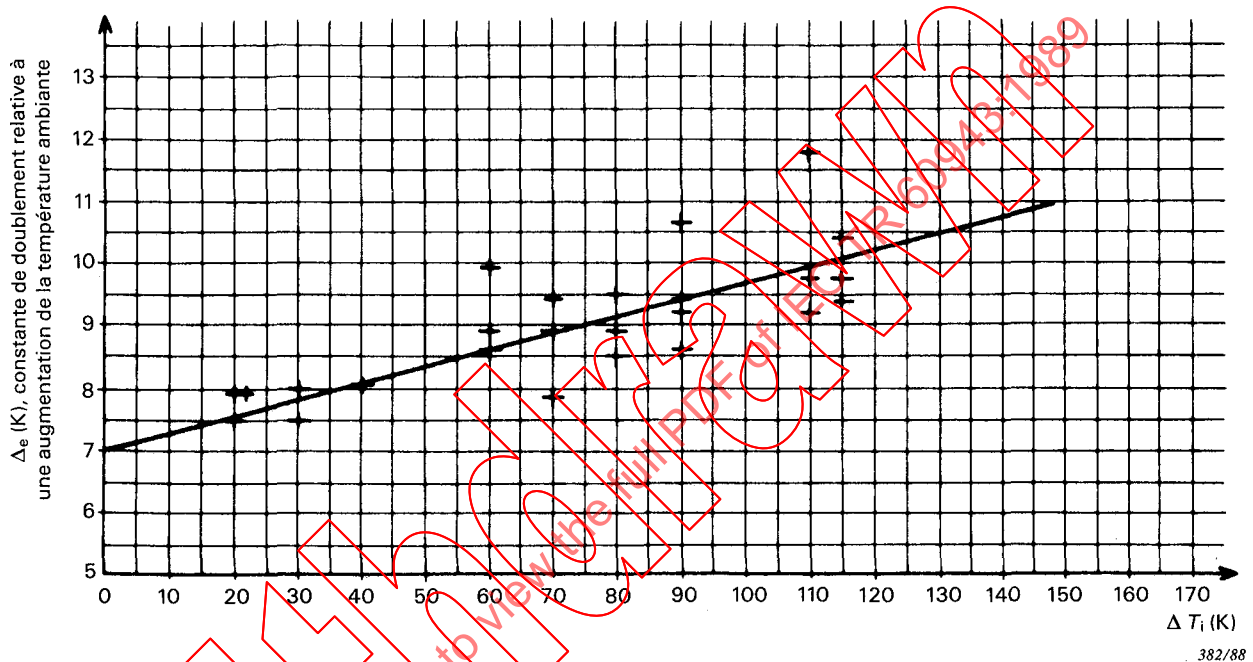


FIG. 11. — Constante de doublement Δ_e , exprimée comme l'échauffement prescrit du fluide environnant, en fonction de l'échauffement ΔT_i du contact (matériau de contact: cuivre, fluide: air).

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

Ainsi, pour un contact électrique 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 la 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 a pour expression:

$$K = 2^{\left[\frac{(\Delta T_{i1} - \Delta T_{i2})}{\Delta_i} + \frac{(T_{e1} - T_{e2})}{\Delta_e} \right]} \quad (9)$$

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), Δ_e being given in Figure 11 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:

$$K_e = 2^{\frac{T_{e1} - T_{e2}}{\Delta_e}}$$

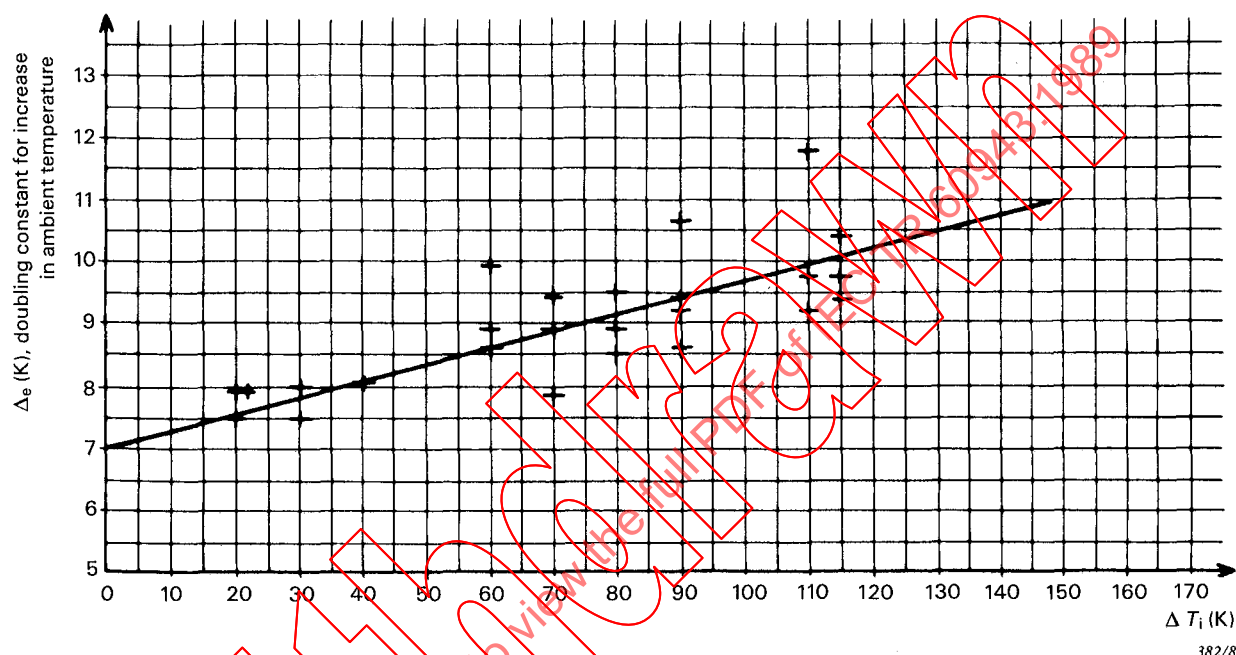


FIG. 11. — Doubling constant Δ_e expressed as the required temperature rise of the surrounding fluid, as a function of the temperature rise ΔT_i of the contact (contact material: copper, fluid: air).

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

Thus, for a 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 is expressed as follows:

$$K = 2^{\left[\frac{(\Delta T_{i1} - \Delta T_{i2})}{\Delta_i} + \frac{(T_{e1} - T_{e2})}{\Delta_e} \right]} \quad (9)$$

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

Le cuivre 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 œuvre 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, 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 (voir annexe C).

On obtient:

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

L'intérêt de l'étamage ou de l'argenture est évident. Le nickel ne se révèle intéressant que dans le cas d'atmosphères polluées où l'argent ne conviendrait pas; le cuivre nickelé n'est approprié que 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 manœuvres fréquentes sur de tels contacts par suite du risque d'arrachage de la couche d'étain. L'utilisation type des métaux de contact étamés 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 que la température ne dépasse pas 105°C pour l'étain, à cause des phénomènes de fluage qui apparaissent au-delà de cette valeur.

De plus, pour les contacts étamés élastiques ou boulonnés soumis à des vibrations, il peut se produire un phénomène de corrosion par effritement de la couche d'étain, conduisant rapidement à une destruction du contact, même dans le cas de courants faibles par rapport au courant assigné; il peut être préférable, dans ce cas, d'utiliser des contacts nus, argentés ou nickelés.

L'argent est un excellent matériau de contact dont le vieillissement est faible en atmosphère exempte de vapeurs sulfureuses.

L'aluminium est inutilisable sans élimination de sa couche d'alumine isolante par brossage sous graisse ou par un autre traitement spécial recommandé par le fabricant.

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

4.1 Définitions

La figure 12, page 44, représente, à titre d'exemple théorique, la variation de température le long de deux conducteurs formant contact en bout.

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

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, silvered 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 (see Appendix C).

The following values are obtained:

Bare copper	20 mΩ
Nickel-plated copper	35 mΩ
Tinned copper	6.8 mΩ
Silver-plated copper	0.3 mΩ

The advantages of tinning or silver plating are clear. Nickel only appears interesting for polluted atmospheres where silver could be unsuitable; 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 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 which are replaced (to restore the supply after the fuse has operated) creating a new contact surface. The temperature should not exceed 105°C for tin, because of the creep phenomena which occur above this level.

Moreover, for flexible or bolted tinned contacts subject to vibration, a “fretting corrosion” phenomenon may occur on the tin plating, rapidly leading to the destruction of the contact, even in the case of low currents compared with the rated current; it may be preferable in this case to use bare, silver-plated or nickel-plated contacts.

Silver is an excellent contact material which ages slowly except in atmospheres with sulphurous fumes.

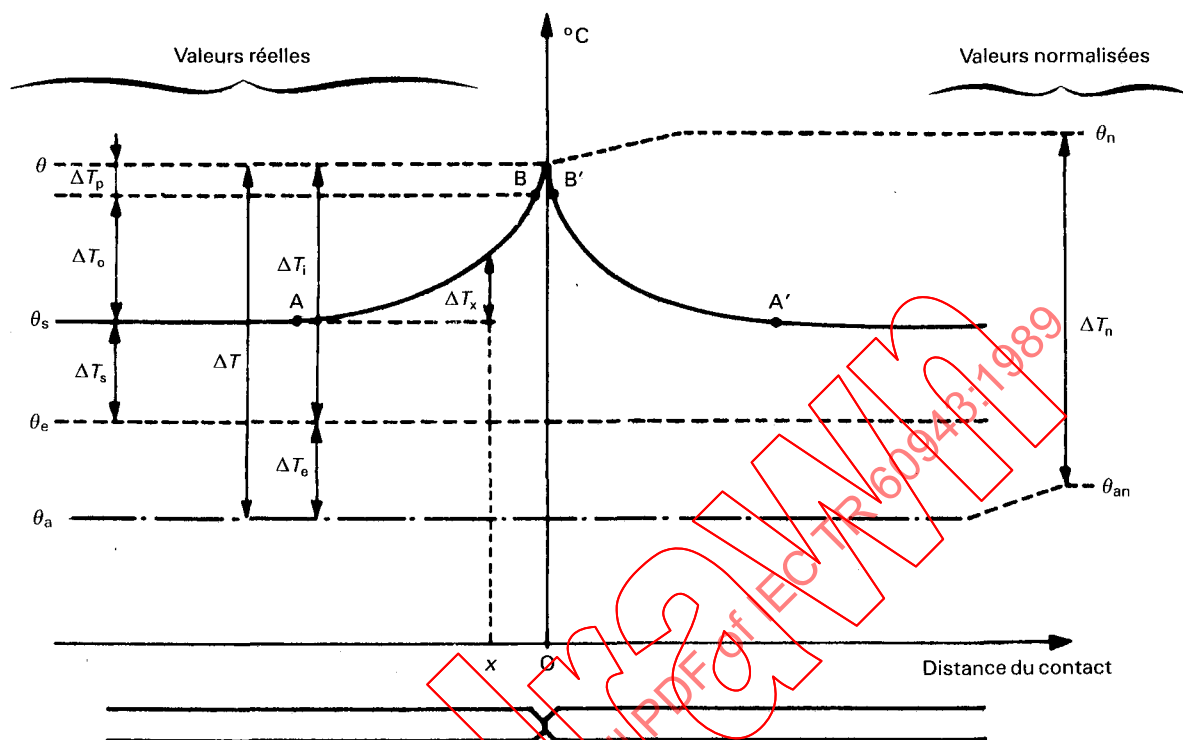
Aluminium cannot be used unless its layer of insulating alumina is removed by brushing with grease or by other special treatment recommended by the manufacturer.

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

4.1 Definitions

Figure 12, page 45, represents, as a theoretical example, the temperature variation along two conductors forming an end-to-end contact.

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



383/88

FIG. 12. — Symboles utilisés pour la définition des températures et des échauffements; exemple choisi: contacts en bout.

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

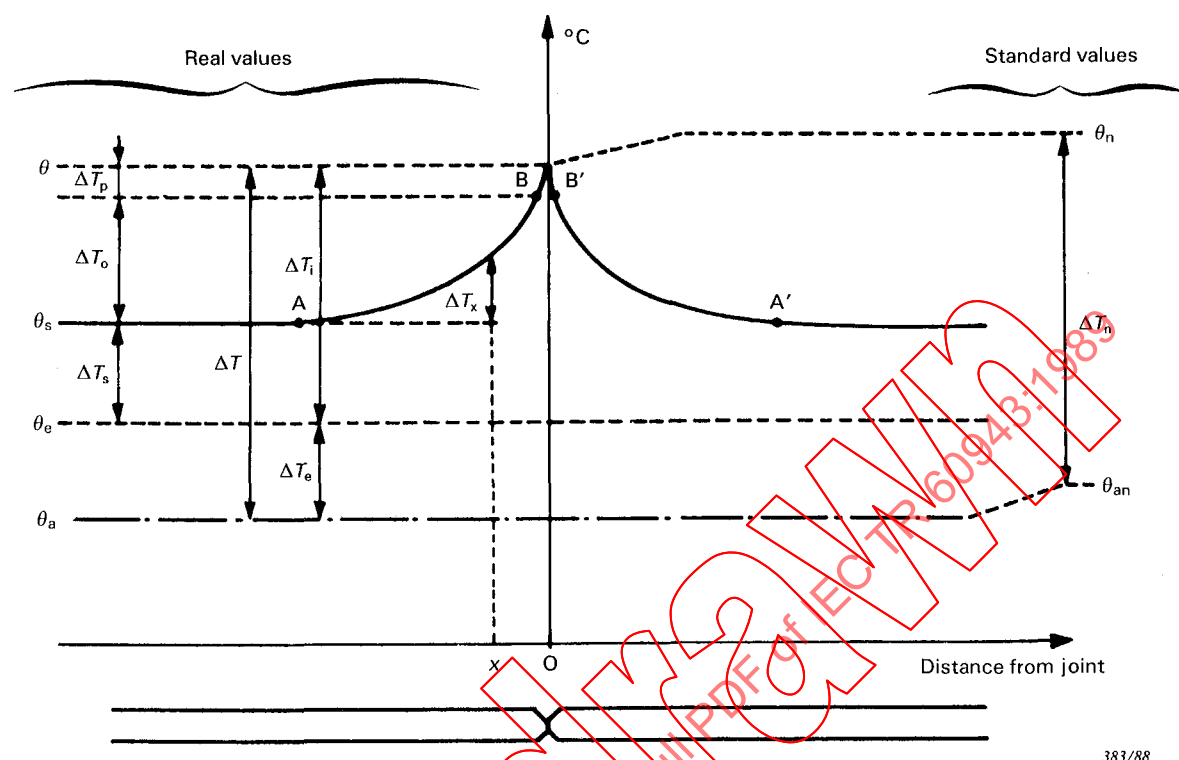


FIG. 12. — Symbols used for the definition of temperatures and temperature rises; example chosen: end-to-end contacts.

La figure 13 représente un cas pratique de fusibles à l'intérieur d'un coffret de branchement.

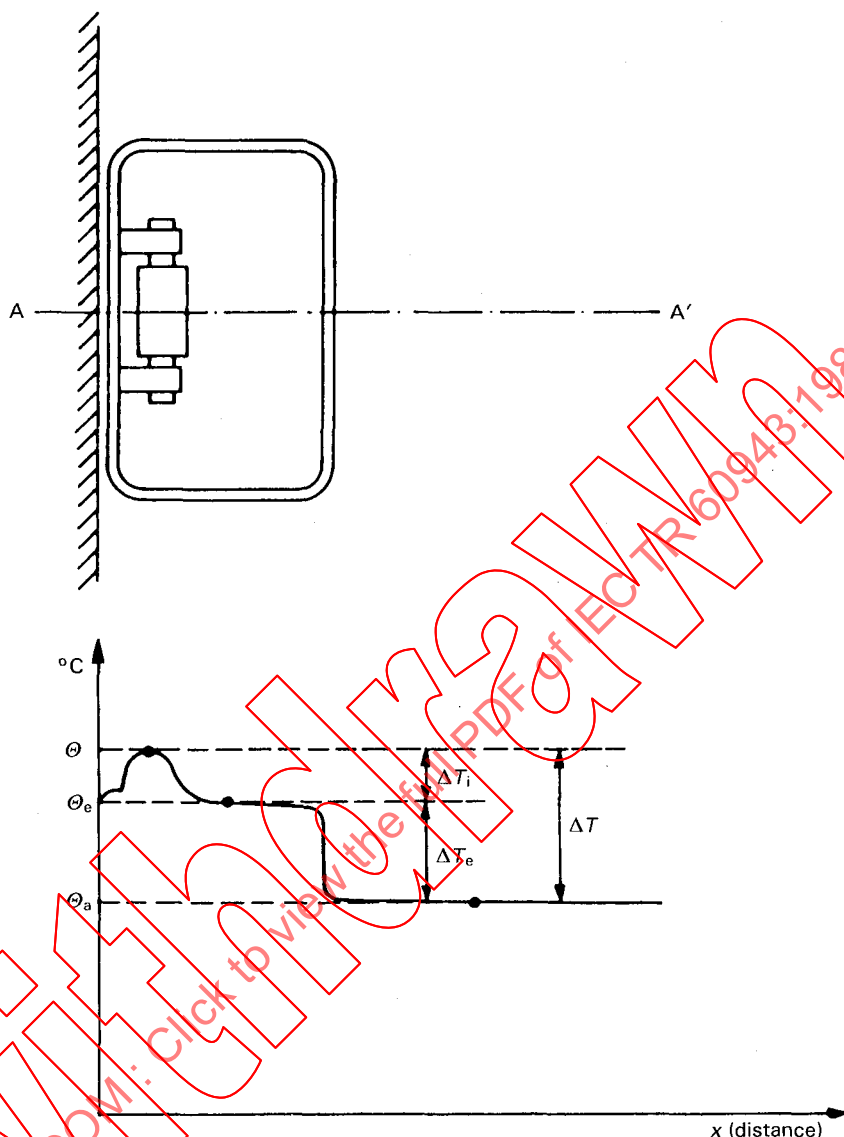


FIG. 13. — Températures et échauffements le long de l'axe AA' dans un coffret comportant un fusible.

Examinons maintenant la définition des principales grandeurs qui contribuent à la température maximale Θ du contact ou de l'organe considéré.

Cette température maximale Θ est la somme des termes suivants:

$$\Theta = \Theta_a + \Delta T_e + \Delta T_s + \Delta T_0 + \Delta T_p$$

où:

Θ_a est la température ambiante externe, dont la définition normalisée est donnée au paragraphe 5.1.1.

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 est disposé à l'intérieur d'une enveloppe, la température de l'air environnant cet organe sera donc $\Theta_e = \Theta_a + \Delta T_e$.

Figure 13 illustrates a practical case of fuses inside a junction box.

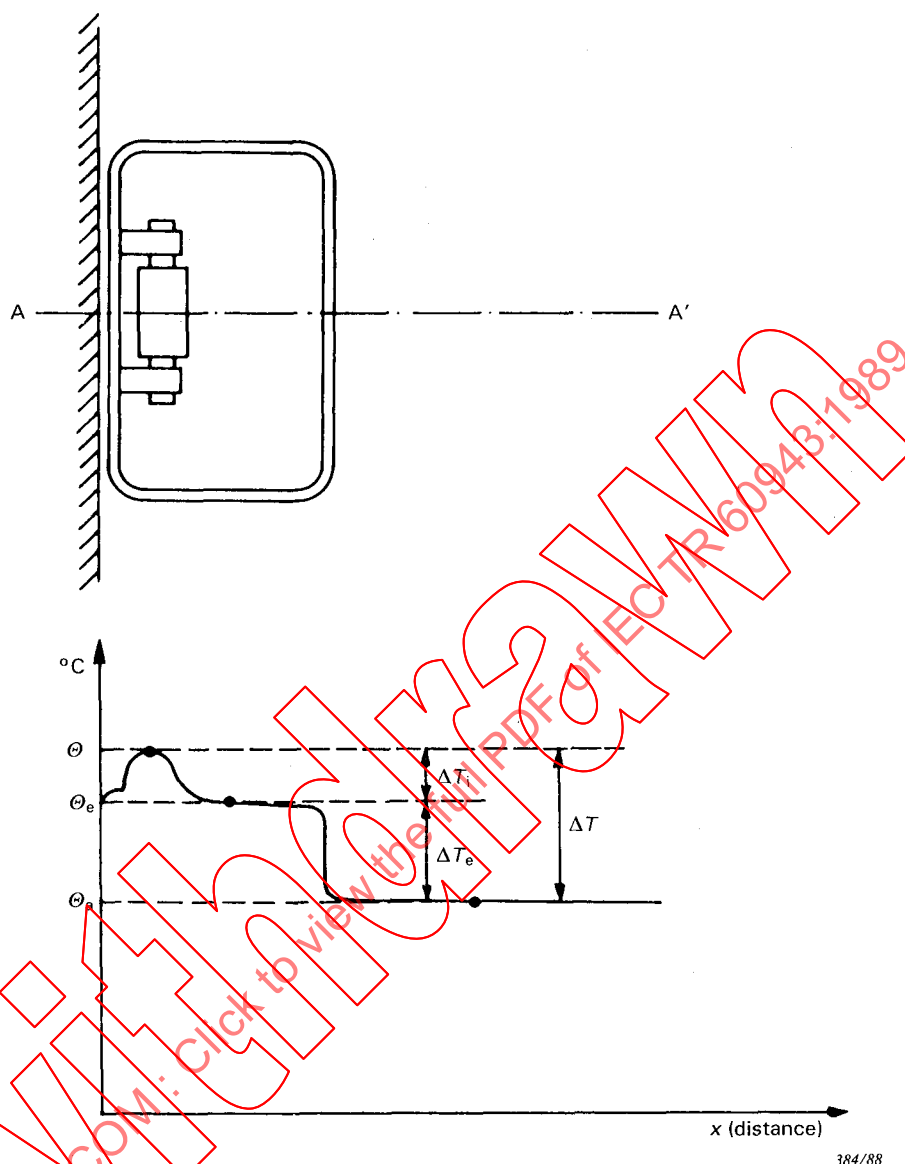


FIG. 13. — Temperature and temperature rise along the axis AA', in a junction box containing a fuse.

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:

$$\Theta = \Theta_a + \Delta T_e + \Delta T_s + \Delta T_0 + \Delta T_p$$

where:

Θ_a is the external ambient temperature, the standard definition of which is given in Sub-clause 5.1.1.

ΔT_e is the temperature rise of the air surrounding the contact or component considered, in relation to the ambient temperature Θ_a ; if the component is inside an enclosure, the temperature of the air surrounding the component will thus be $\Theta_e = \Theta_a + \Delta T_e$.

- ΔT_s 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 12, page 44. 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 par rapport à la température ambiante s'exprime par la relation générale:

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

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

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

où:

$$G_r P_r = \frac{M^2 \beta g C_p D_h^3 \Delta T}{\mu_d \lambda}$$

D'une manière générale, les échauffements calculés à partir de la formule (10) sont sensiblement proportionnels à la puissance 1,67 de l'intensité.

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

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

où:

$$R_e = \frac{M v D_h}{\mu_d} \text{ (nombre de Reynolds)}$$

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 A et B.

- 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 12, page 45. 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 conductor in relation to the ambient temperature is expressed by the general relationship:

$$\Delta T_s = \frac{[(T_e + \Delta T_s - 273.15) \alpha + 1] R_0 I^2 + r \phi_s S_r}{Bl \left[\sigma \varepsilon \frac{(T_e + \Delta T_s)^4 - T_e^4}{\Delta T_s} + \frac{\lambda}{D_h} N_u \right]} \quad (10)$$

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

$$N_u = 0.8 (G_r P_r)^{0.05} + 0.35 (G_r P_r)^{0.27} \quad (11)$$

where:

$$G_r P_r = \frac{M^2 \mu g C_p D_h^3 \Delta T}{\mu_d \lambda}$$

In general, the temperature rises calculated from equation (10) are roughly proportional to the power 1.67 of the current intensity.

With radiation and forced convection, which is the case with outdoor type contacts and terminals such as line or sub-station connections, we must use:

$$N_u = 0.65 R_e^{0.2} + 0.23 R_e^{0.61} \quad (12)$$

where:

$$R_e = \frac{M v D_h}{\mu_d} \text{ (Reynolds number)}$$

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 Appendices A and B.

Notes 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 (à la pesanteur g près) et peut s'exprimer, pour l'air atmosphérique, par la formule approchée:

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

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

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

4.3 Echauffement ΔT_0 au voisinage du contact: échauffement des bornes de raccordement

4.3.1 Hypothèses

Dans la suite du texte, on appellera «borne» la frontière entre le conducteur électrique et l'appareil qu'il alimente (voir figure 14), sans faire de supposition sur la structure de celle-ci.

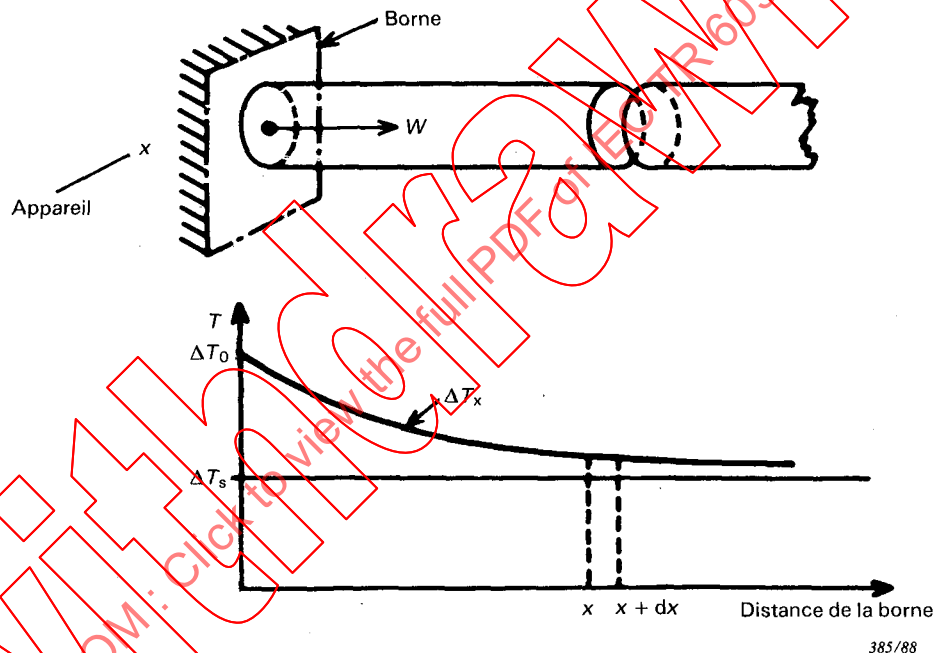


FIG. 14. — Echauffement $\Delta T_x = f(x)$.

Pour la simplicité des calculs, on supposera que le flux thermique évacué à la surface du conducteur varie linéairement avec l'échauffement de ce conducteur par rapport au milieu ambiant environnant; cela n'est vrai en toute rigueur que si les échanges de chaleur s'effectuent par rayonnement et convection forcée, l'échange par rayonnement étant alors négligeable par rapport à l'échange par convection forcée. Cette approximation est justifiée:

- d'une part, par la simplicité des relations auxquelles on aboutit,
- d'autre part, par la précision suffisante des résultats obtenus pour les valeurs de ΔT_x et ΔT_0 .

Les équations correspondant au refroidissement par rayonnement et convection naturelle sont cependant données dans l'annexe G.

Notes 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 formula:

$$3.912 \times 10^{19} (273.15 + \Theta_e)^{-4.69}$$

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_0 in the vicinity of the contact: temperature rise of connection terminals

4.3.1 Hypotheses

In the following text the term “terminal” will be used to refer to the frontier between the electrical conductor and the equipment which it supplies (see Figure 14), without any assumption as to the structure of the terminal.

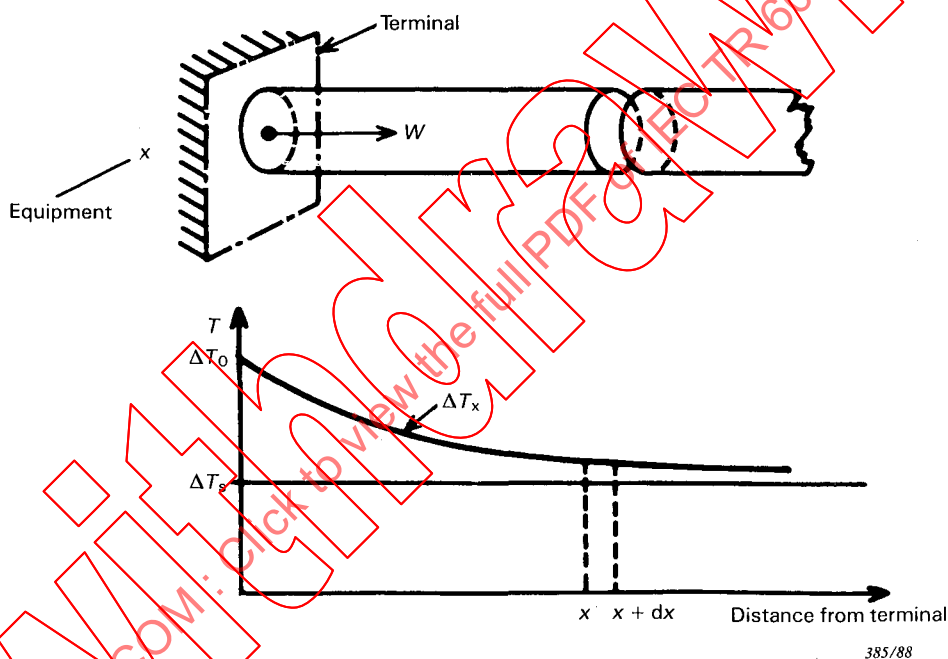


FIG. 14. — Temperature rise $\Delta T_x = f(x)$.

In order to simplify the calculation, the thermal flux dissipated at the conductor surface will be assumed to vary linearly with the temperature rise of this conductor in relation to the surrounding atmosphere. This is only strictly true if the exchange of heat occurs through radiation and forced convection, the radiation exchange then being negligible compared with the forced convection exchange. This approximation is justified:

- on the one hand, by the simplicity of the equations to which it leads,
- on the other hand, by the acceptable accuracy of the results obtained for the values of ΔT_x and ΔT_0 .

The equations relating to cooling by radiation and natural convection are, however, given in Appendix G.

4.3.2 Equation fondamentale

Le conducteur évacue ses propres pertes Joule (en présentant un échauffement ΔT_s évalué au paragraphe 4.2), plus une certaine quantité de chaleur W en provenance de l'appareil d'utilisation. Cette quantité de chaleur s'évacue le long du conducteur dont l'échauffement total $\Delta T_s + \Delta T_x$ décroît à mesure que l'on s'éloigne de la borne.

Note. — Il est possible d'envisager le cas où l'appareil refroidirait le conducteur. Dans ce cas, la température de la borne serait inférieure à celle du câble, d'où, en général, une absence de contrainte thermique sur la borne, puisque les échauffements admissibles sur les câbles sont relativement faibles (voir paragraphe 5.4.2, exemple 3.)

D'une manière générale, le flux thermique qui peut s'évacuer à la surface du conducteur peut être exprimé sous la forme de:

$$\varphi = \gamma \Delta T_s^\delta \text{ (en prenant } \delta = 1 \text{)}$$

où φ représente la densité de flux thermique à la surface du conducteur:

Donc, de l'équation (10) on a:

$$\varphi = \gamma \frac{[(T_e + \Delta T_s - 273,15) \alpha + 1] R_0 I^2 + r S_r \varphi_s}{B l \left[\sigma \varepsilon \frac{(T_e + \Delta T_s)^4 - T_e^4}{\Delta T_s} + \frac{\lambda}{D_h} N_u \right]} \quad (13)$$

T_e étant exprimé en kelvins, et

ΔT_s étant l'échauffement du conducteur par rapport au fluide environnant, calculé à partir de la formule (10).

Soit ΔT_x l'échauffement du câble à la distance x par rapport à la température du fluide environnant T_e .

Soit dP_1 la puissance thermique évacuée de la surface de la section de conducteur comprise entre x et $x + dx$, dont le périmètre est B .

On obtient:

$$dP_1 = B \cdot dx \cdot \gamma (\Delta T_x + \Delta T_s)$$

Cette puissance thermique est égale à:

$$dP_1 = dP_2 + dP_3$$

où:

dP_2 est la différence des puissances thermiques entrant dans la section d'abscisse x et sortant à la section d'abscisse $x + dx$:

$$dP_2 = \lambda_c S \frac{d^2(\Delta T_x)}{dx^2} dx$$

λ_c étant la conductivité thermique ($W m^{-1} K^{-1}$) du conducteur de section S

dP_3 est la puissance thermique produite par effet Joule sur la longueur dx de conducteur:

$$dP_3 = \frac{\rho I^2}{S} dx = \gamma B \Delta T_s dx$$

On obtient alors l'équation différentielle:

$$\lambda_c S \frac{d^2(\Delta T_x)}{dx^2} - \gamma B \Delta T_x = 0 \quad (14)$$

4.3.2 Basic equation

The conductor dissipates its own joule losses (presenting a temperature rise ΔT_s evaluated in Sub-clause 4.2), plus a certain quantity of heat W from the user equipment. This quantity of heat is dissipated along the conductor, the total temperature rise $\Delta T_s + \Delta T_x$ of which decreases as the distance from the terminal increases.

Note. — It is possible to envisage cases where the equipment cools the conductors. In this case, the temperature of the terminal would be lower than that of the cable, leading in general to an absence of thermal stress on the terminal, since the permissible temperature rises on cables are relatively small (see Sub-clause 5.4.2, Example 3).

In general, the thermal flux which can be dissipated on the conductor surface can be expressed as:

$$\varphi = \gamma \Delta T_s^\delta \text{ (taking } \delta = 1 \text{)}$$

φ represents the density of heat flow rate at the conductor surface:

Then from equation (10) we have:

$$\varphi = \gamma \frac{[(T_e + \Delta T_s - 273.15) \alpha + 1] R_0 I^2 + r S_r \varphi_s}{Bl \left[\sigma \varepsilon \frac{(T_e + \Delta T_s)^4 - T_e^4}{\Delta T_s} + \frac{\lambda}{D_h} N_{gr} \right]} \quad (13)$$

T_e being expressed in kelvins, and

ΔT_s being the temperature rise of the conductor in relation to the surrounding fluid and being calculated from equation (10).

Let ΔT_x be the temperature rise of the cable at distance x in relation to the temperature of the surrounding fluid T_e .

Let dP_1 be the heat flow rate dissipated from the surface of the section of conductor between x and $x + dx$, whose perimeter is B .

We obtain:

$$dP_1 = B \cdot dx \cdot \gamma (\Delta T_x + \Delta T_s)$$

This heat flow rate is equal to:

$$dP_1 = dP_2 + dP_3$$

where:

dP_2 is the difference between the heat flow rates entering the sections of abscissa x and leaving the section of abscissa $x + dx$:

$$dP_2 = \lambda_c S \frac{d^2(\Delta T_x)}{dx^2} dx$$

λ_c being the thermal conductivity ($\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$) of the conductor of cross-sectional area S

dP_3 is the heat flow rate produced by joule effect on the length dx of conductor:

$$dP_3 = \frac{\rho I^2}{S} dx = \gamma B \Delta T_s dx$$

We then obtain the differential equation:

$$\lambda_c S \frac{d^2(\Delta T_x)}{dx^2} - \gamma B \Delta T_s = 0 \quad (14)$$

qui peut prendre la forme:

$$\frac{d^2(\Delta T_x)}{dx^2} - \eta^2 \Delta T_x = 0 \quad \text{avec } \eta = \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}}$$

dont la solution générale est:

$$\Delta T_x = C_1 \operatorname{sh} \eta x + C_2 \operatorname{ch} \eta x$$

4.3.3 Solutions

Deux hypothèses seront étudiées ci-dessous pour la résolution de cette équation:

- a) le câble de raccordement a une longueur l limitée et relie deux bornes identiques;
- b) le câble de raccordement est de grande longueur ($l \rightarrow \infty$).

Ces deux cas sont envisagés à la figure 15.

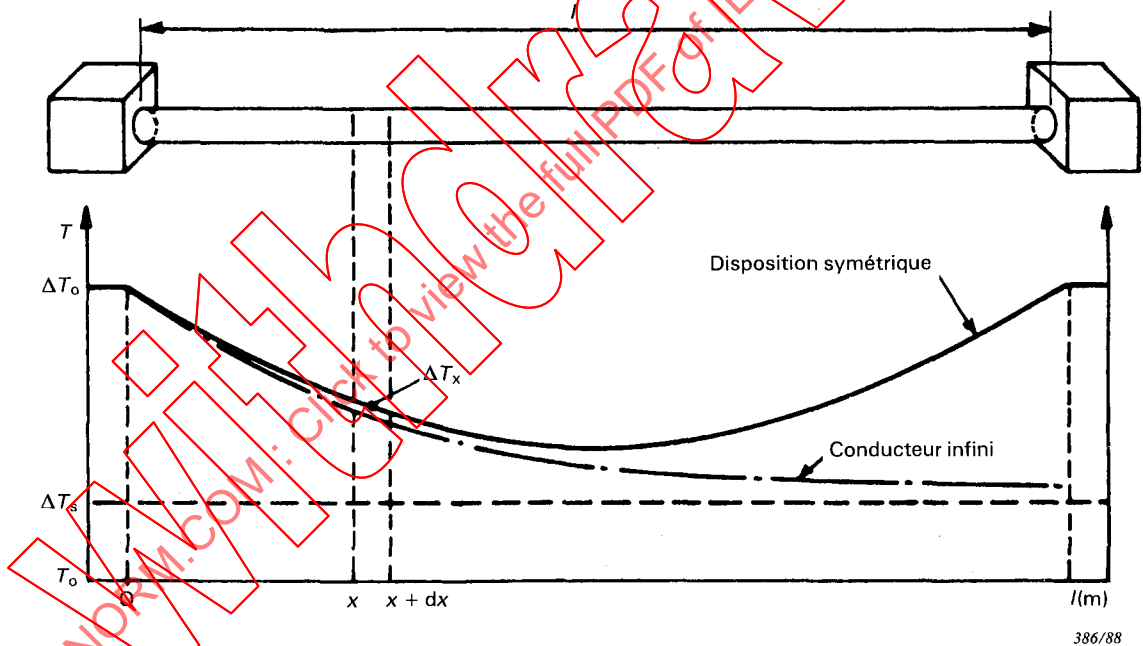


FIG. 15. — Câble de raccordement entre deux bornes: répartition des échauffements pour un conducteur fini et pour un conducteur de grande longueur (conducteur «infini»).

Les calculs seront effectués à partir de l'hypothèse du point a), l'évaluation correspondant à l'hypothèse du point b) étant obtenue en faisant tendre l vers l'infini dans les formules obtenues.

which can take the form:

$$\frac{d^2(\Delta T_x)}{dx^2} - \eta^2 \Delta T_x = 0 \quad \text{with } \eta = \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}}$$

of which the general solution is:

$$\Delta T_x = C_1 \operatorname{sh} \eta x + C_2 \operatorname{ch} \eta x$$

4.3.3 Solutions

Two hypotheses will be studied below for solving this equation:

- connection cable of limited length l connected to two identical terminals;
- connection cable of great length ($l \rightarrow \infty$).

These two cases are considered in Figure 15.

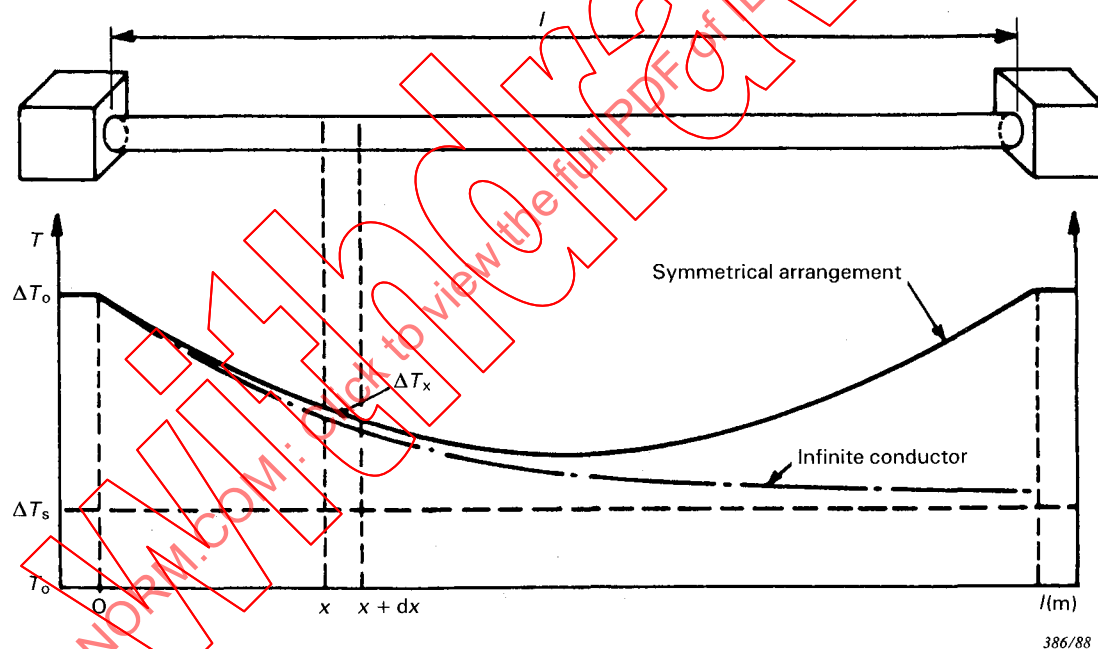


FIG. 15. — Connection cable between two terminals: distribution of temperature rise for a finite conductor and for a conductor of great length ("infinite" conductor).

The calculations will be made from hypothesis a), the evaluation corresponding to hypothesis b) being obtained by taking $l \rightarrow \infty$ in the resulting equations.

4.3.3.1 Variation de l'échauffement le long du câble

Si les deux bornes sont identiques, on peut écrire:

$$\Delta T_{(x=0)} = \Delta T_{(x=l)} = C_2 = \Delta T_0$$

où: $C_2 = \Delta T_0$

Le coefficient C_1 peut être déterminé en supposant que la courbe est symétrique par rapport au centre:

$$\left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x=\frac{l}{2}} = 0$$

d'où:
$$\frac{d(\Delta T_x)}{dx} = \eta C_1 \operatorname{ch} \eta \frac{l}{2} + \eta C_2 \operatorname{sh} \eta \frac{l}{2} = 0$$

et
$$C_1 = -C_2 \frac{\operatorname{sh} \eta \frac{l}{2}}{\operatorname{ch} \eta \frac{l}{2}} = -C_2 \operatorname{th} \eta \frac{l}{2} = -\Delta T_0 \operatorname{th} \eta \frac{l}{2}$$

d'où finalement:
$$\Delta T_x = \Delta T_0 \frac{\operatorname{ch} \eta \left(\frac{l}{2} - x \right)}{\operatorname{ch} \eta \frac{l}{2}} \quad (15a)$$

avec:
$$\eta = \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}} \quad \text{et} \quad \Delta T_s = \frac{\rho I^2}{S \gamma B}$$

Si $l \rightarrow \infty$, $\operatorname{th} \eta \frac{l}{2} \rightarrow 1$ et nous obtenons pour un conducteur infiniment long:

$$\Delta T_x = \Delta T_0 e^{-x \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}}} \quad (15b)$$

La distance à laquelle l'échauffement est divisé par e, c'est-à-dire la constante spatiale Δx s'exprime alors par:

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\lambda_c S}{\gamma B}} \quad (15c)$$

4.3.3.2 Puissance thermique évacuée de la borne vers le câble

La puissance thermique évacuée de la borne dans le câble (W) peut être calculée par:

$$W = \lambda_c S \left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0}$$

4.3.3.1 Variation in temperature rise along the cable

If the two terminals are identical, it follows that:

$$\Delta T_{(x=0)} = \Delta T_{(x=l)} = C_2 = \Delta T_0$$

where: $C_2 = \Delta T_0$

Coefficient C_1 can be determined assuming the curve to be symmetrical about the centre:

$$\left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x=\frac{l}{2}} = 0$$

hence:

$$\frac{d(\Delta T_x)}{dx} = \eta C_1 \operatorname{ch} \eta \frac{l}{2} + \eta C_2 \operatorname{sh} \eta \frac{l}{2} = 0$$

and

$$C_1 = -C_2 \frac{\operatorname{sh} \eta \frac{l}{2}}{\operatorname{ch} \eta \frac{l}{2}} = -C_2 \operatorname{th} \eta \frac{l}{2} = -\Delta T_0 \operatorname{th} \eta \frac{l}{2}$$

giving finally:

$$\Delta T_x = \Delta T_0 \frac{\operatorname{ch} \eta \left(\frac{l}{2} - x \right)}{\operatorname{ch} \eta \frac{l}{2}} \quad (15a)$$

with:

$$\eta = \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}} \quad \text{and} \quad \Delta T_s = \frac{\rho I^2}{S \gamma B}$$

If $l \rightarrow \infty$, $\operatorname{th} \eta \frac{l}{2} \rightarrow 1$ we obtain for a conductor of infinite length:

$$\Delta T_x = \Delta T_0 e^{-x \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}}} \quad (15b)$$

The distance at which the temperature rise is divided by e, i.e., the spatial constant Δx is then given by:

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\lambda_c S}{\gamma B}} \quad (15c)$$

4.3.3.2 Rate of flow of heat dissipated from the terminal to the cable

The rate of flow (W) of heat released from the terminal into the cable can be calculated by:

$$W = \lambda_c S \left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0}$$

Pour deux bornes symétriques, on obtient:

$$W = -\Delta T_0 \sqrt{\gamma B \lambda_c S} \left(\operatorname{th} \frac{l}{2} \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}} \right) \quad (16a)$$

Si $l \rightarrow \infty$, on obtient:

$$W = -\Delta T_0 \sqrt{\gamma B \lambda_c S} \quad (16b)$$

Ces deux dernières formules simplifient le calcul de ΔT_0 si W est connu; en particulier:

$$\Delta T_0 = \frac{-W}{\sqrt{\gamma B \lambda_c S}} \quad (16c)$$

4.3.3.3 Gradient de température à la borne

Le gradient de température à la borne G en K/m se calcule par:

$$G = \left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0}$$

Pour deux bornes symétriques, on obtient:

$$G = -\Delta T_0 \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}} \operatorname{th} \left(\frac{l}{2} \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}} \right) \quad (17a)$$

Pour un conducteur infini, l'équation devient:

$$G = -\Delta T_0 \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}} \quad (17b)$$

4.3.3.4 Longueur minimale de conducteur Δl , nécessaire pour obtenir une chute de température ΔT_1 donnée par rapport à la borne

A partir des équations (15a) et (15b), on obtient:

Pour deux bornes symétriques:

$$\Delta l = \frac{l}{2} - \sqrt{\frac{\lambda_c S}{\gamma B}} \arg \operatorname{ch} \left[\left(1 - \frac{\Delta T_1}{\Delta T_0} \right) \operatorname{ch} \frac{l}{2} \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}} \right]^* \quad (18a)$$

Pour un conducteur infini:

$$\Delta l = \sqrt{\frac{\lambda_c S}{\gamma B}} \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{\Delta T_1}{\Delta T_0}} \right] \quad (18b)$$

*Arg ch $x = \ln(x + \sqrt{x^2 - 1})$.

For two symmetrical terminals, we obtain:

$$W = -\Delta T_0 \sqrt{\gamma B \lambda_c S} \left(\text{th} \frac{l}{2} \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}} \right) \quad (16a)$$

If $l \rightarrow \infty$

$$W = -\Delta T_0 \sqrt{\gamma B \lambda_c S} \quad (16b)$$

These last two equations facilitate the calculation of ΔT_0 if W is known; in particular:

$$\Delta T_0 = \frac{-W}{\sqrt{\gamma B \lambda_c S}} \quad (16c)$$

4.3.3.3 Temperature gradient at the terminal

The temperature gradient at terminal G in K/m is calculated by:

$$G = \left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x=0}$$

For two symmetrical terminals, we obtain:

$$G = -\Delta T_0 \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}} \text{th} \left(\frac{l}{2} \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}} \right) \quad (17a)$$

For an infinite conductor, this becomes:

$$G = -\Delta T_0 \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}} \quad (17b)$$

4.3.3.4 Minimum length of conductor Δl necessary to obtain a given temperature drop ΔT_l in relation to the terminal

From equations (15a) and (15b), are obtained:

For two symmetrical terminals:

$$\Delta l = \frac{l}{2} - \sqrt{\frac{\lambda_c S}{\gamma B}} \arg \text{ch} \left[\left(1 - \frac{\Delta T_l}{\Delta T_0} \right) \text{ch} \frac{l}{2} \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}} \right]^* \quad (18a)$$

For an infinite conductor:

$$\Delta l = \sqrt{\frac{\lambda_c S}{\gamma B}} \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{\Delta T_l}{\Delta T_0}} \right] \quad (18b)$$

*Arc ch $x = \ln(x + \sqrt{x^2 - 1})$.

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:

$$\Delta T_p = \frac{I^2}{2 \pi^2 n^2 \lambda_c} \left(\frac{\rho}{4 a^2} + \frac{\sigma_o}{a^3} \right) \quad (19)$$

avec:

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

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

$$n_k \approx 2,5 \times 10^{-5} \text{ (S I)}$$

4.5 Exemple numérique

Soit un contact formé par la jonction en bout de deux barres conductrices en cuivre, de section carrée $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} = 10^{-4} \text{ m}^2$, appuyées l'une contre l'autre par une force de 100 N avec une longueur de conducteur (l) de 1 m; $n = 18$; $a = 0,084 \text{ mm}$.

- Au paragraphe 2.1.2, il est indiqué que le nombre (n) de contacts élémentaires est 18, de rayon $a = 0,084 \text{ mm}$ dans ces conditions. Puisque $\rho = 1,8 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$ et $\sigma_o = 5 \times 10^{-12} \Omega \text{ m}^2$, en substituant ces valeurs dans l'équation (7), on obtient la résistance de contact: $R_c = 18 \mu\Omega$.
- Ce conducteur en cuivre de 100 mm^2 est parcouru par un courant de 300 A; quel est son échauffement en charge permanente:
 - en convection naturelle?
 - en convection forcée avec vitesse de l'air variable?

On suppose qu'il n'y a pas d'apport solaire.

Le milieu ambiant est l'air atmosphérique à 20°C .

Les constantes de l'air à 20°C sont données dans l'annexe B.

On a:

$$M = 1,205 \text{ kg/m}^3$$

$$\beta = 3,4 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$C_p = 1006,3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$\mu_d = 1,822 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\lambda = 0,02585 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

En utilisant les formules (10), (11), (12) et en prenant:

$$\alpha = 4,265 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$l = 1 \text{ m}$$

$$\varrho_o = 1,5881 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$$

$$R_o = \varrho_o \frac{l}{S} = 1,5881 \times 10^{-8} \frac{1}{10^{-4}} = 1,5881 \times 10^{-4} \Omega$$

$$\varphi_s = 0 \text{ (pas d'apport solaire)}$$

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:

$$\Delta T_p = \frac{I^2}{2 \pi^2 n^2 \lambda_c} \left(\frac{\rho}{4 a^2} + \frac{\sigma_o}{a^3} \right) \quad (19)$$

with:

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

$$n = n_k H^{0.625} F^{0.2}$$

$$n_k = 2.5 \times 10^{-5} \text{ (S I)}$$

4.5 Numerical example

Consider a contact formed by the end-to-end meeting of two copper conductive bars, of square section $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} = 10^{-4} \text{ m}^2$, pressed against each other with a force of 100 N with a conductor length (l) of 1 m; $n = 18$; $a = 0.084 \text{ mm}$.

a) In Sub-clause 2.1.2 it is shown that the number (n) of elementary contacts is 18, of radius $a = 0.084 \text{ mm}$ under these conditions. Since $\rho = 1.8 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$ and $\sigma_o = 5 \times 10^{-12} \Omega \text{m}^2$, substituting these values in equation (7) we get the contact resistance: $R_c = 18 \mu\Omega$.

b) This 100 mm^2 copper conductor carries a current of 300 A; what is its temperature rise under continuous load

- with natural convection?
- with forced convection and variable air speed?

We shall assume that there is no solar radiation.

The ambient medium is atmospheric air at 20°C .

The air constants at 20°C are given in Appendix B.

We have:

$$M = 1.205 \text{ kg/m}^3$$

$$\beta = 3.4 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$C_p = 1006.3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$\mu_d = 1.822 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\lambda = 0.02585 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Using equations (10), (11) and (12), and taking:

$$\alpha = 4.265 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$l = 1 \text{ m}$$

$$\rho_o = 1.5881 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$$

$$R_0 = \rho_o \frac{l}{S} = 1.5881 \times 10^{-8} \frac{1}{10^{-4}} = 1.5881 \times 10^{-4} \Omega$$

$$\varphi_s = 0 \text{ (no solar radiation)}$$

On obtient le tableau suivant:

TABLEAU IV
Echauffement en kelvins en fonction de v (m/s) et de ε

Degré d'oxydation superficielle	v (m/s)	0	0,15	0,3	1	1,5	2	4
Poli	0	38,5	31,0	21,2	10,8	8,6	7,3	4,9
	0,05	37,4	30,2	20,8	10,7			
	0,1	36,5	29,5	20,5	10,6			
Oxydé	0,5	30,2	29,6	18,1	10,0			
Très oxydé	0,9	25,8	21,3	16,2	9,4			
	1	24,9	20,6	15,8	9,3	7,6	6,6	4,6

Notes 1. — La précision est de l'ordre de 1 K; les décimales ne sont destinées qu'à donner une idée de la variation de température obtenue en fonction des variations d'émissivité ou de vitesse de l'air ambiant.

2. — $v = 0$ m/s correspond au cas du refroidissement par convection naturelle.

Ces résultats peuvent être traduits sous forme graphique en fonction de l'émissivité de la surface du conducteur et de la vitesse de l'air ambiant (voir figure 16).

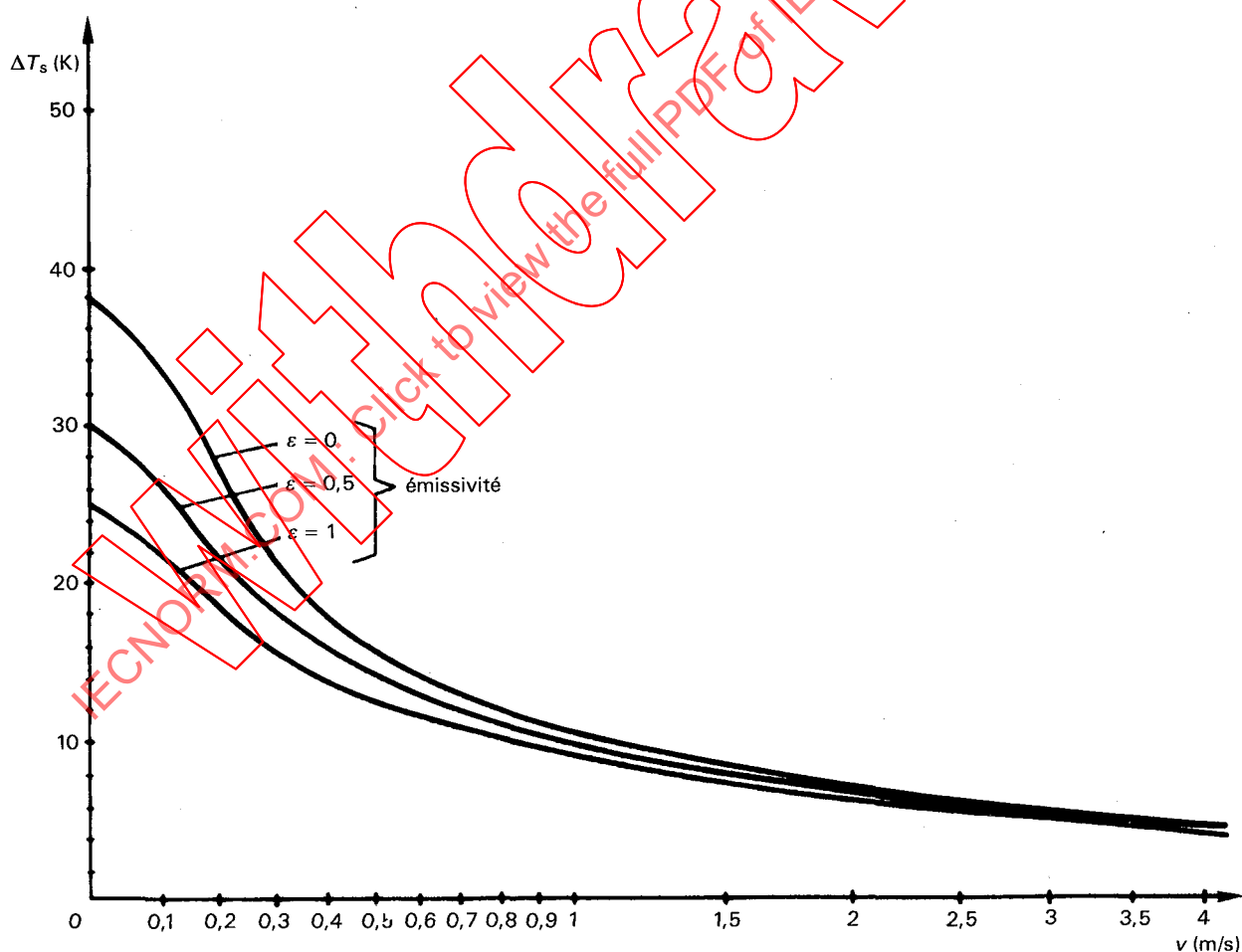


FIG. 16. — Echauffement du conducteur en fonction de la vitesse de circulation de l'air ambiant (v); $v = 0$ correspond à la convection naturelle.

We obtain the following table:

TABLE IV
Temperature rise in kelvins as a function of v (m/s) and of ε

Degree of surface oxidation	v (m/s)	0	0.15	0.3	1	1.5	2	4
Bright	0	38.5	31.0	21.2	10.8	8.6	7.3	4.9
	0.05	37.4	30.2	20.8	10.7			
	0.1	36.5	29.5	20.5	10.6			
Oxidized	0.5	30.2	29.6	18.1	10.0			
Very oxidized	0.9	25.8	21.3	16.2	9.4			
	1	24.9	20.6	15.8	9.3	7.6	6.6	4.6

Notes 1. — The accuracy is to within about 1 K; the decimal figures are only intended to give an idea of the temperature change obtained as a function of the variation in emissivity or in ambient air speed.

2. — $v = 0$ m/s corresponds to the case of cooling by natural convection.

These results may be presented in graphical form as a function of the surface emissivity of the conductor and of the ambient air speed (see Figure 16).

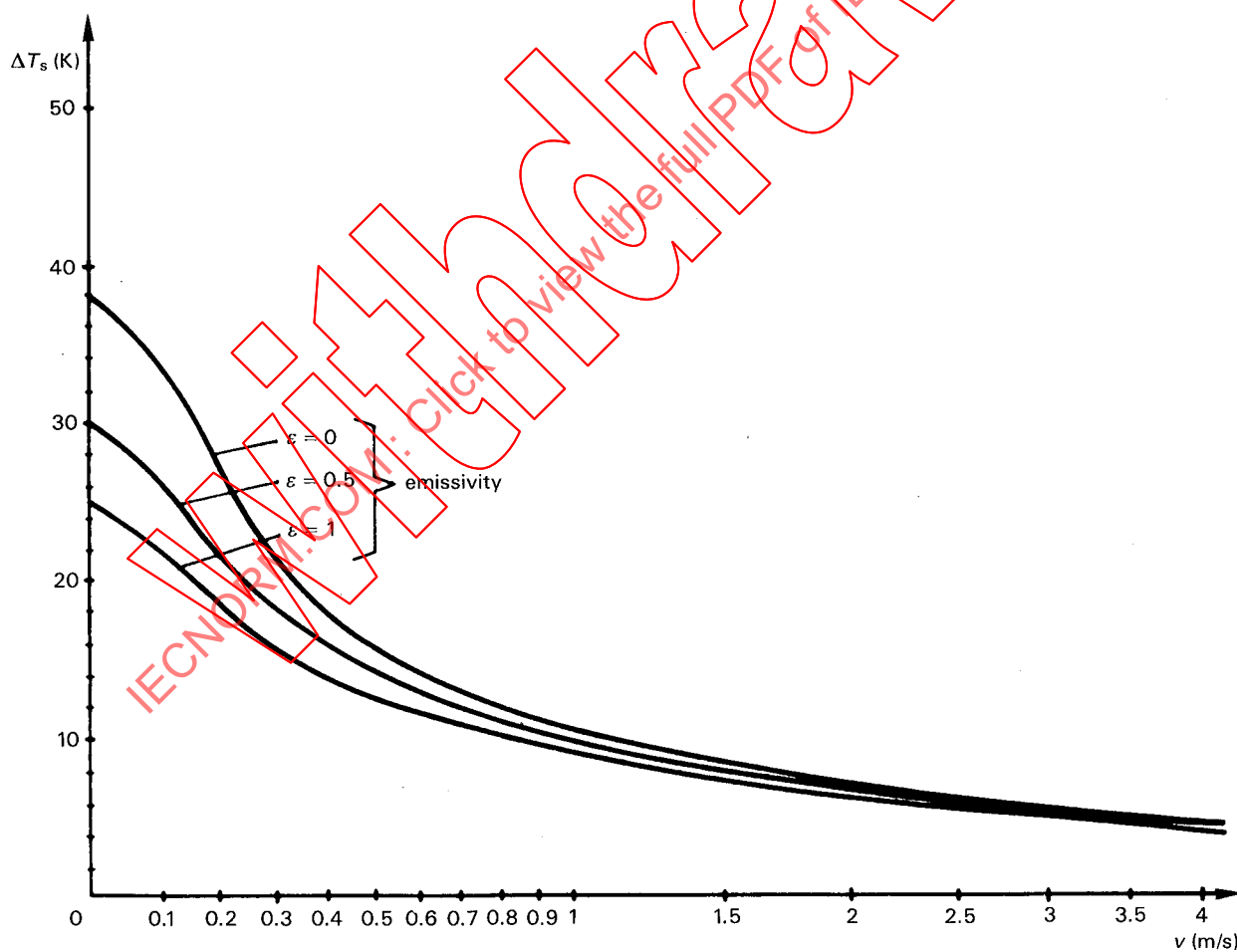


FIG. 16. — Temperature rise of the conductor as a function of the ambient air circulation speed (v); $v = 0$ corresponds to natural convection.

- c) En prenant $\varepsilon = 0,1$ et $v = 0$ m/s (convection naturelle), on cherche les échauffements au voisinage du contact (ΔT_x).

On utilise alors les relations (G1) à (G3) données dans l'annexe G.

Pour déterminer les termes γ et δ de l'équation $\varphi = \gamma \Delta T^\delta$, on calcule deux couples de valeurs ($\varphi, \Delta T$) pour deux intensités différentes.

Par exemple:

pour 300 A, on a: $\Delta T = 36,45$ K et $\varphi = 443,4$ W/m²

pour 200 A, on a: $\Delta T = 17,55$ K et $\varphi = 184,3$ W/m²

D'où $\gamma = 5,9014$ et $\delta = 1,20115$; on voit que δ est proche de 1,2, qui correspond au cas général de la convection naturelle.

Evaluons maintenant W , puissance thermique évacuée du contact vers le conducteur. Soit R_c la résistance de contact. La structure du contact étant symétrique, la puissance thermique $R_c I^2$ produite par le contact s'évacue symétriquement dans le conducteur.

D'où:
$$W = \frac{1}{2} R_c I^2 = \frac{1}{2} \times 18 \times 10^{-6} \times 300^2 = 0,81 \text{ W}$$

Avec $\lambda_c = 387$ W/m K, on obtient ΔT_x en fonction de x , d'après la formule (G2) donnée dans l'annexe G, ainsi que la constante spatiale $\Delta x = 0,361$ m (distance à laquelle ΔT_x ($x=0$) est divisé par e): d'où le tableau A.

TABLEAU A

Echauffement en fonction de la distance du point de contact (convection naturelle)

x (m)	ΔT_x (K)
0	7,34
0,01	7,14
0,05	6,39
0,1	5,56
0,2	4,22
0,361*	2,70
0,5	1,84
1	0,46

* $x = 0,361$ m = Δx = constante spatiale.

La courbe correspondante est représentée à la figure 17. Elle est pratiquement linéaire lorsqu'elle est tracée sur du papier semilogarithmique.

- d) En prenant maintenant $\varepsilon = 0,1$ et $v = 0,3$ m/s (convection forcée), on obtient les résultats suivants, toutes choses étant égales par ailleurs:

Pour

300 A:	$\Delta T = 20,48$ K,	$\varphi = 419$ W/m ²
200 A:	$\Delta T = 8,73$ K,	$\varphi = 178,3$ W/m ²
100 A:	$\Delta T = 2,13$ K,	$\varphi = 43,45$ W/m ²

On obtient: $\gamma = 20,33$ $\delta = 1,0021 \approx 1$, cas général de la convection forcée, d'où le tableau B.

- c) Taking $\varepsilon = 0.1$ and $v = 0$ m/s (natural convection), we shall now seek the temperature rise in the vicinity of the contact (ΔT_x).

Equations (G1) to (G3) given in Appendix G are used.

To determine the terms γ and δ from the equation $\varphi = \gamma \Delta T^\delta$, we shall calculate two pairs of values ($\varphi, \Delta T$) for two different currents.

For example:

for 300 A, we have: $\Delta T = 36.45$ K and $\varphi = 443.4$ W/m²

for 200 A, we have: $\Delta T = 17.55$ K and $\varphi = 184.3$ W/m²

Hence $\gamma = 5.9014$ and $\delta = 1.20115$; we see that δ is close to 1.2 which is generally the case for natural convection.

Let us now evaluate W , the heat flow rate dissipated from the contact to the conductor. Let R_c be the contact resistance. Since the contact structure is symmetrical, the thermal power $R_c I^2$ produced by the contact is dissipated symmetrically into the conductor.

Hence:
$$W = \frac{1}{2} R_c I^2 = \frac{1}{2} \times 18 \times 10^{-6} \times 300^2 = 0.81 \text{ W.}$$

With $\lambda_c = 387$ W/m K, we get ΔT_x as a function of x according to formula (G2) given in Appendix G and the spatial constant $\Delta x = 0.361$ m (distance at which ΔT_x ($x=0$) is divided by e): hence Table A.

TABLE A

Temperature rise as a function of distance from the point of contact (natural convection)

x (m)	ΔT_x (K)
0	7.34
0.01	7.14
0.05	6.39
0.1	5.56
0.2	4.22
0.361*	2.70
0.5	1.84
1	0.46

* $x = 0.361$ m = Δx = spatial constant.

The corresponding curve is shown in Figure 17. It is approximately linear when plotted on log/linear graph paper.

- d) If we now take $\varepsilon = 0.1$ and $v = 0.3$ m/s (forced convection), we obtain the following results, all other things being equal:

For

300 A:	$\Delta T = 20.48$ K,	$\varphi = 419$ W/m ²
200 A:	$\Delta T = 8.73$ K,	$\varphi = 178.3$ W/m ²
100 A:	$\Delta T = 2.13$ K,	$\varphi = 43.45$ W/m ²

We obtain $\gamma = 20.33$ $\delta = 1.0021 \approx 1$, which is generally the case with forced convection, hence Table B.

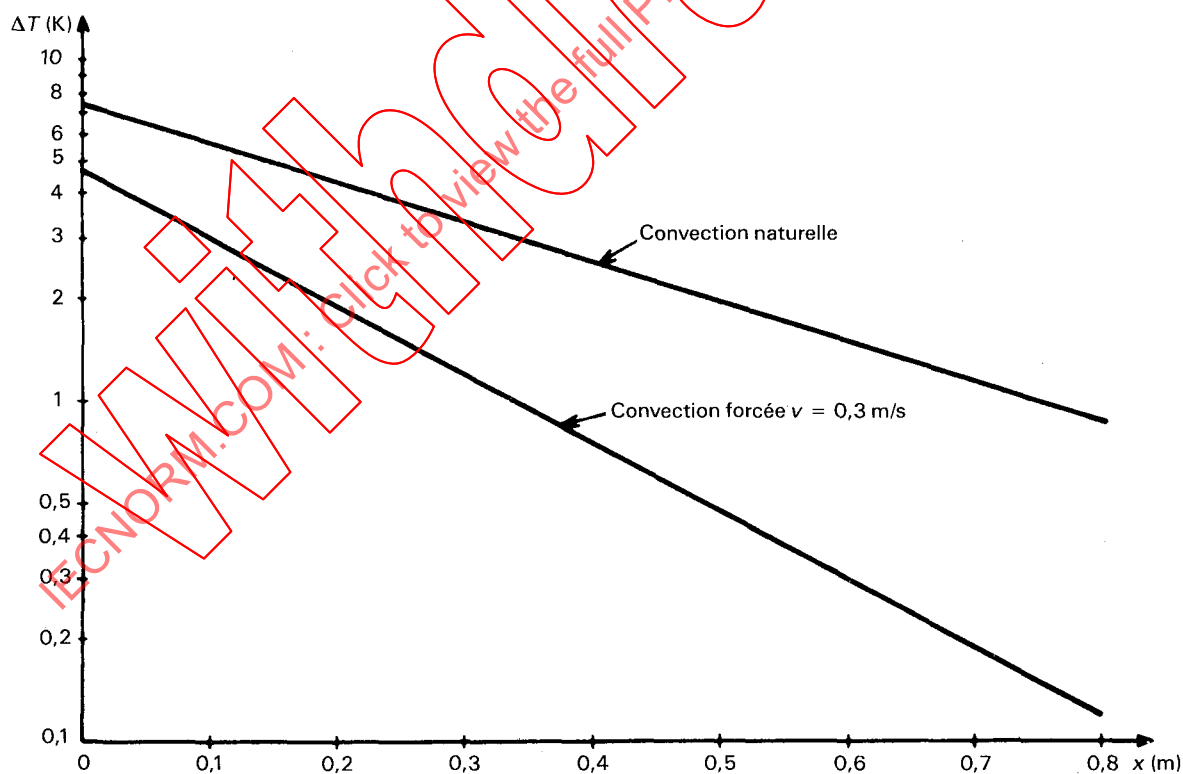
TABLEAU B

Echauffement en fonction de la distance du point de contact (convection forcée)

x (m)	ΔT_x (K)
0	4,59
0,01	4,38
0,05	3,65
0,1	2,90
0,2	1,83
0,218*	1,69
0,5	0,46
1	0,05

* $x = 0,218 \text{ m} = \Delta x = \text{constante spatiale}$.

Les résultats sont représentés à la figure 17. La variation est également linéaire sur du papier semilogarithmique et plus rapide en convection forcée, même à faible vitesse d'air, qu'en convection naturelle.



388/88

FIG. 17. — Décroissance de l'échauffement le long du conducteur, à partir de la borne: refroidissement en convection naturelle et en convection forcée.

TABLE B

Temperature rise as a function of distance from the point of contact (forced convection)

x (m)	ΔT_x (K)
0	4.59
0.01	4.38
0.05	3.65
0.1	2.90
0.2	1.83
0.218*	1.69
0.5	0.46
1	0.05

* $x = 0.218 \text{ m} = \Delta x = \text{spatial constant.}$

The results are shown in Figure 17. The variation is also linear on log-linear graph paper, and more rapid with forced convection, even at low air speeds, than with natural convection.

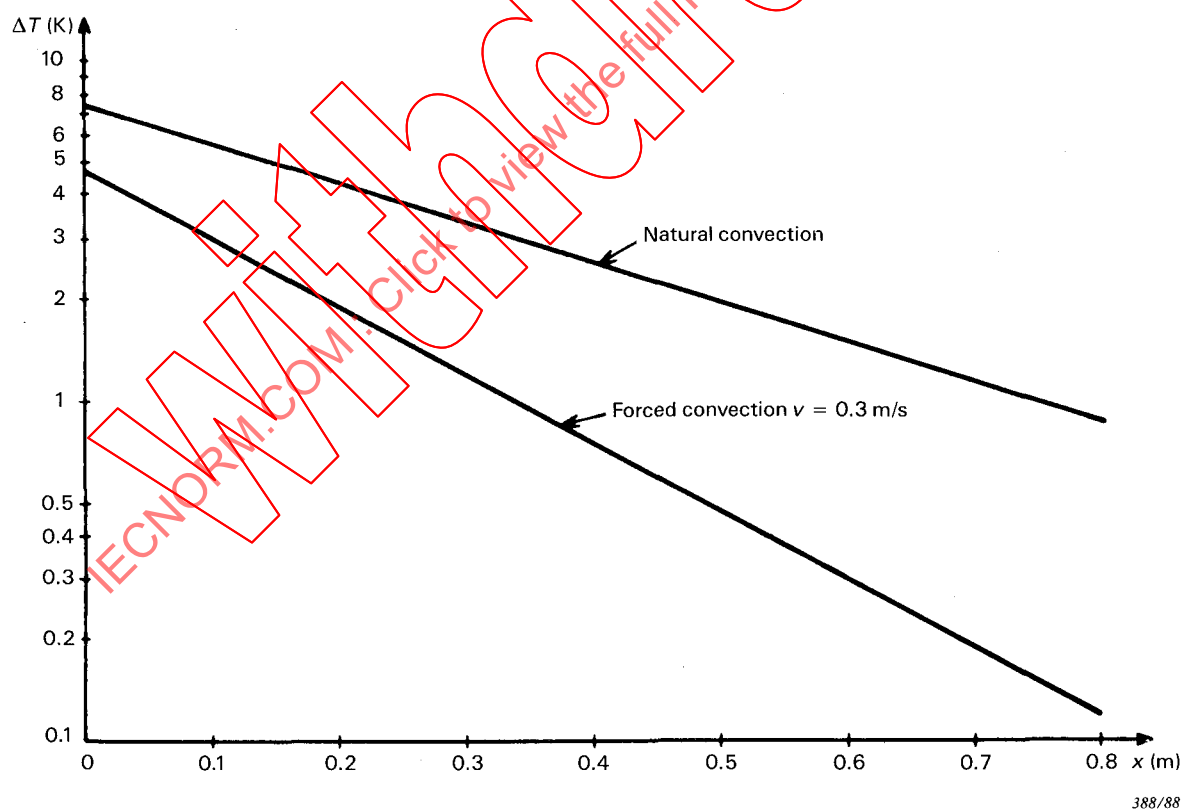


FIG. 17. — Decrease in temperature rise along the conductor, from the terminal: natural convection and forced convection cooling.

e) Calculs des échauffements aux points de contact élémentaire, en fonction du nombre de contacts élémentaires.

On obtient (voir paragraphe 4.4):

$$\Delta T_p = \frac{I^2}{2 \pi^2 n^2 \lambda_c} \left(\frac{\varrho}{4 a^2} + \frac{\sigma_o}{a^3} \right)$$

$$a = \sqrt{\frac{F}{n \pi \xi H}} \quad \text{et} \quad n = n_k H^{0,625} F^{0,2}$$

avec:

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

$$I = 300 \text{ A}$$

$$\lambda_c = 387 \text{ W/mK}$$

$$\varrho = 1,7241 \times 10^{-8} \Omega \text{m (à } 20^\circ \text{C)}$$

$$\sigma_o = 5 \times 10^{-12} \Omega \text{m}^2$$

$$F = 100 \text{ N}$$

$$\xi = 0,45$$

$$H = 5,5 \times 10^8 \text{ Pa}$$

d'où le tableau C:

TABLEAU C
 ΔT_p en fonction de n

n contacts élémentaires	ΔT_p (K)
1	1,67
2	1,10
4	0,74
8	0,50
16	0,34
18	0,32

L'échauffement supplémentaire aux points de contact élémentaire est donc comparativement faible et décroît très vite dès que le nombre de points de contact dépasse quelques unités.

f) La répartition de l'échauffement le long du conducteur aboutissant au contact est représentée dans la figure 18, page 70.

- e) Temperature rise calculations at elementary contact points, as a function of the number of elementary contacts.

We obtain (see Sub-clause 4.4):

$$\Delta T_p = \frac{I^2}{2 \pi^2 n^2 \lambda_c} \left(\frac{\varrho}{4 a^2} + \frac{\sigma_o}{a^3} \right)$$

$$a = \sqrt{\frac{F}{n \pi \xi H}} \quad \text{and} \quad n = n_k H^{0.625} F^{0.2}$$

with:

$$n_k = 2.5 \times 10^{-5} \text{ (S I)}$$

$$I = 300 \text{ A}$$

$$\lambda_c = 387 \text{ W/mK}$$

$$\varrho = 1.7241 \times 10^{-8} \Omega\text{m (at } 20^\circ\text{C)}$$

$$\sigma_o = 5 \times 10^{-12} \Omega\text{m}^2$$

$$F = 100 \text{ N}$$

$$\xi = 0.45$$

$$H = 5.5 \times 10^8 \text{ Pa}$$

hence Table C:

TABLE C
 ΔT_p as a function of n

n elementary contacts	ΔT_p (K)
1	1.67
2	1.10
4	0.74
8	0.50
16	0.34
18	0.32

The supplementary temperature rise at the elementary contact points is comparatively low, and falls very quickly as soon as the number of contact points exceeds a few units.

- f) Finally, the distribution of temperature rise along the conductor leading to the contact is as shown in Figure 18, page 71.

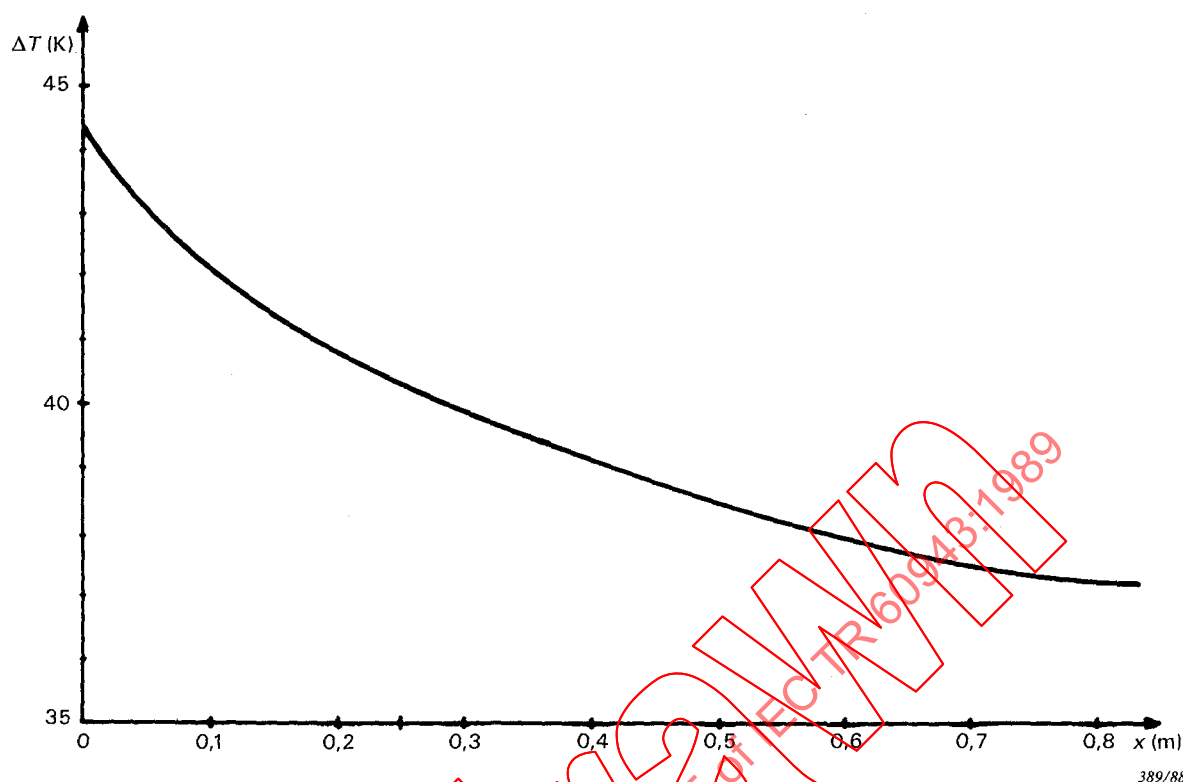


FIG. 18. — Variation de l'échauffement le long du conducteur, en fonction de la distance du contact ($\varepsilon = 0,1$; $v = 0$ m/s; $R_c = 18 \mu\Omega$; $I = 300$ A).

5. Valeurs admissibles des températures et des échauffements

5.1 Définitions

5.1.1 Température de l'air ambiant Θ_a

La température de l'air ambiant, Θ_a , au sens des normes, est par définition celle de l'air extérieur à l'appareil dont on étudie les échauffements.

Note. — La CEI a publié, en septembre 1966, un rapport donnant les résultats recueillis sur 21 postes de type intérieur non chauffés d'Europe. Les températures extrêmes enregistrées sont -14°C et $+35^\circ\text{C}$. La valeur moyenne annuelle est de $13,5^\circ\text{C}$ et la distribution du nombre de relevés en fonction de la température enregistrée présente un écart type de $7,4^\circ\text{C}$. (Les valeurs extrêmes d'une distribution normale ne s'écartent, en pratique, pas de ± 3 écarts type de la valeur moyenne.)

Dans le cas d'installations intérieures chauffées (en supposant le seuil de déclenchement des thermostats réglé à 10°C), la température moyenne annuelle serait, d'après les valeurs de la CEI citées plus haut, voisine de 15°C .

Ces valeurs, et en particulier les valeurs moyennes annuelles, sont particulièrement intéressantes pour une estimation correcte du vieillissement des contacts.

Valeurs à considérer:

Pour l'ensemble de l'appareillage, les conditions normales de température ambiante Θ_{an} définies par la CEI sont les suivantes:

- La température ambiante n'excède pas 40°C et sa valeur moyenne, mesurée sur une période de 24 h, n'excède pas 35°C . En outre, les normes de certains pays admettent que la moyenne annuelle n'excède pas 20°C .
- La température minimale de l'air ambiant correspond à une des valeurs du tableau Va:

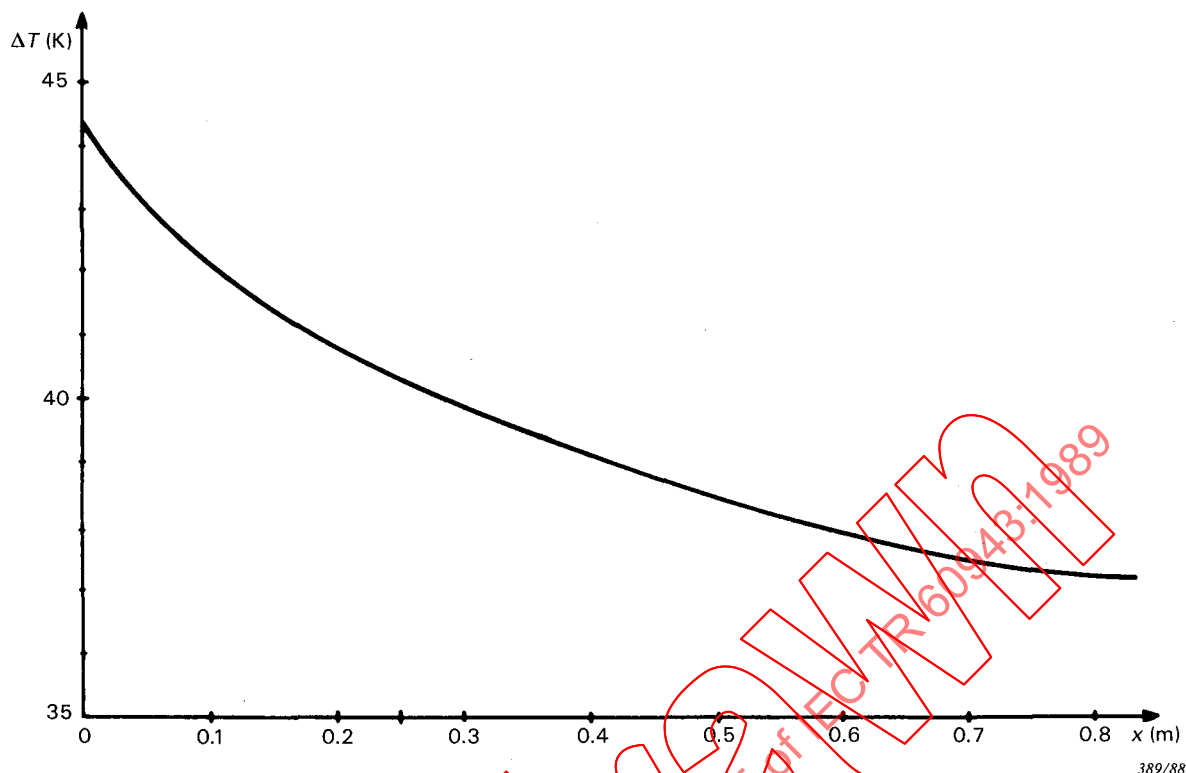


FIG. 18. — Variation in temperature rise along the conductor, as a function of distance from the contact ($\varepsilon = 0.1$; $v = 0$ m/s; $R_c = 18 \mu\Omega$; $I = 300$ A).

5. Permissible temperature and temperature rise values

5.1 Definitions

5.1.1 Ambient air temperature Θ_a

The ambient air temperature Θ_a with standard meaning is by definition that of the air surrounding the apparatus the heating of which is being studied.

Note. — The IEC published a report in September 1966 giving the results gathered from 21 European unheated indoor type sub-stations. The extreme temperatures recorded were -14°C and $+35^\circ\text{C}$. The mean annual value was 13.5°C and the distribution of the number of readings for the recorded temperature gave a standard deviation of 7.4°C . (The extreme value of a normal distribution is in practice at ± 3 standard deviations from the mean value.)

For heated indoor installations (assuming that the switching threshold of thermostats is set at 10°C) the mean annual temperature would be, according to the above IEC values, 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, the normal ambient temperature condition Θ_{an} defined by the IEC is as follows:

- The ambient temperature does not exceed 40°C and its mean value, measured over a period of 24 h, does not exceed 35°C . Moreover, some national standards state that the annual average does not exceed 20°C .
- The minimum ambient temperature corresponds to one of the values in Table Va:

TABLEAU Va

Température minimale de l'air ambiant

Classe d'appareillage	Température minimale de l'air ambiant	
	Appareillage pour l'intérieur	Appareillage pour l'extérieur
- 5°C intérieur -25°C intérieur -25°C extérieur -40°C extérieur	- 5°C -25°C	-25°C -40°C

- c) Les limites de température ci-dessus sont applicables à des altitudes n'excédant pas 2000 m. Les observations suivantes sont applicables:

Si un appareil refroidi par l'air est destiné à être utilisé à une altitude entre 2000 m et 4000 m, les échauffements mesurés au cours de l'essai usuel à une altitude inférieure à 2000 m ne doivent pas dépasser ceux du tableau VI, diminués de 1% par 100 m de différence d'altitude du lieu de montage au-dessus de 2000 m. Cette correction ne doit toutefois pas être faite lorsque la diminution du pouvoir de refroidissement de l'air est compensée par celle de sa température en altitude, c'est-à-dire si la température maximale de l'air au lieu d'installation ne dépasse pas les limites fixées ci-dessous en fonction de l'altitude:

TABLEAU Vb

Température maximale de l'air ambiant

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

Note. — Il convient évidemment de ne faire aucune correction pour les appareils refroidis en circuit fermé lorsque la pression du fluide de refroidissement ne dépend pas de l'altitude.

- d) Remarque concernant le rayonnement solaire:

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

5.1.2 Organes situés à l'intérieur d'une ou de plusieurs enveloppes

Il y a lieu alors de définir un terme ΔT_e , échauffement du fluide environnant l'organe.

Cet échauffement est dû à la chaleur produite par l'organe et ses conducteurs, ainsi que par l'appareillage se trouvant à proximité et peut être mesuré ou évalué par le calcul.

Il est conseillé d'indiquer la valeur (en watts) de l'énergie dissipée par l'organe et la valeur (en kelvins par watt) de la résistance thermique R_{th} de l'enveloppe. Cette dernière valeur peut

TABLE Va
Minimum ambient air temperature

Equipment class	Minimum ambient air temperature	
	Indoor equipment	Outdoor equipment
– 5°C indoor –25°C indoor –25°C outdoor –40°C outdoor	– 5°C –25°C	–25°C –40°C

- c) The above temperature limits apply at altitudes not exceeding 2000 m. At altitudes exceeding 2000 m the following observations apply:

If an air-cooled unit is to be used at an altitude between 2000 m and 4000 m, the temperature rises measured during a normal test at an altitude below 2000 m shall not exceed those in Table VI reduced by 1% for every 100 m in excess of 2000 m in altitude of the site of the installation. This correction is however not to be made when the reduced cooling effect of the air is compensated by its temperature at altitude, i.e. if the maximum air temperature at the site installation does not exceed the limits given below for the given altitude:

TABLE Vb
Maximum ambient air temperature

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

Note. — Obviously, no correction should be made for units which are closed-circuit cooled where the pressure of the cooling fluid does not vary with altitude.

- d) 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.

5.1.2 Components located inside one or more enclosures

It is necessary to define a term ΔT_e for the temperature rise of fluid surrounding the component.

This temperature rise is caused by the heat produced by the component and its conductors, and by the equipment nearby, and can be measured or evaluated by calculation.

It is advisable to indicate the value (in watts) of the energy dissipated by the component and the value (in kelvins per watt) of the thermal resistance R_{th} of the enclosure. This latter value

être soit fournie par le constructeur de l'enveloppe, soit mesurée lors d'un essai d'échauffement.

La température vue par le contact est donc la somme des deux termes précédents:

- température Θ_a de l'air extérieur à l'appareil;
- échauffement ΔT_e du fluide environnant l'organe.

5.1.3 Courants, régimes et services

5.1.3.1 Courants assignés

5.1.3.1.1 Courant thermique assigné (I_{th}) (voir Publication 157-1 de la CEI, paragraphe 4.3.2.1)

Courant maximal qu'un appareil est capable de supporter, l'équilibre thermique étant atteint, sans que les échauffements de ses diverses parties dépassent les limites spécifiées.

Pour les appareils à courant alternatif, cette valeur est la valeur efficace du courant; pour les appareils à courant continu, c'est la valeur finale du courant en régime permanent.

Note. — Le courant thermique assigné peut différer si l'appareil est sous enveloppe. Si un appareil livré sans enveloppe est ultérieurement monté dans une enveloppe par l'utilisateur, le courant maximal admissible (courant d'emploi assigné), toutes choses étant égales par ailleurs, peut être inférieur au courant thermique assigné de l'appareil nu.

5.1.3.1.2 Valeurs normales du courant thermique assigné

Ces valeurs sont:

6 – 8 – 10 – 12 – 16 – 20 – 25 – 32 – 40 – 50 – 63 – 80 – 100 – 125 – 160 – 200 – 250 – 315 – 400 – 500 – 630 – 800 – 1 000 – 1 250 – 1 600 – 2 000 – 2 500 – 3 150 – 4 000 – 5 000 – 6 300 A.

5.1.3.1.3 Courant d'emploi assigné (I_e)

Courant dont la valeur sert de base aux conditions d'utilisation de l'appareil. Il est indiqué par le constructeur en fonction de la nature du courant, des fréquence et tension de service assignées, du type d'enveloppe de protection ou de toutes autres conditions faisant l'objet d'une convention particulière.

Le constructeur peut indiquer comment varie le courant d'emploi assigné en fonction des paramètres ci-dessus.

C'est le courant d'emploi assigné qui sert de base aux essais relatifs à l'endurance électrique en fonctionnement normal et aux essais relatifs aux pouvoirs de fermeture et de coupure en fonctionnement normal et en fonctionnement occasionnel.

5.1.3.1.4 Courant de courte durée admissible (VEI* 441-17-17)

Courant qu'un circuit ou un appareil de connexion dans la position de fermeture peut supporter pendant un court intervalle de temps spécifié et dans des conditions prescrites d'emploi et de comportement.

5.1.3.2 Régimes et services

5.1.3.2.1 Définitions

a) Régime (VEI 05**-41-005)

Ensemble des grandeurs électriques et mécaniques caractérisant le fonctionnement d'une machine, d'un appareil ou d'un réseau, à un instant donné.

Notes 1. — Ce régime est en général variable avec le temps dans les conditions réelles d'utilisation.

2. — Pour la commodité de la spécification et des essais, on est amené à considérer que les grandeurs définissant le régime demeurent constantes pendant une durée déterminée. On dit alors que, pendant cette durée, le régime est constant.

* Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) (Publication 50 de la CEI).

** La Publication 50(05)(1956) de la CEI a été remplacée par les Publications 50(101), 50(111), 50(121), 50(131) et 50(151) de la CEI.

can either be given by the manufacturer of the enclosure, or measured during a temperature rise test.

The temperature seen by the contact is thus the sum of the two previous terms:

- temperature Θ_a of the air outside the unit,
- temperature rise ΔT_e of the fluid surrounding the component.

5.1.3 *Current, ratings and duties*

5.1.3.1 *Rated currents*

5.1.3.1.1 *Rated thermal current (I_{th})* (see IEC Publication 157-1, Sub-clause 4.3.2.1)

Maximum current which a unit is capable of withstanding, thermal equilibrium having been reached, without the temperature rises of its various parts exceeding the limits specified.

For alternating current units, this value is the r.m.s. value of the current; for direct current units, it is the final steady value of the current.

Note. — The rated thermal current may be different if the unit is enclosed. If a unit supplied without a casing is subsequently mounted inside a casing by the user, the maximum permissible current (rated service current), all other things being equal, may be less than the rated thermal current of a bare unit.

5.1.3.1.2 *Normal rated thermal current values*

These values are:

6 – 8 – 10 – 12 – 16 – 20 – 25 – 32 – 40 – 50 – 63 – 80 – 100 – 125 – 160 – 200 – 250 – 315 – 400 – 500 – 630 – 800 – 1000 – 1250 – 1600 – 2000 – 2500 – 3150 – 4000 – 5000 – 6300 A.

5.1.3.1.3 *Rated service current (I_e)*

Current, the value of which is used as a basis for fixing the conditions of use of the unit. It is indicated by the manufacturer according to the nature of the current, the rated service frequency and voltage, the type of protective casing or any other conditions covered by a special agreement.

The manufacturer may indicate how the rated service current varies as a function of the above parameters.

It is the rated service current which is used as a basis for the tests concerning the electrical endurance in normal operation and those concerning the closing and breaking capacities in normal and occasional operation.

5.1.3.1.4 *Short-time withstand current (IEV* 441-17-17)*

The current that a circuit or a switching device in the closed position can carry during a specified short-time under prescribed conditions of use and behaviour.

5.1.3.2 *Rating and duties*

5.1.3.2.1 *Definitions*

a) *Rating (IEV 05**-41-005)*

The combination of electrical and mechanical parameters which characterize the operation of a machine, a unit or a system, at a given moment.

Notes 1. — This rating generally varies with time under the actual conditions of use.

2. — For convenience of specification and testing, one has to consider the parameters defining the rating as remaining constant for a given period. It is then said that, during this period, the rating is constant.

* International Electrotechnical Vocabulary (IEV) (IEC Publication 50).

** IEC Publication 50(05)(1956) has been superseded by IEC Publications 50(101), 50(111), 50(121), 50(131) and 50(151).

Régime assigné (VEI 05-41-015) (Caractéristiques assignées) (VEI 151-04-04)

Ensemble des grandeurs électriques et mécaniques attribuées par le constructeur à une machine, un appareil, etc., pour définir son fonctionnement dans des conditions spécifiées et indiquées sur la plaque signalétique.

b) *Service* (VEI 411-21-07)

Stipulation des régimes, y compris les périodes de fonctionnement à vide et de repos, auxquels la machine est soumise, de leurs durées et de leur ordre de succession dans le temps.

Note. — Le service réel ne peut être en général défini que par les courbes représentatives des grandeurs électriques et mécaniques en fonction du temps (par exemple courbes de charge).

Service type (VEI 05-41-025)

Service conventionnel comportant un ou plusieurs régimes constants pendant des durées spécifiées.

Service assigné (VEI 05-41-045)

Celui des services types en vue duquel cette machine ou cet appareil a été établi.

Note. — Le service réel d'un appareil peut être généralement ramené par équivalence thermique à l'un des services types définis au paragraphe 5.1.3.2.2.

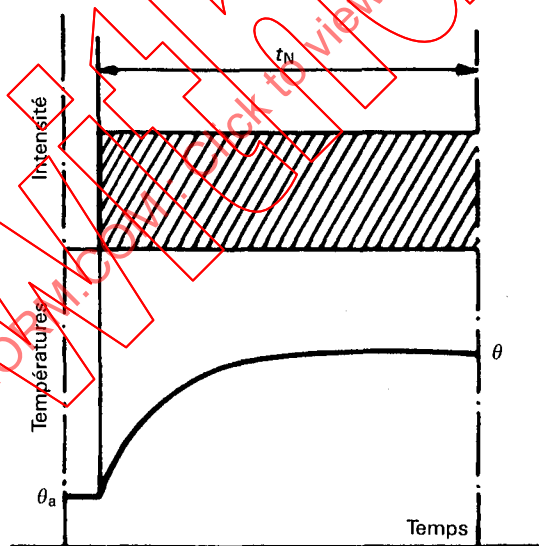
5.1.3.2.2 Services types

Les principaux services types rencontrés en appareillage sont les suivants:

a) *Service continu* (ou ininterrompu) (VEI 411-21-14)

Service comportant un fonctionnement à régime constant d'une durée suffisante pour que l'équilibre thermique soit atteint.

Note. — Dans ce type de service, les contacts sont susceptibles de vieillir par oxydation et/ou dépôt de poussières, le nettoyage des contacts au moment des manœuvres ne se produisant pas.



Définition des symboles:

t_N = durée de fonctionnement au régime nominal

θ = température en service continu

θ_a = température du milieu refroidissant

Service continu

390/88

b) *Service temporaire*

Service à régime constant pendant un temps déterminé, moindre que celui qui est requis pour atteindre l'équilibre thermique, suivi d'un repos d'une durée suffisante pour rétablir l'égalité de température de la machine, de l'appareil avec celle du milieu refroidissant.

Nominal rating (IEV 05-41-015) (Rated characteristics) (IEV 151-04-04)

The combination of electrical and mechanical parameters attributed by the manufacturer to a machine, a unit, etc., to define its operation under specified conditions and indicated on the rating plate.

b) *Duty* (IEV 411-21-07)

Stipulation of the ratings, including no-load operation and rest periods, to which the machine is subject, their durations and their order of succession in time.

Note. — The actual duty can generally only be defined by curves representing the electrical and mechanical parameters as a function of time (e.g.: load curves).

Standard duty (IEV 05-41-025)

Conventional duty comprising one or more constant ratings for specified periods.

Rated duty (IEV 05-41-045)

That of the standard duties for which this machine or unit has been specified.

Note. — The actual duty of a unit can generally be related by thermal equivalence to one of the standard duties defined in Sub-clause 5.1.3.2.2.

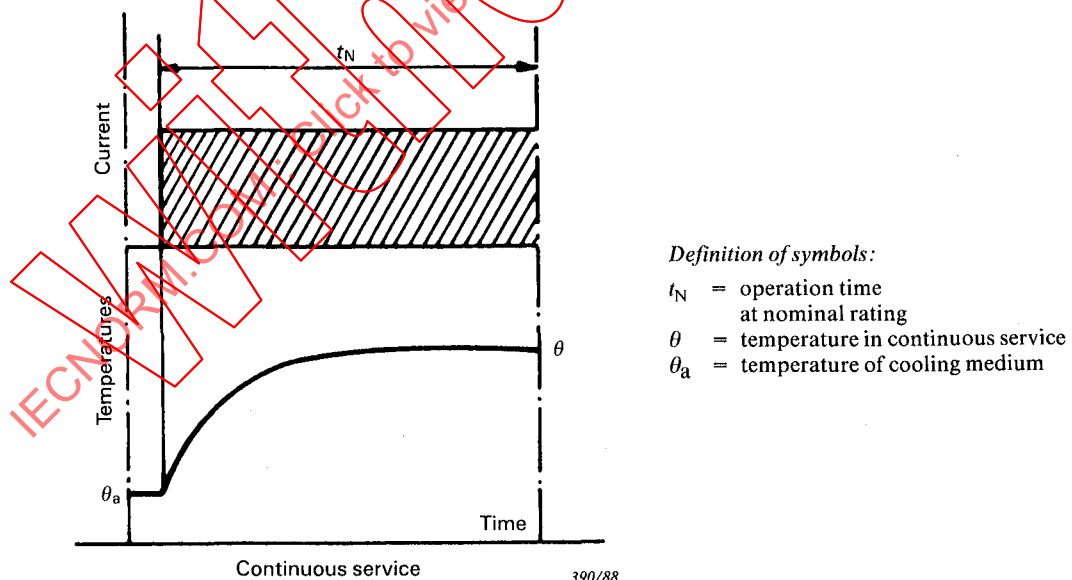
5.1.3.2.2 *Standard duties*

The principal standard duties found in switchgear are the following:

a) *Continuous service* (or uninterrupted) (IEV 411-21-14)

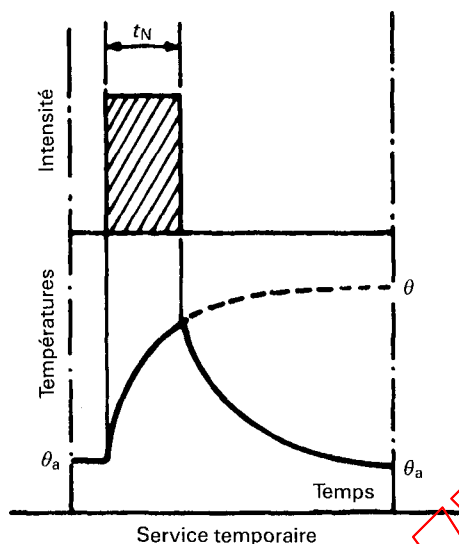
Service consisting of operation at a constant rating for a period of sufficient length for thermal equilibrium to be attained.

Note. — In this type of service, the contacts are liable to age by oxidation and/or dust deposits, since the contacts are not cleaned by the opening and closing operations.



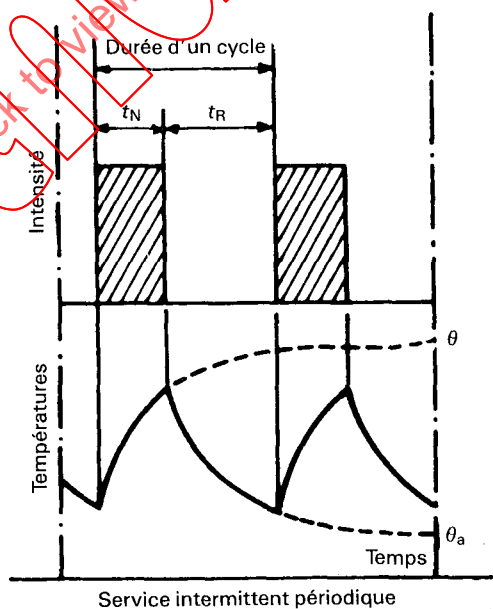
b) *Temporary service*

Service at continuous rating for a given time, less than that required for thermal equilibrium to be attained, followed by a period of rest of sufficient duration to bring the temperature back to that of the cooling medium.



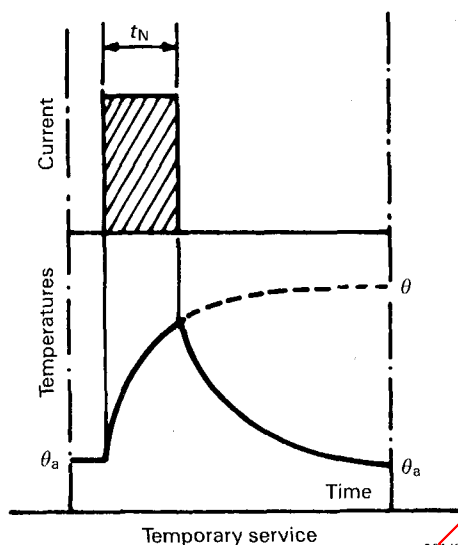
c) *Service intermittent périodique* (VEI 10*-05-385)

Suite de cycles identiques comprenant chacun un temps de fonctionnement à un régime constant et un temps de repos, ces temps étant insuffisants pour atteindre l'équilibre thermique aussi bien pendant les périodes d'échauffement que pendant les périodes de refroidissement. On entend par «repos» dans ce service, la suppression complète de tout mouvement et de toute alimentation électrique ou entraînement mécanique.



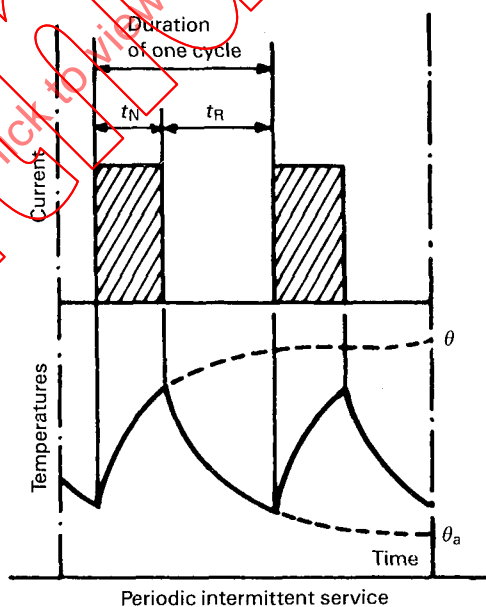
t_R = arrêt ou repos

* La Publication 50(10)(1956) de la CEI a été remplacée par la Publication 50(411) de la CEI.



c) *Periodic intermittent service* (IEV 10*-05-385)

Series of identical cycles each comprising a period of operation at constant rating and a period of rest, these times being insufficient for thermal equilibrium to be attained either during the heating periods or during the cooling periods. For this service, the term "rest" means the absence of any movement or of any electrical supply or mechanical operation.

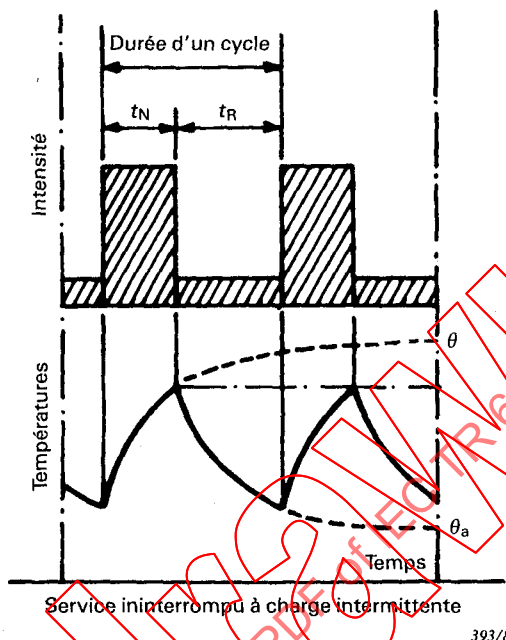


t_R = off or at rest

* IEC Publication 50(10)(1956) has been replaced by IEC Publication 50(411).

d) *Service ininterrompu à charge intermittente* (VEI 411-21-19)

Service composé d'une suite de cycles identiques comprenant chacun un temps de fonctionnement à régime constant et un temps de fonctionnement à vide, ces temps étant insuffisants pour que l'équilibre thermique soit atteint au cours d'un seul cycle.



e) *Service de 8 h* (Publication 157-1 de la CEI, paragraphe 4.3.4.1)

Service dans lequel les contacts principaux d'un appareil demeurent fermés, tout en étant parcourus par un courant constant, pendant une durée assez longue pour qu'ils puissent atteindre l'équilibre thermique, mais ne dépassant pas 8 h sans interruption.

f) *Service avec surcharge*

Service dans lequel l'appareil est parcouru par le courant thermique assigné pendant une durée suffisante pour que l'équilibre thermique soit atteint, suivie sans interruption d'une ou de plusieurs surcharges de durées et de valeurs spécifiées.

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

5.2.1 Températures maximales et échauffements admissibles

Les normes indiquent généralement la valeur d'échauffement limite à ne pas dépasser pour une température ambiante maximale de 40 °C, la valeur moyenne mesurée sur une période de 24 h n'excédant pas 35 °C et la moyenne annuelle n'excédant pas 20 °C.

En fait, il est nécessaire de faire une distinction entre deux groupes de valeurs:

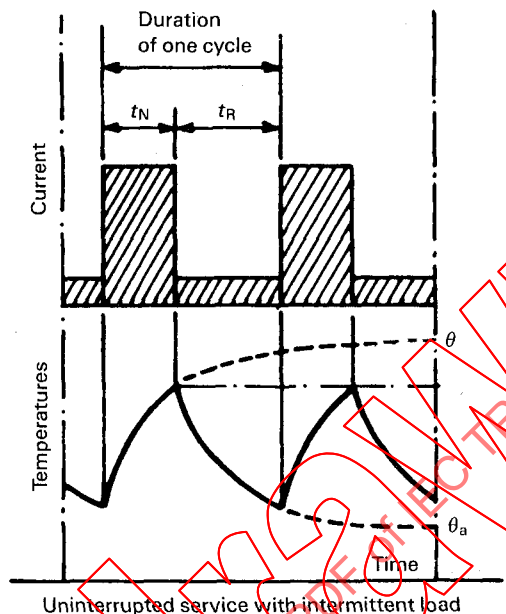
- celles qui correspondent aux organes dont la *température* ne doit pas dépasser une certaine valeur, sous peine de destruction très rapide, sinon immédiate; dans ce cas, la température ambiante à prendre en compte est de 40 °C.

Cela correspond, par exemple, aux isolants, aux contacts étamés (fluage de l'étain: 105 °C), aux ressorts, etc.;

- 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

d) *Uninterrupted service with intermittent load* (IEV 411-21-19)

Service consisting of a series of identical cycles each comprising a period of operation at constant rating and a period of operation off-load, these times being insufficient for thermal equilibrium to be attained during a single cycle.



Uninterrupted service with intermittent load

393/88

e) *Eight hour service* (IEC Publication 157-1, Sub-clause 4.3.4.1)

Service in which the main contacts of an equipment remain closed while carrying a constant current for a sufficiently long period for thermal equilibrium to be reached, but not exceeding 8 h without interruption.

f) *Overload service*

Service in which the equipment carries the rated thermal current for a sufficient time for thermal equilibrium to be reached, followed without interruption by one or more overloads of specified duration and value.

5.2 *Temperature and temperature rise of various equipment components*

5.2.1 *Maximum temperature and permissible temperature rise*

The standards generally state the temperature rise limits which must not be exceeded with a maximum ambient temperature of 40 °C, the mean measured value over a 24 hour period not exceeding 35 °C and the mean annual value not exceeding 20 °C.

In fact, it is necessary to distinguish between two groups of values:

- 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.;

- 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

limité à 35 K, alors que ceux-ci peuvent atteindre une température de près de 150°C sans destruction immédiate.

Il est évident, dans ce cas, que 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 correspondra donc à l'échauffement spécifié dans les normes et à une température θ_e de 20°C du fluide environnant l'organe.

Le tableau VI suivant rappelle les valeurs figurant dans la plupart des normes d'appareillage, en faisant la distinction entre échauffement maximal admissible à $\theta_e = \theta_{an} = 20^\circ\text{C}$ et température maximale admissible pour $\theta_{an} = 40^\circ\text{C}$.

Pour des appareils différents, les valeurs peuvent varier légèrement (par exemple pour les fusibles).

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TR 60943:1989

Withdrawing

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.

Table VI below gives the values shown in most switchgear standards, making the distinction between the maximum permissible temperature rise at $\Theta_e = \Theta_{an} = 20^\circ\text{C}$ and the maximum permissible temperature for $\Theta_{an} = 40^\circ\text{C}$.

For other equipment the values may be slightly different (e.g. for fuses).

Withdrawing
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TR 60943:1989

TABLEAU VI

Exemples de limites d'échauffements et de températures¹⁾

Désignation de l'organe			Colonne A Echauffement maximal (K) ($\Theta_{an} = 20^{\circ}\text{C}$)	Colonne B Température maximale ($^{\circ}\text{C}$) ($\Theta_{an} = 40^{\circ}\text{C}$)	Remarques
Pièces de contact ^{3), 5)}	Contacts élastiques	Cuivre et alliages 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⁾ 50 40 50 65 ¹⁷⁾ 50	105	Dégradation de l'huile
	Contacts boulonnés ⁴⁾	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⁾ 65 ¹⁷⁾ 75 ¹⁷⁾	105 100 105	Fluage de l'étain 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 isolants de la classe ⁹⁾ : Y A E B F H L'émail: à base d'huile synthétique Formant ressort A l'endroit d'une soudure à l'étain		90 105 120 130 155 180 100 120 ¹⁰⁾ 100 ¹¹⁾
Huile pour appareillage dans l'huile ^{12), 13)} Toute pièce métallique ou en matériau isolant en contact avec l'huile, à l'exception des contacts ¹³⁾			90 100	Dégradation de l'huile	
Moteurs électriques Résistances		14) 14)			
Surfaces ¹⁵⁾	Des organes de commande manuels: — métalliques — non métalliques Prévues pour être touchées en service normal mais non destinées à être tenues à la main de façon continue: — métalliques — non métalliques Accessibles mais non destinées à être touchées en service normal: — métalliques — non métalliques			55 65 70 80 80 90	Publication 364-4-42 de la CEI

(Voir notes page 86)

TABLE VI

Examples of temperature rise and temperature limits¹⁾

Description of component			Column A Max. tem- perature rise (K) ($\Theta_{an} = 20^{\circ}\text{C}$)	Column B Max. temperature ($^{\circ}\text{C}$) ($\Theta_{an} = 40^{\circ}\text{C}$)	Comments
Nature of contact ^{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⁾ 50 40 50 65 ¹⁷⁾ 50	105	Deterioration of the oil
	Screwed contacts ⁴⁾	Copper, aluminium and their 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⁾ 65 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 based synthetic Acting as springs At position of soldering		90 105 120 130 155 180 100 120 ¹⁰⁾ 100 ¹¹⁾	Ageing of insulation Permanent deformation Breaking
	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 Resistors			14) 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			55 65	IEC Publication 364-4-42
	Accessible but not designed to be touched in normal operation — metallic — non-metallic			70 80 80 90	

(See notes on page 87)

- 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 VI.
- 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».
- ³⁾ Lorsqu'un contact est établi entre des surfaces protégées de manières différentes, les températures et les échauffements admissibles doivent être considérés comme suit:
 - a) pour les contacts boulonnés et les bornes, ceux de l'élément pour lequel le tableau VI autorise les valeurs les plus élevées;
 - b) pour les contacts élastiques, ceux de l'élément pour lequel le tableau VI autorise les valeurs les plus basses.
- ⁴⁾ Le couple de torsion applicable aux vis est donné dans l'annexe D.
- 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 VI 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 Publication 85 de la CEI (voir annexe E).
- 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'intérieur d'enveloppes qui sont accessibles après ouverture de l'enveloppe et qui ne sont pas utilisés fréquemment, des températures plus élevées peuvent être admises.
 La distinction entre surfaces métalliques et non métalliques dépend de la conductivité thermique de la surface considérée. Des couches de peinture et de vernis ne sont pas considérées comme modifiant la conductivité thermique de la surface. En revanche, certains revêtements plastiques peuvent réduire sensiblement la conductivité thermique d'une surface métallique et permettre de la considérer comme non métallique.
 Cette règle ne s'applique pas aux matériaux qui sont conformes aux normes 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 heures, intermittent ou temporaire.
- ¹⁷⁾ Dans le cas des appareils de branchement basse tension définis à 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 l'article 6 de ce rapport.
- ¹⁹⁾ Pour l'appareillage industriel à basse tension, l'échauffement n'est limité que par la nécessité de ne pas endommager les pièces environnantes.

5.2.2 Remarques sur les valeurs d'échauffement indiquées dans le tableau VI

Les valeurs indiquées sont applicables à l'appareillage fonctionnant en régime continu et ont été évaluées comme suit:

— Pour les échauffements admissibles (voir tableau VI, colonne A):

- soit à partir d'essais de longue durée correspondant à une durée de vie normale de 20 à 40 ans environ, 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 aux paragraphes 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.

- 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 VI.
- 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”.
- 3) When the contact is to be made between surfaces which are protected in different ways, the permissible temperature and temperature rise must be established as follows:
 - a) for screwed contacts and terminals, use the item for which Table VI allows the highest values;
 - b) for spring contacts, use those of the item for which Table VI allows the lowest values.
- 4) The tightening torque for screws is given in Appendix D.
- 5) For fuse cut-outs, 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 VI are used, their properties must be taken into consideration.
- 8) Limited by the necessity of not damaging surrounding parts.
- 9) The classification of insulation is given in IEC Publication 85 (see Appendix E).
- 10) Temperature must 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 can 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 vaporization 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 can 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.
- 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 Clause 6 of this report.
- 19) For LV industrial equipment the temperature rise is limited only by the need not to damage surrounding parts.

5.2.2 Comments on temperature rise values given in Table VI

The values given are applicable to equipment operating at continuous rating. They have been assessed as follows:

- For the permissible temperature rises (see Table VI, 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 Sub-clauses 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.

- Pour les températures maximales à ne pas dépasser (voir tableau VI, 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 tenant compte:

- des régimes de fonctionnement (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 au paragraphe 5.1.;
- des modalités d'emploi, et en particulier des raccordements conducteurs bornes.

Un exemple de détermination des températures et échauffements admissibles dans ces différentes conditions est donné en l'article 6.

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 au paragraphe 5.1.1,
- soit en cas d'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 devront être évaluées en tenant compte:

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

Les hypothèses suivantes permettent d'aboutir à la relation (20):

- les échauffements sont proportionnels à la puissance 1,67 du courant (refroidissement par rayonnement et convection naturelle*);
- le taux de vieillissement des contacts est multiplié par deux si l'échauffement ΔT_i augmente de 6,5 K;
- le taux de vieillissement est multiplié par deux si la température 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 heures de fonctionnement dans les conditions normales Θ_{an} , ΔT_n , K étant donné par la formule:

$$K = 2^{\left(\frac{(\Theta_e - \Theta_{an})}{8,5} + \frac{(\Delta T_i - \Delta T_n)}{6,5} \right)} \quad (20)$$

Exemple numérique:

$$\Theta_{an} = 20^\circ\text{C}, \Delta T_n = 50 \text{ K}$$

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

- For the maximum temperatures not to be exceeded (see Table VI, 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 taking into account:

- the operating conditions (continuous, cyclic, for 8 h, etc.) and the thermal time constants of the components;
- the special operating modes (bi-metallic 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 Sub-clause 5.1.1;
- the methods of use, and in particular of the conductor-terminal connections.

An example for determining permissible temperature and temperature rise under these different conditions is given in Clause 6.

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 Sub-clause 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:

- those components the *maximum temperatures* of which shall not be exceeded (see Table VI, column 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 VI, column A).

The following hypotheses lead up to equation (20):

- temperature rises are proportional to the power 1.67 of the current (cooling by radiation and natural convection*);
- the rate of ageing of the contacts is multiplied by two if the temperature rise ΔT_i increases by 6.5 K;
- the rate of ageing is 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 hours of operation under normal conditions Θ_{an} , ΔT_n , K being given by the formula:

$$K = 2 \left(\frac{(\Theta_e - \Theta_{an})}{8.5} + \frac{(\Delta T - \Delta T_n)}{6.5} \right) \quad (20)$$

Numerical example:

$$\Theta_{an} = 20^\circ\text{C}, \Delta T_n = 50 \text{ K}$$

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

Si $\Theta_e = 40^\circ\text{C}$ et $\Delta T = 65\text{ K}$, on obtient $K = 25,3$; dans des conditions normales, la durée de vie du contact sera donc diminuée de 25 h en 1 h de fonctionnement dans ces nouvelles conditions.

Il est évident que cette mesure ne peut être compensée par un fonctionnement de même durée à faible charge et basse température. Si, par exemple, $\Theta_e = 0^\circ\text{C}$ et $\Delta T = 35\text{ K}$, on obtient $K = 0,04$; 1 h, dans ces conditions, équivaut à 2 min de fonctionnement normal; le gain n'est que de 58 min, comparé aux 25 h de vie précédemment consommées.

Seuls sont donc à prendre en considération les régimes où soit la température ambiante, soit l'échauffement sont augmentés au-delà des niveaux normaux admissibles.

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 devra être tel que:

$$I'_{th} = I_{th} \left(\frac{\Theta_n - \Theta_a}{\Theta_n - 40} \right)^{0,6} \quad \text{si } \Theta_a > 40^\circ\text{C} \quad (21)$$

Les valeurs numériques de $K = \frac{I'_{th}}{I_{th}}$ sont données au tableau VII pour différentes températures ambiantes et températures maximales admissibles.

TABLEAU VII
Facteur de correction (K) du courant assigné

Θ_a ($^\circ\text{C}$) \ Θ_n ($^\circ\text{C}$)	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	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 œuvre.

5.2.3.2 Cas où l'appareil est placé sous enveloppe; on suppose, 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:

$$I'_{th} = I_{th} \left(\frac{\Theta_n - \Theta_e}{\Theta_n - 40} \right)^{0,6} \quad \text{si } \Theta_e \geq 40^\circ\text{C} \quad (22)$$

If $\Theta_e = 40^\circ\text{C}$ and $\Delta T = 65\text{ K}$, one obtains $K = 25.3$; the life under normal conditions of the contact will therefore be reduced by 25 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 $\Delta T = 35\text{ K}$, we have $K = 0.04$; 1 hour under these conditions is equivalent to 2 min of normal operation; the gain is only 58 min, compared with the 25 h of life previously used up.

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

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:

$$I'_{th} = I_{th} \left(\frac{\Theta_n - \Theta_a}{\Theta_n - 40} \right)^{0.6} \quad \text{if } \Theta_a > 40^\circ\text{C} \quad (21)$$

Numerical values of $K = \frac{I'_{th}}{I_{th}}$ are given in Table VII for a variety of ambient temperatures and maximum permissible temperatures.

TABLE VII
Correction factors (K) for rated current

Θ_n ($^\circ\text{C}$) \backslash Θ_a ($^\circ\text{C}$)	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	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 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 $\Theta_a = 40^\circ\text{C}$.

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:

$$I'_{th} = I_{th} \left(\frac{\Theta_n - \Theta_e}{\Theta_n - 40} \right)^{0.6} \quad \text{if } \Theta_e \geq 40^\circ\text{C} \quad (22)$$

Considérations 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 cellule dont l'enveloppe assure un degré de protection supérieur ou égal à IP2X, 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 la cellule

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 la cellule 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 K . Le courant assigné (I'_{th}) pour utiliser cet appareil sous enveloppe peut être obtenu à partir de:

$$I'_{th} = K \cdot I_{th}$$

où:

$$K = \left(\frac{\Theta_n - (1 - x) \Theta_a - 100 X}{\Theta_n - 40} \right)^{0,6} \quad (23)$$

Le tableau VIII donne les valeurs du facteur de correction K en fonction de Θ_n et de Θ_a , pour $X = 0,25$:

TABLEAU VIII

Facteur de correction du courant nominal (K) en fonction de la température ambiante Θ_a et de la température maximale admissible Θ_n la plus faible: $X = 0,25$

Θ_n (°C)	Θ_a (°C)	55	65	70	75	80	90	100	105
0	0	1,52	1,33	1,28	1,24	1,21	1,17	1,14	1,13
10	10	1,28	1,17	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,07
20	20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30	30	0,66	0,81	0,84	0,87	0,88	0,91	0,92	0,93
40	40	—	0,58	0,66	0,71	0,75	0,81	0,84	0,85
45	45	—	0,44	0,56	0,63	0,68	0,75	0,80	0,82
50	50	—	0,25	0,44	0,54	0,61	0,70	0,75	0,77
55	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, à l'exclusion d'organes mineurs dont les températures maximales admissibles sont faibles (boutons-poussoirs, surfaces accessibles, etc.) et qui devront être protégés par d'autres moyens.

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 a cell whose enclosure provides a protection rate equal to or exceeding IP2X, 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 cell

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 cell 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 K is calculated. The rated current (I'_{th}) for using this unit in an enclosure may be obtained from:

$$I'_{th} = K \cdot I_{th}$$

where:

$$K = \left(\frac{\Theta_n - (1 - x)\Theta_a - 100X}{\Theta_n - 40} \right)^{0.6} \quad (23)$$

Table VIII gives values of correction factor K , as a function of Θ_n and Θ_a , for $X = 0.25$:

TABLE VIII

Nominal current correction coefficient (K) as a function of the ambient temperature Θ_a and of the lowest value of the maximum permissible temperature Θ_n : $X = 0.25$

Θ_a (°C)	Θ_n (°C)	55	65	70	75	80	90	100	105
0		1.52	1.33	1.28	1.24	1.21	1.17	1.14	1.13
10		1.28	1.17	1.14	1.12	1.11	1.09	1.07	1.07
20		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
30		0.66	0.81	0.84	0.87	0.88	0.91	0.92	0.93
40		—	0.58	0.66	0.71	0.75	0.81	0.84	0.85
45		—	0.44	0.56	0.63	0.68	0.75	0.80	0.82
50		—	0.25	0.44	0.54	0.61	0.70	0.75	0.77
55		—	—	0.29	0.44	0.53	0.64	0.71	0.73

It is also convenient to use the lowest value of Θ_n corresponding to the unit considered, to the exclusion of minor components whose maximum permissible temperatures are low (push-buttons, accessible surfaces, etc.) which shall be protected by other means.

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

TABLEAU IX
(comme le tableau VIII, avec $X = 0,3$)

Θ_n (°C)	55	65	70	75	80	90	100	105
Θ_a (°C)								
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	0,34	0,47	0,56	0,66	0,72	0,75
55	—	—	0,17	0,36	0,47	0,60	0,68	0,71

2. — Le facteur de correction K n'est à appliquer systématiquement que lorsqu'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 au 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 $\Theta_a = 40^\circ\text{C}$.

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 des contacts 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 a 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 $\Delta T'_i$, mais d'une valeur 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.

Exemple:

Si ΔT_e augmente de 8,5 K, et si on diminue ΔT_i de 6,5 K, ΔT se trouve augmenté de 2 K sans que le vieillissement de l'organe soit affecté.

Calculons cette variation dans le cas le plus général:

Soit: Θ_e , la température ambiante à l'intérieur du coffret;

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

Θ'_e , une nouvelle température ambiante interne;

$\Delta T'_i$, un nouvel échauffement.

Notes 1. — For a very full cell, as found particularly in LV, one can take $X = 0.3$, which gives:

TABLE IX
(as Table VIII, with $X = 0.3$)

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	0.34	0.47	0.56	0.66	0.72	0.75
55	—	—	0.17	0.36	0.47	0.60	0.68	0.71

2. — The correction factor K is to be systematically applied only when the actual current value for which the permissible temperature Θ_n is obtained is not known. This current value can be higher than the rated current of the unit.

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

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

Recalling that, all other things being equal:

- the ageing rate of the 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 + the temperature rise ΔT_i of the component considered in relation to that atmosphere.

We thus obtain: $\Delta T = \Delta T_e + \Delta T_i$

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

Example:

If ΔT_e increases by 8.5 K, and if ΔT_i is decreased by 6.5 K, ΔT 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 box;

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.

Le coefficient de vieillissement est alors:

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

Supposons $\Delta T_e + \Delta T_i = \Delta T_n$, échauffement normalisé.

Posons $z = \Delta T'_e - \Delta T_e$, accroissement de l'échauffement de l'atmosphère du coffret.

On obtient $y = (\Delta T'_e + \Delta T'_i) - \Delta T_n$, accroissement tolérable de l'échauffement normalisé avec K constant.

On a:

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

d'où:

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

Soit enfin

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

qui peut prendre la forme:

$$y = 6,5 \frac{\ln K}{\ln 2} + \frac{2z}{8,5} \quad (24)$$

The ageing coefficient then becomes:

$$K = 2 \left(\frac{\Theta'_e - \Theta_e}{8.5} + \frac{\Delta T'_i - \Delta T_i}{6.5} \right)$$

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

We get:

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

hence:

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

Finally:

$$K = 2 \left(\frac{z}{8.5} + \frac{y-z}{6.5} \right)$$

which can be expressed as:

$$y = 6.5 \left(\frac{\ln K}{\ln 2} + \frac{2z}{8.5} \right) \quad (24)$$

L'interprétation graphique de cette équation est donnée à la figure 19.

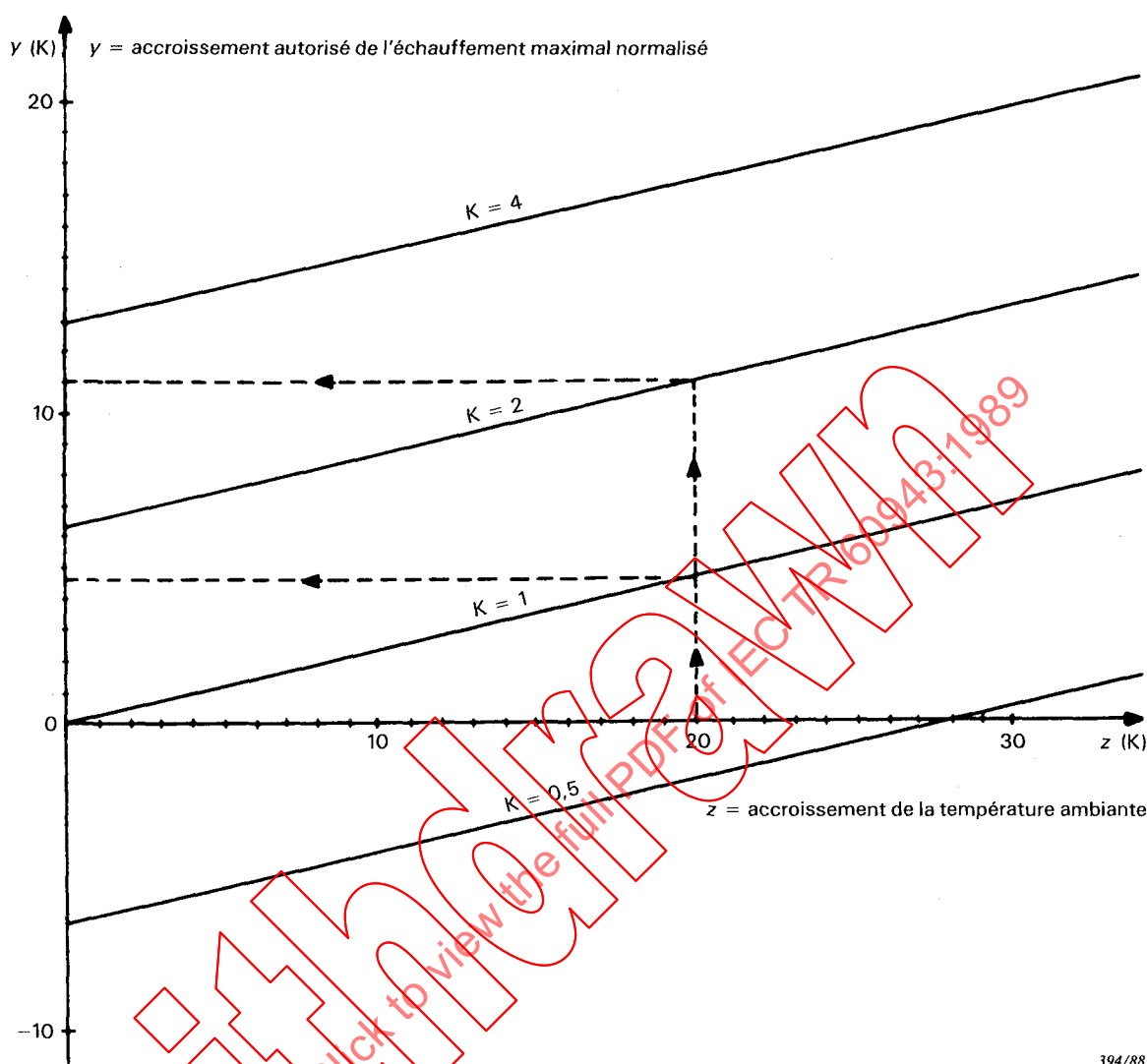


FIG. 19. — $y = f(z)$. Exemple de contact ayant un échauffement admissible normalisé de 65 K: si la température Θ_e (du coffret dans lequel le contact est installé, par exemple) augmente de 20 K, son échauffement admissible pourra être augmenté de 4,7 K sans modification de son taux de vieillissement et de 11,1 K si on admet de doubler le taux de vieillissement.

5.3 Températures et échauffements 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).

Sauf en cas de règle particulière, les conducteurs de raccordement à utiliser pour les essais d'échauffement peuvent être choisis dans les sections indiquées au tableau X. Les échauffements correspondants sont indiqués aux paragraphes 5.3.2 et 5.3.3.

This equation is illustrated graphically in Figure 19.

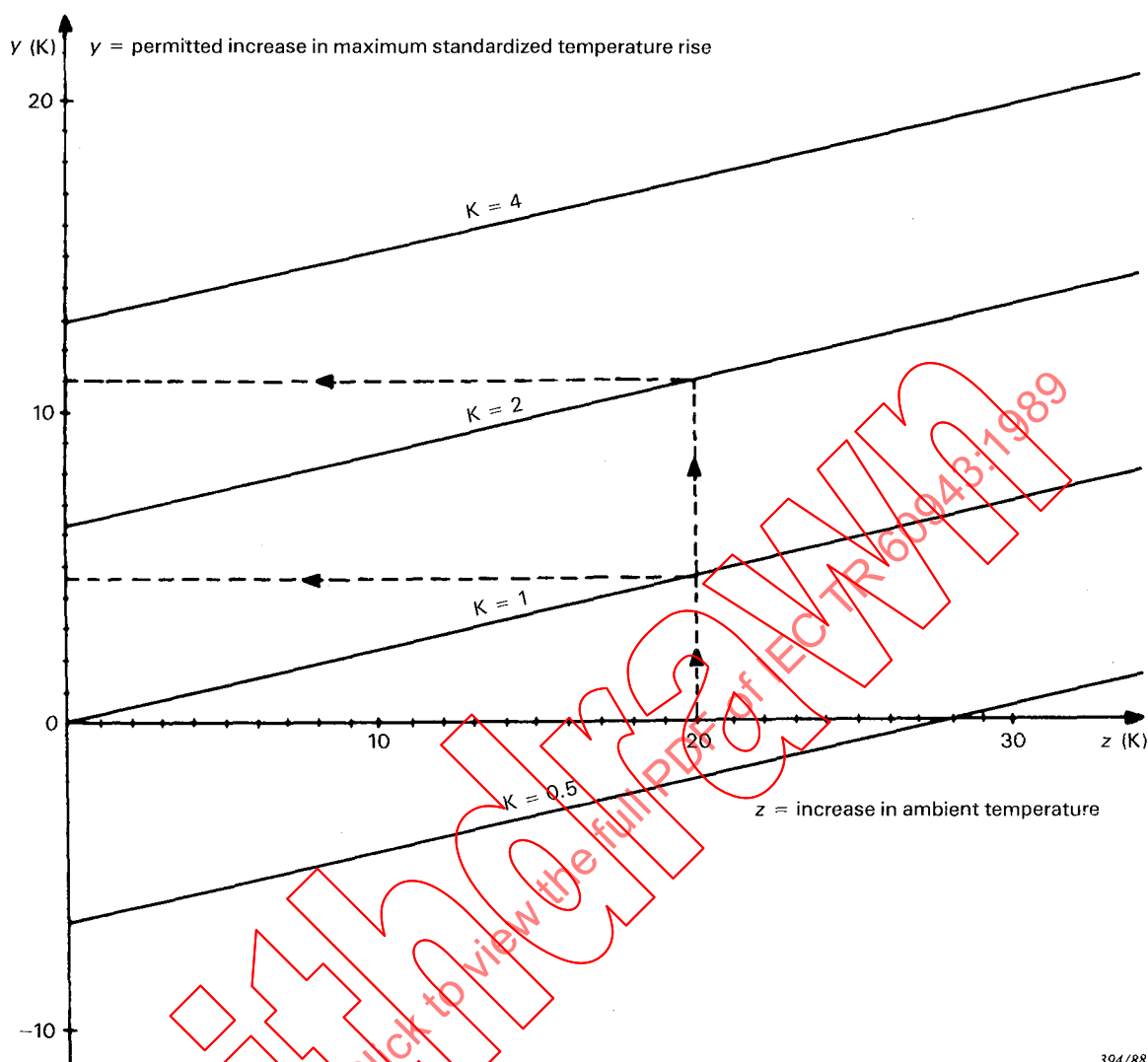


FIG. 19. — $y = f(z)$. An example of a contact having a permissible standardized temperature rise of 65 K, if the temperature Θ_e (of the box in which it is installed, for example) rises by 20 K, its permissible temperature rise can be increased by 4.7 K without changing its rate of ageing and 11.1 K if the ageing rate is permitted to double.

5.3 Temperature and temperature rise of conductors connecting electrical equipment

5.3.1 Recommended connecting cables 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).

In the absence of special regulations, the connecting conductors to be used for temperature rise tests may be chosen from the section shown in Table X. The corresponding temperature rises are indicated in Sub-clauses 5.3.2 and 5.3.3.

TABLEAU X

*Section des conducteurs de raccordement à utiliser pour les essais d'échauffement
(conformément à la Publication 157-1 de la CEI)*

Domaine du courant thermique assigné (A)			Courant assigné (A)	Section de conducteur en cuivre (mm ²)	Section de conducteur en aluminium (mm ²) ²⁾	Longueur minimale de chaque connexion (m)
Raccordement par câbles isolés	I >	I ≤	≤ 6	1		1
	0	7,9	8-10-12	1,5		1
	7,9	15,9	16-20	2,5	4	1
	15,9	22	25	4	6	1
	22	30	32	6	10	1
	30	39	40-50	10	16	1
	39	54	63	16	25	2
	54	72	80	25	35	2
	72	93	100	35	50	2
	93	117	125	50	70	2
	117	147	160	70	95	2
	147	180	200	95	120	2
	180	216	250	120	150	2
	216	287	315	185	240	2
	287	334	400	240	300	2
	334	400	500	2 × 150	2 × 185	2
	400 ³⁾	500	630	2 × 185	2 × 240	2
	500 ³⁾	630	800	2 × 240	2 × 300	2
	630 ³⁾	800				
Raccordement par barres méplates ¹⁾	400	500	500	2 × (30 × 5)	2 × (30 × 8)	2
	500	630	630	2 × (40 × 5)	2 × (40 × 8)	2
	630	800	800	2 × (50 × 5)	2 × (50 × 8)	2
	800	1000	1000	2 × (60 × 5)	2 × (60 × 8)	2
	1000	1250	1250	2 × (80 × 5)	2 × (80 × 8)	2
	1250	1600	1600	4 × (50 × 5)	2 × (100 × 8)	2
	1600 ³⁾	2000	2000	3 × (100 × 5)	2 × (100 × 8)	2
	2000 ³⁾	2500	2500	4 × (100 × 5)	4 × (100 × 8)	2
	2500 ³⁾	3150	3150	3 × (100 × 10)	5 × (100 × 8) ²⁾	2

¹⁾ Les barres méplates sont disposées horizontalement et de chant sur une longueur de 2 m de part et d'autre de l'appareil en essai.

²⁾ Les sections de conducteurs en aluminium sont des valeurs indicatives, non données dans la Publication 157-1 de la CEI.

³⁾ Valeurs non données dans la Publication 157-1 de la CEI.

5.3.2 Règles d'échauffement des câbles isolés

5.3.2.1 Vieillessement thermique des câbles

S'il est de coutume de fixer la température maximale d'emploi des matériaux isolants, les spécifications de câbles ne font pas de corrélation entre cette température et la durée de vie attendue de l'isolation des câbles. La normalisation des méthodes de détermination de la durée de vie en fonction de la température est en cours de développement (voir Publications 216 et 493 de la CEI). En attendant que la normalisation définisse les critères de dégradation à retenir suivant les conditions d'emploi, se référer à la figure 20*, page 104.

La figure 20 indique la durée de vie du PVC (polychlorure de vinyle), du PRC (polyéthylène réticulé chimiquement) et de l'EPR (caoutchouc éthylène/propylène) utilisés pour les câbles basse tension. Le critère de fin de vie pour une température donnée est l'apparition de craquelures sur éprouvettes de câbles enroulées sur leur propre diamètre, ce qui

* La figure 20 correspond à un document de travail du Comité d'Etudes n° 64 de la CEI.

TABLE X

*Section of connecting conductors to be used for temperature rise tests
(according to IEC Publication 157-1)*

Range of rated thermal current (A)			Rated current (A)	Cross-section of copper conductor (mm ²)	Cross-section of aluminium conductor (mm ²) ²⁾	Minimum length of each connection (m)
Connection by insulated cables	I >	I ≤	≤ 6	1		1
	0	7.9	8-10-12	1.5		1
	7.9	15.9	16-20	2.5	4	1
	15.9	22	25	4	6	1
	22	30	32	6	10	1
	30	39	40-50	10	16	1
	39	54	63	16	25	2
	54	72	80	25	35	2
	72	93	100	35	50	2
	93	117	125	50	70	2
	117	147	160	70	95	2
	147	180	200	95	120	2
	180	216	250	120	150	2
	216	287	315	185	240	2
	287	334	400	240	300	2
	334	400	500	2 × 150	2 × 185	2
	400 ³⁾	500	630	2 × 185	2 × 240	2
	500 ³⁾	630	800	2 × 240	2 × 300	2
Connection by flat bars ¹⁾	400	500	500	2 × (30 × 5)	2 × (30 × 8)	2
	500	630	630	2 × (40 × 5)	2 × (40 × 8)	2
	630	800	800	2 × (50 × 5)	2 × (50 × 8)	2
	800	1000	1000	2 × (60 × 5)	2 × (60 × 8)	2
	1000	1250	1250	2 × (80 × 5)	2 × (80 × 8)	2
	1250	1600	1600	4 × (50 × 5)	2 × (100 × 8)	2
	1600 ³⁾	2000	2000	3 × (100 × 5)	2 × (100 × 8)	2
	2000 ³⁾	2500	2500	4 × (100 × 5)	4 × (100 × 8)	2
	2500 ³⁾	3150	3150	3 × (100 × 10)	5 × (100 × 8) ²⁾	2

¹⁾ The flat bars run horizontally edgewise over a length of at least 2 m on both sides of the unit being tested.

²⁾ The aluminium conductor sections are indicative values not given in IEC Publication 157-1.

³⁾ Values not given in IEC Publication 157-1.

5.3.2 Temperature rise regulations for insulated cables

5.3.2.1 Thermal ageing of cables

While it is customary to fix the maximum temperature for the use of insulating materials, cable specifications draw no correlation between this temperature and the expected life of the cable insulation. Standards covering methods of determining the life as a function of temperature are in course of preparation (IEC Publications 216 and 493). While awaiting standards defining the deterioration criteria to be considered according to the conditions of use, Figure 20*, page 105, is to be referred to.

Figure 20 indicates the expected life of PVC (polyvinyl chloride), of PRC (chemically reticulated polyethylene) and of EPR (ethylene/propylene rubber) used for low voltage cables. The life termination criterion for a given temperature is the appearance of cracks on samples of cables wound on their own diameter, corresponding to a 50% elongation of the stretched

* Figure 20 corresponds to a working document of IEC Technical Committee 64.

correspond à un allongement de 50% de la fibre tendue. Dans une plage de températures convenable, la dégradation suit une loi d'Arrhenius simple:

$$\ln(t) = \frac{A}{T} + A'$$

dans laquelle t est la durée et T la température absolue en K.

Il a été décidé de définir des indices de température pour des durées de 5 000 h et 20 000 h.*

On pourrait évidemment déterminer la durée de vie en fonction d'autres critères de dégradation.

Le tableau XI traduit la figure 20 en donnant la durée de vie en régime permanent (P) et la durée de vie en régime «normal» (N) correspondant à un fonctionnement de 8 h par jour à la température indiquée. Donc $N = 3P$.

TABEAU XI

Durée de vie jusqu'à dégradation
(P = régime permanent; N = régime normal)

Matériau	PVC		EPR et PRC	
Température (°C)	P	N	P	N
70	23 ans	69 ans		
75	12 ans	37 ans		
80	7 ans	20 ans		
85	4 ans	11 ans	69 ans	
90	2 ans	6 ans	39 ans	
95	14 mois	43 mois	23 ans	69 ans
100	8 mois	25 mois	13 ans	40 ans
105	5 mois	15 mois	8 ans	24 ans
110	3 mois	9 mois	5 ans	15 ans
115	2 mois	5 mois	3 ans	9 ans
120			23 mois	69 mois
125			14 mois	43 mois
130			9 mois	27 mois
135			6 mois	18 mois
140			4 mois	12 mois
Indices de température: Durée 5 000 h Durée 20 000 h	101 °C 89 °C		133 °C 118 °C	
Paramètres pour t en heures				
A	15 028		14 500	
A'	-31,60		-27,19	

Notes 1. — Il s'agit de la température à l'âme du conducteur résultant de la température ambiante et de son échauffement propre.

2. — Les valeurs indiquées ne sont que des ordres de grandeur en raison des différentes formulations des matériaux et de la dispersion assez grande des phénomènes complexes de vieillissement de ces matériaux.

* Cette décision a été prise par le Comité d'Etudes n° 15 de la CEI.

fibre. Within a suitable temperature range, the deterioration of the product follows a simple law of Arrhenius:

$$\ln(t) = \frac{A}{T} + A'$$

where t is the time and T the absolute temperature in K.

It has been decided to define the temperature indices for periods of 5 000 h and 20 000 h.*

The life could obviously be determined as function of other deterioration criteria.

Table XI translates Figure 20 by giving the life under permanent rating (P) and the life under "normal" rating (N) corresponding to operation during 8 h per day at the temperature indicated. Thus $N = 3P$.

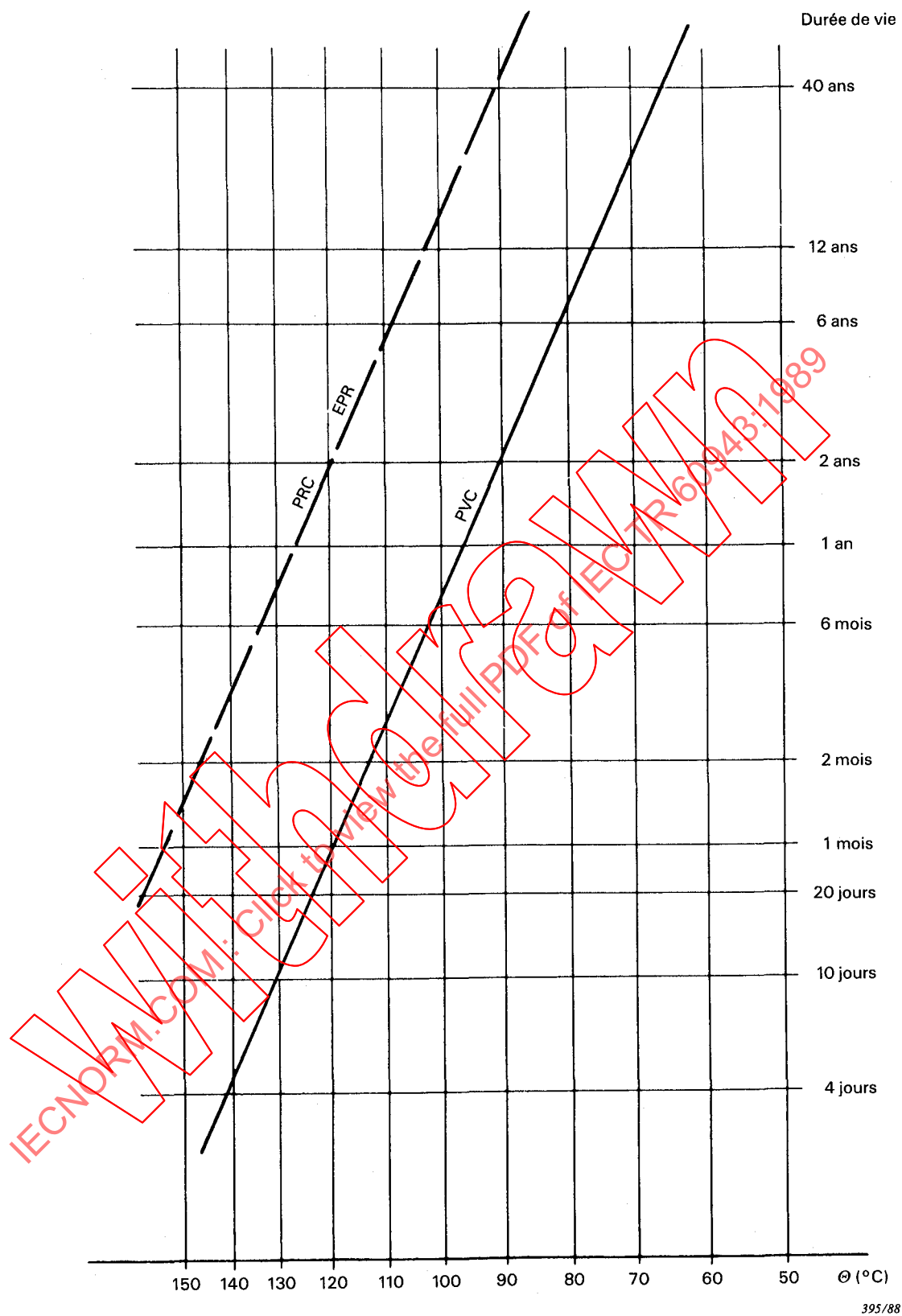
TABLE XI
Life until deterioration
(P = permanent rating; N = normal rating)

Material	PVC		EPR and PRC	
Temperature (°C)	P	N	P	N
70	23 years	69 years		
75	12 years	37 years		
80	7 years	20 years		
85	4 years	11 years	69 years	
90	2 years	6 years	39 years	
95	14 months	43 months	23 years	69 years
100	8 months	25 months	13 years	40 years
105	5 months	15 months	8 years	24 years
110	3 months	9 months	5 years	15 years
115	2 months	5 months	3 years	9 years
120			23 months	69 months
125			14 months	43 months
130			9 months	27 months
135			6 months	18 months
140			4 months	12 months
Temperature indices: Duration 5 000 h Duration 20 000 h	101 °C 89 °C		133 °C 118 °C	
Parameters for t in hours A A'	15 028 -31.60		14 500 -27.19	

Notes 1. — The temperature referred to is that of the cable conductor resulting from the ambient temperature and its own temperature rise.

2. — The values indicated are only orders of magnitude due to the different types of materials and the great dispersion of the complex ageing phenomena of these materials.

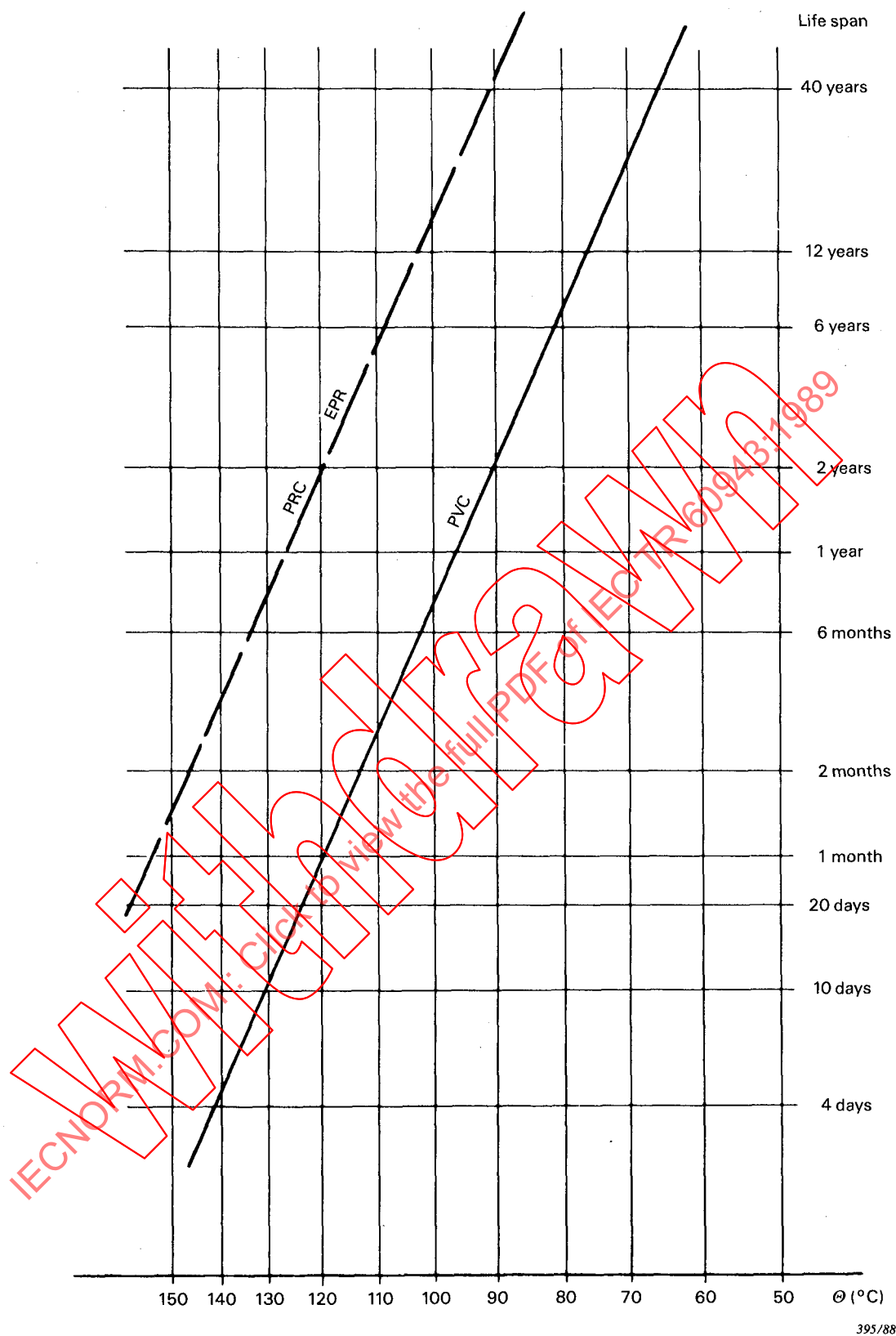
* This decision has been taken by IEC Technical Committee 15.



Eprouvette: câble enroulé sur son diamètre.

Critère de fin de vie: apparition de craquelures.

FIG. 20. — Durée de vie du PVC, du PRC et de l'EPR.



Test piece: cable wound on its own diameter.

Life termination criterion: appearance of cracks.

FIG. 20. — Life of PVC, PRC and EPR.

5.3.2.2 Intensités maximales admissibles

Les valeurs typiques des intensités maximales admissibles sont données dans le tableau XII. Elles correspondent à une température de l'âme du conducteur de:

70°C pour le PVC

90°C pour le PRC et l'EPR

Ces valeurs sont extraites du tableau 52-C1 (PVC) et du tableau 52-C2 (PRC-EPR) de la Publication 364-5-523 de la CEI. Elles s'appliquent au cas de deux conducteurs à âmes en cuivre, à la température ambiante de 30°C, pour le mode de pose de référence C (sur une paroi, dans la maçonnerie, sur un plancher, dans des caniveaux ouverts ou ventilés).

TABLEAU XII

Intensités admissibles pour les câbles isolés

Sections (mm ²)	PVC	PRC-EPR
	<i>I</i> (A)	<i>I</i> (A)
1,5	19,5	24
2,5	26	33
4	35	45
6	46	58
10	63	80
16	85	107
25	112	138
35	138	171
50	168	210
70	213	269
95	258	328
120	299	382
150	344	441
185	392	506
240	461	599
300	530	693

Notes:

a) Pour les intensités assignées (*I*) différentes de celles qui sont indiquées au tableau:

On utilise le conducteur pouvant faire transiter l'intensité (*I'*) immédiatement supérieure à *I*.

L'échauffement sera alors de:

$$\Delta T_s = \Delta T_s' \left(\frac{I}{I'} \right)^{1,67}$$

et la température normalisée du conducteur pour cette intensité *I'* sera de:

$$\Theta_s = 30 + \Delta T_s, \Theta_s (^\circ\text{C})$$

Exemples:

1. Intensité à faire transiter 420 A: conducteurs isolés au PVC, de 240 mm² de section.

$$\Delta T_s = 40 \left(\frac{420}{461} \right)^{1,67} \approx 34,2 \text{ K}$$

$$\Theta_s = 30 + 34,2 \approx 64,2^\circ\text{C}$$

5.3.2.2 Maximum permissible current

Typical values of maximum permissible current are given in Table XII. They correspond to a conductor core temperature of:

70 °C for PVC

90 °C for PRC and EPR

These values are taken from Table 52-C1 (PVC) and Table 52-C2 (PRC-EPR) of IEC Publication 364-5-523. They are given for two copper cored conductors, at an ambient temperature of 30 °C, for the reference method of installation C (fixed on a wall, in masonry, on a floor, in open or ventilated conduits).

TABLE XII
Permissible currents for insulated cables

Cross-sectional area (mm ²)	PVC	PRC-EPR
	<i>I</i> (A)	<i>I</i> (A)
1.5	19.5	24
2.5	26	33
4	35	45
6	46	58
10	63	80
16	85	107
25	112	138
35	138	171
50	168	210
70	213	269
95	258	328
120	299	382
150	344	441
185	392	506
240	461	599
300	530	693

Notes:

a) For rated current (*I*) different from that shown in the table:

The conductor that can carry the current (*I'*) immediately greater than *I* should be used.

The temperature rise will then be:

$$\Delta T_s = \Delta T'_s \left(\frac{I}{I'} \right)^{1.67}$$

and the standardized temperature of the conductor for this current *I'* will be:

$$\Theta_s = 30 + \Delta T_s, \Theta_s (^\circ\text{C})$$

Examples:

1. Current to be carried 420 A: PVC insulated conductors of 240 mm² cross-section.

$$\Delta T_s = 40 \left(\frac{420}{461} \right)^{1.67} \approx 34.2 \text{ K}$$

$$\Theta_s = 30 + 34.2 \approx 64.2^\circ\text{C}$$

2. *Intensité à faire transiter 300 A*: conducteurs isolés au PRC ou à l'EPR de 95 mm² de section.

$$\Delta T_s = 60 \left(\frac{300}{328} \right)^{1,67} \approx 52 \text{ K}$$

$$\Theta_s = 30 + 52 \approx 82^\circ\text{C}$$

b) *Autres groupements de conducteurs ou de câbles*:

L'évaluation des échauffements pour une intensité donnée s'effectue comme au point a) pour des intensités différentes des valeurs assignées multipliées par les coefficients donnés dans les tableaux XIIIa et XIIIb ci-dessous:

TABLEAU XIIIa
Facteurs de correction

Nombre de conducteurs chargés	3	4	6	9	12	> 12
Conducteurs isolés, à pose jointive, sur tablette et en simple couche	1	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65

TABLEAU XIIIb
Facteurs de correction

Nombre de câbles	2	3	4	6	9
Câbles multiconducteurs sur tablettes	0,85	0,80	0,75	0,70	0,70

c) *Autres températures ambiantes*

La dégradation dépend de la température du conducteur. Si la température ambiante est supérieure à 30°C, les échauffements devront être réduits en multipliant l'intensité admissible par le facteur de correction approprié du tableau XIV:

TABLEAU XIV
Facteurs de correction en fonction de la température ambiante

Température ambiante (°C)	Isolation	
	PVC	PRC et EPR
35	0,94	0,96
40	0,87	0,91
45	0,79	0,87
50	0,71	0,82
55	0,61	0,76
60	0,50	0,71
65		0,65
70		0,58
75		0,50

2. *Current to be carried 300 A*: PRC or EPR insulated conductors of 95 mm² cross-section.

$$\Delta T_s = 60 \left(\frac{300}{328} \right)^{1.67} \approx 52 \text{ K}$$

$$\Theta_s = 30 + 52 \approx 82^\circ\text{C}$$

- b) *Other groupings of conductors or cables*:

The evaluation of temperature rise for a given current is carried out as in item a) for different rated values of current multiplied by the coefficients given in Tables XIIIa and XIIIb below:

TABLE XIIIa
Correction coefficients

Number of conductors loaded	3	4	6	9	12	>12
Single layer insulated conductors on metal cable trays, touching	1	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65

TABLE XIIIb
Correction coefficients

Number of cables	2	3	4	6	9
Multi-core cables on trays	0.85	0.80	0.75	0.70	0.70

- c) *Other ambient temperatures*

Deterioration is a function of the temperature of the conductor. If the ambient temperature is greater than 30°C the temperature rise will have to be reduced by multiplying the permissible current by the appropriate correction factor from Table XIV:

TABLE XIV
Correction coefficients for ambient temperature

Ambient temperature (°C)	Insulation	
	PVC	PRC and EPR
35	0.94	0.96
40	0.87	0.91
45	0.79	0.87
50	0.71	0.82
55	0.61	0.76
60	0.50	0.71
65		0.65
70		0.58
75		0.50

5.3.3 Échauffement des jeux de barres

5.3.3.1 Échauffement

Un grand nombre d'essais d'échauffement ont été effectués sur les jeux de barres pour courants importants. Le tableau XV ci-dessous indique, pour un certain nombre d'arrangements de barres donnés:

- le courant;
- la valeur d'échauffement déterminée d'après les Publications 157-1B et 158-1B de la CEI;
- la valeur d'échauffement mesurée en convection purement naturelle, sur une boucle sans raccordement direct avec la source (courant circulant par induction);
- la valeur calculée d'après la formule approchée suivante:

$$\Delta T_s = 0,358 I^{1,67} S^{-1,18} \quad (25)$$

où ΔT_s est exprimé en kelvins, I en ampères et S en millimètres carrés.

D'où on peut obtenir la section de conducteur nécessaire, à échauffement donné, pour une intensité donnée, en utilisant la formule:

$$S = 0,4175 I^{1,42} \Delta T_s^{-0,85} \quad (26)$$

Si $\Delta T_s \leq 25$ K, alors

$$S \geq 0,027 I^{1,42} \quad (27)$$

TABLEAU XV

Résultats d'essais sur barres (valeurs maximales pour des barres en parallèle)

Composition (cuivre)	Section (mm ²)	Courant (A)	Échauffements (K)		
			Selon Publications 157-1B ou 158-1B de la CEI	Mesure (boucle)	Calcul (formule (25))
2 × 30 × 5	300	500	15	—	14
2 × 32 × 5	320	504		18,5	13
2 × 40 × 5	400	630	15	18	14
2 × 50 × 5	500	800	17	17	16
2 × 60 × 5	600	1000	19		19
3 × 40 × 5	600	1000		24	19
2 × 80 × 5	800	1250	20		20
4 × 40 × 5	800	1250		24	20
		1000		19	14
2 × 100 × 5	1000	1600	23	21	23
3 × 100 × 5	1500	2000	20		21
4 × 80 × 5	1600	2000		28	19
4 × 100 × 5	2000	2500	21	28	22
5 × 100 × 5	2500	3150		29 à 35	24
3 × 100 × 10	3000	3150	23		20

5.3.3.2 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.

5.3.3 Temperature rise of busbars

5.3.3.1 Temperature rise

A large number of temperature rise tests have been carried out on busbars at high currents. Table XV below shows, for certain busbar arrangements:

- the current;
- the temperature rise measured as in IEC Publications 157-1B and 158-1B;
- the temperature rise measured with purely natural convection, on a loop which is not directly connected to the supply (induced circulating current);
- the value calculated using the following approximate formula:

$$\Delta T_s = 0.358 I^{1.67} S^{-1.18} \quad (25)$$

where ΔT_s is expressed in kelvins, I in amperes and S in mm^2 .

From this, the necessary conductor section may be obtained, at a given temperature rise, for a given current, using the formula:

$$S = 0.4175 I^{1.42} \Delta T_s^{-0.85} \quad (26)$$

If $\Delta T_s \leq 25 \text{ K}$, then

$$S \geq 0.027 I^{1.42} \quad (27)$$

TABLE XV
Test results on busbars (maximum values for bars in parallel)

Composition (copper)	Cross-sectional area (mm^2)	Current (A)	Temperature rise (K)		
			According to IEC Publica- tions 157-1B or 158-1B	Measure (loop)	Calculation (formula (25))
2 × 30 × 5	300	500	15	—	14
2 × 32 × 5	320	504		18.5	13
2 × 40 × 5	400	630	15	18	14
2 × 50 × 5	500	800	17	17	16
2 × 60 × 5	600	1000	19		19
3 × 40 × 5	600	1000		24	19
2 × 80 × 5	800	1250	20		20
4 × 40 × 5	800	1250		24	20
		1000		19	14
2 × 100 × 5	1000	1600	23	21	23
3 × 100 × 5	1500	2000	20		21
4 × 80 × 5	1600	2000		28	19
4 × 100 × 5	2000	2500	21	28	22
5 × 100 × 5	2500	3150		29 to 35	24
3 × 100 × 10	3000	3150	23		20

5.3.3.2 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.

Le tableau XVI donne les valeurs typiques du coefficient par lequel il faut multiplier le courant admissible 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 XVI
*Facteurs de correction – Barres sur chant mises en parallèle –
Espacement sensiblement égal à l'épaisseur des barres*

n Nombre de barres élémentaires		1	2	3	4	5
K	Cuivre	1	1,72	2,25	2,52	—
	Aluminium	1	1,80	2,50	3,10	3,70

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 au paragraphe 4.3. Toutefois, les relations correspondant au cas le plus fréquemment rencontré – refroidissement par rayonnement et convection naturelle, traité dans annexe G – sont trop complexes pour une utilisation pratique.

Compte tenu de la précision que l'on peut attendre d'un tel calcul, il est légitime d'utiliser les équations correspondant à la convection forcée, données au paragraphe 4.3.2, également en convection naturelle.

On obtient alors:

$$\gamma = \frac{\varphi}{\Delta T_s}$$

φ et ΔT_s étant calculés (ΔT_s peut également être mesuré) pour une valeur de l'intensité proche de l'intensité assignée du conducteur aboutissant au contact.

Si on se limite à l'examen du cas des conducteurs de grande longueur, on obtient des relations particulièrement simples.

Dans cette hypothèse, rappelons les formules utiles du paragraphe 4.3.3.1 pour le calcul de l'échauffement des bornes de raccordement:

L'échauffement supplémentaire à la borne est:

$$\Delta T_0 = \frac{W}{\sqrt{\gamma B \lambda_c S}} \quad (16c)^*$$

La décroissance le long du conducteur est donnée par:

$$\Delta T_x = \Delta T_0 \cdot e^{-x \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}}} \quad (15b)$$

* Se reporter à la première équation (16c), page 58.

Table XVI gives typical values of the coefficient by which to multiply the permitted 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 XVI
Correction coefficients – Bars edgewise in parallel –
Spacing approximately equal to bar thickness

<i>n</i> Number of elementary bars		1	2	3	4	5
K	Copper	1	1.72	2.25	2.52	—
	Aluminium	1	1.80	2.50	3.10	3.70

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 has been discussed in Sub-clause 4.3. However, the equations for the case most frequently encountered – cooling by radiation and natural convection as given in Appendix G – are too complex for practical application.

Bearing in mind the accuracy that may be obtained from such a calculation, it is also permissible to use for natural convection the equations for forced convection given in Sub-clause 4.3.2.

We then obtain:

$$\gamma = \frac{\varphi}{\Delta T_s}$$

φ and ΔT_s being calculated (ΔT_s can also be measured) for a current value close to the rated current of the conductor connected to the contact.

If we limit consideration to the case of very long conductors, we obtain particularly simple equations.

In this hypothesis, the useful formulae should be recalled from Sub-clause 4.3.3.1 for calculating the temperature rise of connection terminals:

The supplementary temperature rise of the terminal is:

$$\Delta T_0 = \frac{W}{\sqrt{\gamma B \lambda_c S}} \quad (16c)^*$$

The decrement along the conductor is given by:

$$\Delta T_x = \Delta T_0 \cdot e^{-x \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}}} \quad (15b)$$

* Refer to first equation (16c), page 59.

La constante spatiale Δx , distance à laquelle l'échauffement est divisé par e, est:

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\lambda_c S}{\gamma B}} \quad (15c)$$

La mesure de Δx conduit à une valeur de γ qui, réintroduite dans l'équation (16c), peut permettre d'évaluer l'énergie W évacuée à la borne. Remarquons que W est du même signe que ΔT_0 , le cas $W < 0$ et $\Delta T < 0$ correspondant au cas où le câble serait refroidi par la borne (voir paragraphe 5.4.2, exemple 3).

On obtient finalement:

$$W = \frac{\Delta T_0 \lambda_c S}{\Delta x} \quad (28)$$

La longueur minimale Δl de conducteur nécessaire pour obtenir une chute de température ΔT_1 donnée par rapport à la borne s'exprime par la relation:

$$\Delta l = \sqrt{\frac{\lambda_c S}{\gamma B}} \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{\Delta T_1}{\Delta T_0}} \right] \quad (18b)$$

Le gradient de température à la borne est:

$$G = \left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0} = -\Delta T_0 \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}} = \frac{-W}{\lambda_c S} \quad (17b)$$

En exprimant l'équation (29) en fonction de W , on obtient:

$$\left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0} = \frac{\Delta T_0}{\Delta x} \quad (29)$$

et

$$W = \left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0} \cdot \lambda_c S \quad (30)$$

L'énergie transmise par la borne est égale au gradient de température multiplié par $\lambda_c S$ (conductivité thermique du métal du conducteur multipliée par sa section).

Cette dernière expression peut encore se mettre sous la forme:

$$\left[\frac{W}{S} = \frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0} \cdot \lambda_c \quad (31)$$

c'est-à-dire que le flux d'énergie transmis de la borne au conducteur est égal au gradient de température à la borne multiplié par la conductivité thermique du conducteur. Ce résultat est représenté à la figure 21, page 116, pour les conducteurs en cuivre et en aluminium.

The space constant Δx , the distance at which the temperature rise is divided by e , is:

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\lambda_c S}{\gamma B}} \quad (15c)$$

The measurement Δx gives a value of γ which, reintroduced into equation (16c), enables the calculation of W , the energy dissipated at the terminal into the conductor. Note: because W is of the same sign as ΔT_0 , the case where $W < 0$ and $\Delta T < 0$ corresponds to the cable being cooled by the terminal (see Sub-clause 5.4.2, Example 3).

We finally obtain:

$$W = \frac{\Delta T_0 \lambda_c S}{\Delta x} \quad (28)$$

The minimum length Δl of conductor necessary to obtain a given temperature drop ΔT_1 in relation to the terminal is expressed by the equation:

$$\Delta l = \sqrt{\frac{\lambda_c S}{\gamma B}} \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{\Delta T_1}{\Delta T_0}} \right] \quad (18b)$$

The temperature gradient at the terminal is:

$$G = \left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0} = -\Delta T_0 \sqrt{\frac{\gamma B}{\lambda_c S}} = \frac{-W}{\lambda_c S} \quad (17b)$$

Substituting for W , we obtain:

$$\left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0} = \frac{\Delta T_0}{\Delta x} \quad (29)$$

and

$$W = \left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0} \cdot \lambda_c S \quad (30)$$

The energy transmitted by the terminal is equal to the temperature gradient multiplied by $\lambda_c S$ (thermal conductivity of the metal of the conductor multiplied by its cross-section).

This latter expression may be put into the form:

$$\left[\frac{W}{S} = \frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0} \cdot \lambda_c \quad (31)$$

That is to say, the transmitted energy flux of the conductor terminal is equal to the temperature gradient of the terminal multiplied by the thermal conductivity of the conductor. This is shown in Figure 21, page 117, for copper and aluminium conductors.

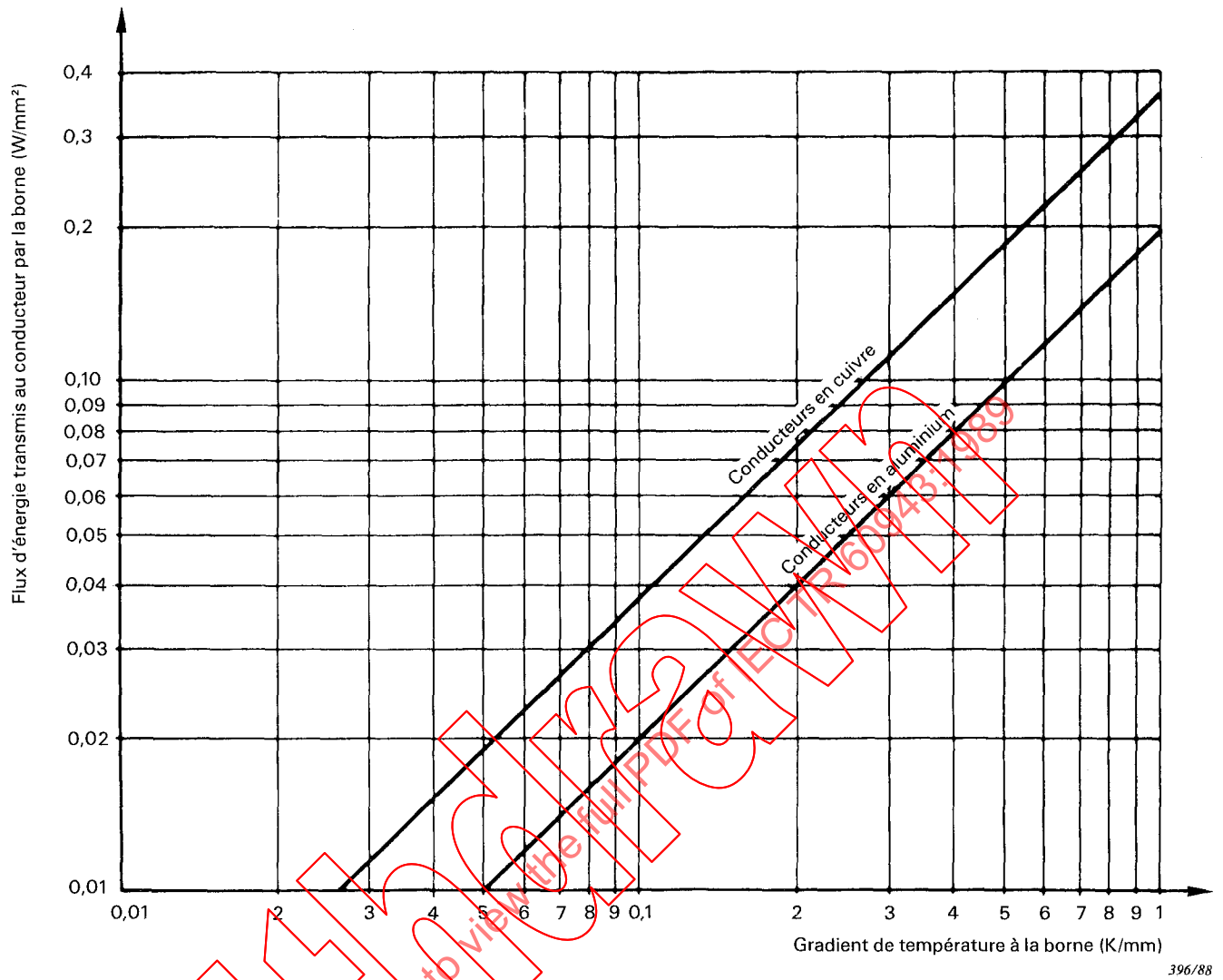


FIG. 21. — Flux d'énergie de la borne au conducteur en fonction du gradient de température à la borne le long du câble.

Soit ΔU la chute de tension de part et d'autre de la borne et I le courant qu'elle transmet. L'énergie produite $\Delta U \times I$ est évacuée partiellement par le conducteur qui lui est raccordé; on peut écrire:

$$W = \tau \Delta U \times I \quad \text{où} \quad 0 \leq \tau \leq 1$$

Soit encore:

$$\frac{\tau \Delta U I}{S} = \left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0} \cdot \lambda_c$$

or $\frac{I}{S}$ est la densité J du courant dans le conducteur, d'où:

$$\Delta U_{0 < \tau \leq 1} = \frac{\lambda_c}{\tau J} \cdot \left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0} \quad (32)$$

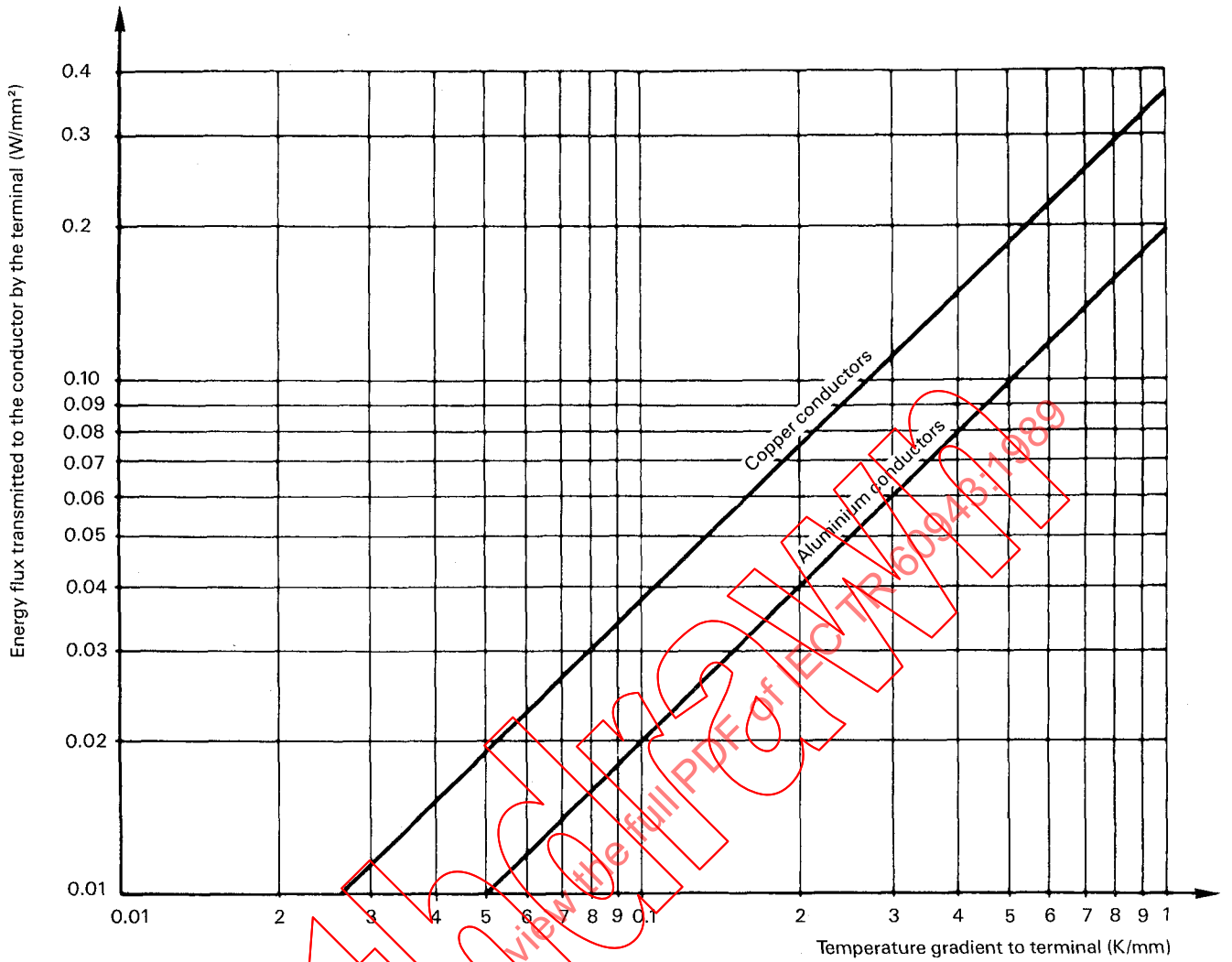


FIG. 21. — Energy flux from terminal to conductor as a function of temperature gradient to the terminal along the cable.

Let ΔU be the voltage drop across the terminal and I be the current which it carries. The energy produced $\Delta U \times I$ is partially dissipated by the conductor connected to it; this can be expressed as:

$$W = \tau \Delta U \times I \quad \text{where} \quad 0 \leq \tau \leq 1$$

That is:

$$\frac{\tau \Delta U I}{S} = \left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0} \cdot \lambda_c$$

now, $\frac{I}{S}$ is the current density J in the conductor, hence:

$$\Delta U_{0 < \tau \leq 1} = \frac{\lambda_c}{\tau J} \cdot \left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0} \quad (32)$$

Cette formule montre que, en prenant une valeur raisonnable pour τ ($\approx 0,5$ par exemple) et pour J (densité de courant fixée par la nature du conducteur), la chute de tension ΔU à la borne est directement proportionnelle au gradient de température le long du conducteur à sa jonction avec la borne.

Application numérique

Pour un conducteur en cuivre $\lambda_c = 0,38 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-1} \text{K}^{-1}$ en prenant $J = 2 \text{ A/mm}^2$ et $\tau = 0,5$, on obtient:

$$\Delta U_{(v)} \approx 0,38 \underbrace{\left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]}_{(\text{K/mm})} \Big|_{x \rightarrow 0}$$

La chute de tension à la borne est donc de l'ordre de 38% du gradient de température à la borne (exprimé en K/mm). Elle est de l'ordre de 20% pour un conducteur aluminium. La valeur maximale des gradients rencontrés ne dépassant pas 1 K/mm, on a $\Delta U < 0,4 \text{ V}$ dans la plupart des cas, ce qui est bien vérifié en pratique.

5.4.2 Exemples numériques et essais d'échauffement

Exemple 1. — Essai d'échauffement sur un jeu de deux barres en cuivre de 40×5 ; intensité assignée 630 A.

Intensité pour une seule barre: $\frac{630}{1,72} = 366 \text{ A}$ (voir tableau XVI).

En prenant:

- les caractéristiques du fluide (air à 20°C) dans l'annexe B;
- les caractéristiques ρ et α du cuivre à 0°C dans l'annexe A;
- $D_h = 0,04 \text{ m}$
- $B = 0,09 \text{ m}$
- $\varepsilon = 0,22$
- $\varphi_s = 0$ (pas d'apport solaire)
- $v = 0 \text{ m/s}$ (convection naturelle)
- $T_a = 293,15 \text{ K}$

On obtient $\Delta T_s = 18,03 \text{ K}$ et $\varphi = 137,35 \text{ W/m}^2$ en utilisant les équations (10), (11) et (13).

Pour $I = 400 \text{ A}$, on obtient de même:

$$\Delta T_s = 21,07 \text{ K} \text{ et } \varphi = 165,89 \text{ W/m}^2$$

En prenant $v = 0,117 \text{ m/s}$ (convection forcée), et à partir des équations (10), (12) et (13), on obtient:

- pour $I = 366 \text{ A}$: $\Delta T_s = 18,04 \text{ K}$ et $\varphi = 137,36 \text{ W/m}^2$;
- pour $I = 400 \text{ A}$: $\Delta T_s = 21,77 \text{ K}$ et $\varphi = 166,31 \text{ W/m}^2$.

Calcul des échauffements le long du conducteur, à partir de la borne:

- Première hypothèse: convection naturelle (voir annexe G).

Les couples de valeur ΔT , φ pour deux courants facilitent le calcul de γ et δ :

On obtient: $\gamma = 4,13$

$\delta = 1,212$

d'où les échauffements à partir de la borne pour $I = 366 \text{ A}$, en prenant $W = 8 \text{ watts}$ de puissance émise par la borne et évacuée par le conducteur:

This equation shows that, taking a reasonable value for τ (≈ 0.5 , for example) and for J (current density determined by the type of conductor), the voltage drop ΔU at the terminal is directly proportional to the temperature gradient along the conductor at its connection with the terminal.

Numerical example

For a copper conductor $\lambda_c = 0.38 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-1} \text{K}^{-1}$ taking $J = 2 \text{ A/mm}^2$ and $\tau = 0.5$, we get:

$$\Delta U_{(v)} \approx 0.38 \underbrace{\left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0}}_{(\text{K/mm})}$$

The voltage drop at the terminal is thus to the order of 38% of the temperature gradient at the terminal (expressed in K/mm). It is to the order of 20% for an aluminium conductor. The maximum value of the gradient encountered not exceeding 1 K/mm, we get $\Delta U < 0.4 \text{ V}$ in most cases, which is verified in practice.

5.4.2 Numerical examples and temperature rise tests

Example 1. — Temperature rise test on a set of two copper busbars 40×5 ; rated current 630 A.

Current for a single bar: $\frac{630}{1.72} = 366 \text{ A}$ (refer to Table XVI).

Taking:

- the characteristics of the fluid (air at 20°C) in Appendix B
- the characteristics ρ and α of the copper at 0°C in Appendix A
- $D_h = 0.04 \text{ m}$
- $B = 0.09 \text{ m}$
- $\varepsilon = 0.22$
- $\varphi_s = 0$ (no sun effect)
- $v = 0 \text{ m/s}$ (natural convection)
- $T_a = 293.15 \text{ K}$

We obtain $\Delta T_s = 18.03 \text{ K}$ and $\varphi = 137.35 \text{ W/m}^2$ using equations (10), (11) and (13).

For $I = 400 \text{ A}$, we also get:

$$\Delta T_s = 21.07 \text{ K and } \varphi = 165.89 \text{ W/m}^2$$

Taking $v = 0.117 \text{ m/s}$ (forced convection), and from equations (10), (12) and (13), we get:

- for $I = 366 \text{ A}$: $\Delta T_s = 18.04 \text{ K}$ and $\varphi = 137.36 \text{ W/m}^2$;
- for $I = 400 \text{ A}$: $\Delta T_s = 21.77 \text{ K}$ and $\varphi = 166.31 \text{ W/m}^2$.

Calculation of temperature rises along the conductor, starting from the terminal:

- First assumption: natural convection (see Appendix G).

The pairs of values ΔT , φ for two currents facilitate the calculation of γ and δ :

Thus: $\gamma = 4.13$

$\delta = 1.212$

from which the temperature rises starting from the terminal with $I = 366 \text{ A}$, taking $W = 8 \text{ watts}$ of power emitted by the terminal and dissipated by the conductor, are:

x (m)	0	0,05	0,1	0,25	0,346	0,5	1
ΔT_x (K)	34,33	29,51	25,43	16,50	12,63	8,36	2,45

— Deuxième hypothèse: convection forcée (voir paragraphe 4.3.3.1, formule (15b)).

On obtient de même: $\gamma = 7,236$

$$\delta = 1,018 \approx 1$$

d'où les échauffements avec les mêmes hypothèses:

$W = 8$ watts et $I = 366$ A sont:

x (m)	0	0,05	0,1	0,25	0,343	0,5	1
ΔT (K)	35,90	31,03	26,82	17,31	13,21	8,35	1,94

Les résultats entre les deux hypothèses sont donc suffisamment proches pour justifier l'hypothèse faite au paragraphe 4.3.1, consistant à ne considérer que les équations plus simples correspondant à la convection forcée.

La comparaison avec les résultats expérimentaux est illustrée par la figure 22:

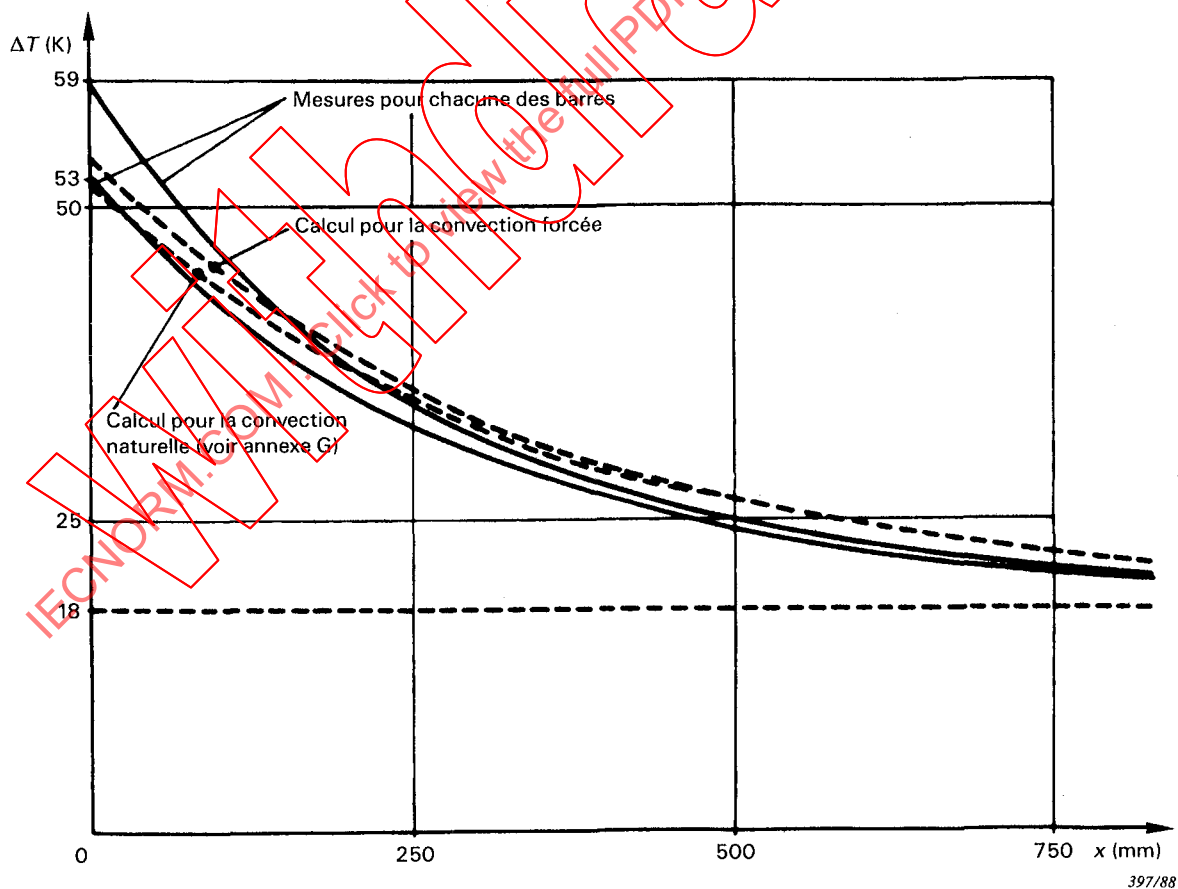


FIG. 22. — Echauffement en fonction de la distance à partir de l'extrémité des barres (2 barres $40 \times 5,1 = 630$ A).

x (m)	0	0.05	0.1	0.25	0.346	0.5	1
ΔT_x (K)	34.33	29.51	25.43	16.50	12.63	8.36	2.45

- Second assumption: Forced convection (see Sub-clause 4.3.3.1, Equation (15b)).

We obtain in the same way: $\gamma = 7.236$

$$\delta = 1.018 \approx 1$$

from which the temperature rises using the same assumptions:

$W = 8$ watts and $I = 366$ A are:

x (m)	0	0.05	0.1	0.25	0.343	0.5	1
ΔT (K)	35.90	31.03	26.82	17.31	13.21	8.35	1.94

It is clear that the results of the two assumptions are sufficiently close to justify the assumption made in Sub-clause 4.3.1, which is to consider only the most simple equations corresponding to forced convection.

The comparison with the experimental results is illustrated in Figure 22:

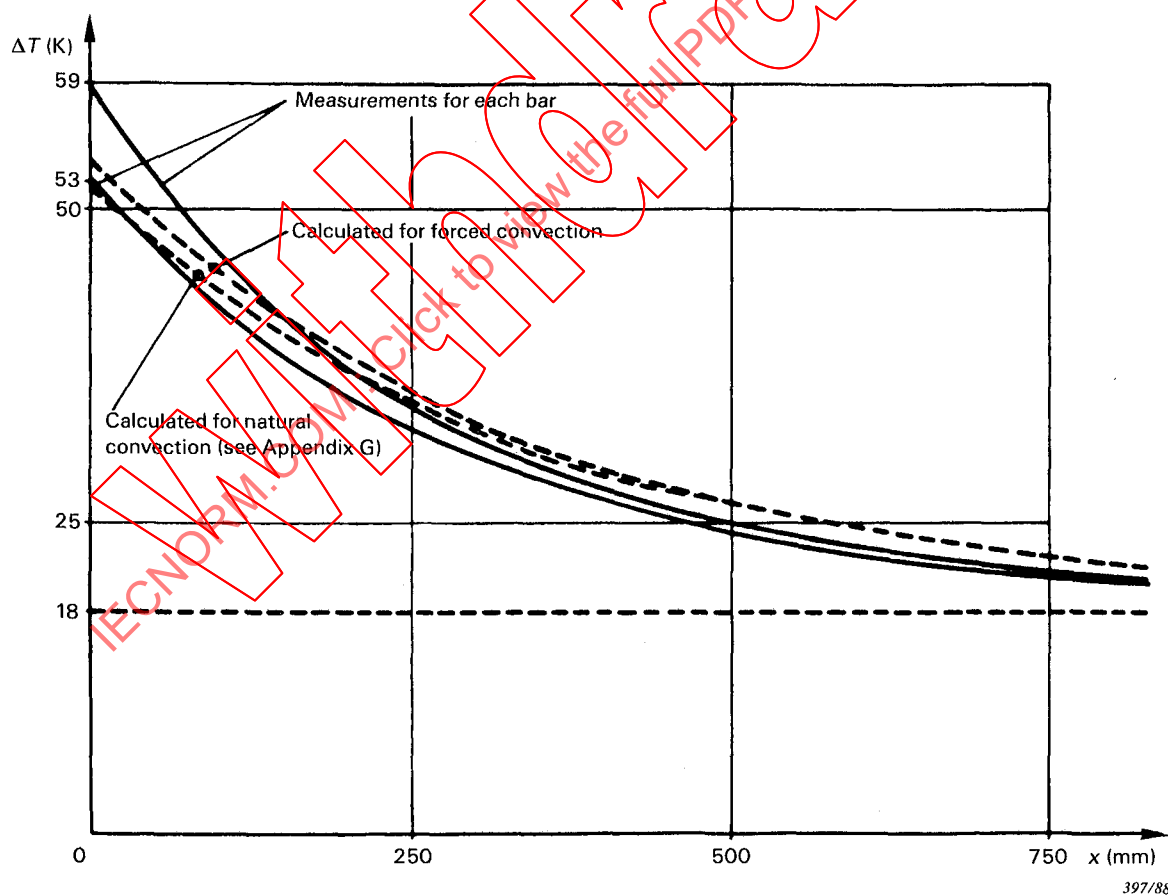


FIG. 22. — Temperature rise as a function of the distance from the ends of the bars (2 bars $40 \times 5.1 = 630$ A).

Si l'on ne dispose que des courbes de température relevées en essai et données à la figure 22, on procède comme suit:

- pour une barre, l'échauffement à $x = 0$ est $\Delta T_0 = 41$ K avec une constante spatiale Δx de 0,27 m;
- pour l'autre barre, on obtient $\Delta T_0 = 35$ K avec $\Delta x = 0,28$ m.

L'énergie transmise à la barre par la borne est (voir paragraphe 5.4.1, formule (28)):

$$W = \frac{\Delta T_0 \lambda_c S}{\Delta x}$$

soit, avec $\lambda_c = 380 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ et $S = 200 \times 10^{-6} \text{ m}^2$:

$W = 11,5$ watts pour une barre et $W = 9,85$ watts pour l'autre, valeurs voisines de la valeur théorique de 8 watts prise dans les calculs.

Le gradient de température à la borne est donné par:

$$\left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0} = - \frac{\Delta T_0}{\Delta x}$$

soit: $-0,15$ K/mm pour une barre et $-0,12$ K/mm pour l'autre.

Exemple 2. — Essai d'échauffement sur câble de $5,5 \text{ mm}^2$, $I = 34$ A.

Les essais ont été effectués en faisant varier l'apport de chaleur W de la borne vers le câble, de sorte que trois courbes ont été obtenues (voir figure 23, page 124); les paramètres de celles-ci sont donnés dans le tableau suivant.

N° de courbe	ΔT_0 (K)	Δx (mm)	$\left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0}$ (K/mm)	W (watts)	$\frac{W}{S}$ (W/mm ²)
1	36,5	95	-0,38	-0,807	0,147
2	75	85	-0,88	-1,706	0,310
3	100,5	82,5	-1,22	-2,559	0,465

If we had only the temperature curves recorded on test and given in Figure 22, we would proceed as follows:

- for one bar, the temperature rise at $x = 0$ is $\Delta T_0 = 41$ K with a space constant Δx of 0.27 m;
- for the other bar, we get $\Delta T_0 = 35$ K with $\Delta x = 0.28$ m.

The energy transmitted to the bar by the terminal is (see Sub-clause 5.4.1, Equation (28)):

$$W = \frac{\Delta T_0 \lambda_c S}{\Delta x}$$

i.e., with $\lambda_c = 380 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ and $S = 200 \times 10^{-6} \text{ m}^2$:

$W = 11.5$ watts for 1 bar and $W = 9.85$ watts for the other, which values are close to the theoretical value of 8 watts used in the calculations.

The temperature gradient at the terminal is given by:

$$\left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0} = - \frac{\Delta T_0}{\Delta x}$$

i.e.: -0.15 K/mm for 1 bar and -0.12 K/mm for the other.

Example 2. — Temperature rise test on 5.5 mm^2 cable, $I = 34$ A.

The tests were carried out by varying the amount of heat W from the terminal to the cable, so that three curves were obtained (Figure 23, page 125) the parameters of which are given in the table below:

Curve number	ΔT_0 (K)	Δx (mm)	$\left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0}$ (K/mm)	W (watts)	$\frac{W}{S}$ (W/mm ²)
1	36.5	95	-0.38	-0.807	0.147
2	75	85	-0.88	-1.706	0.310
3	100.5	82.5	-1.22	-2.559	0.465

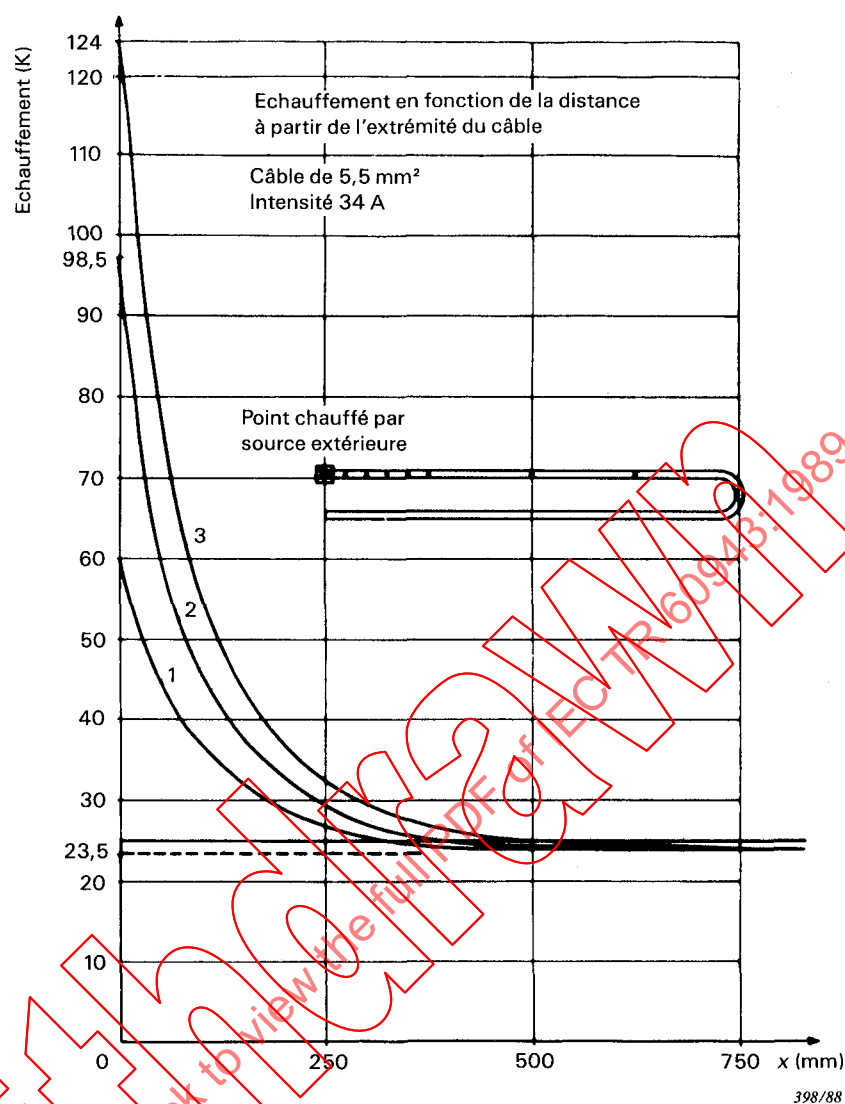


FIG. 23. — Echauffement d'un câble en cuivre de 5,5 mm² en fonction de l'éloignement de la borne, pour trois températures initiales.

Exemple 3. — Câble en aluminium, $S = 50 \text{ mm}^2$

a = recouvert de PRC; b = dénudé.

Résultats d'essais donnés dans la figure 24, page 126.

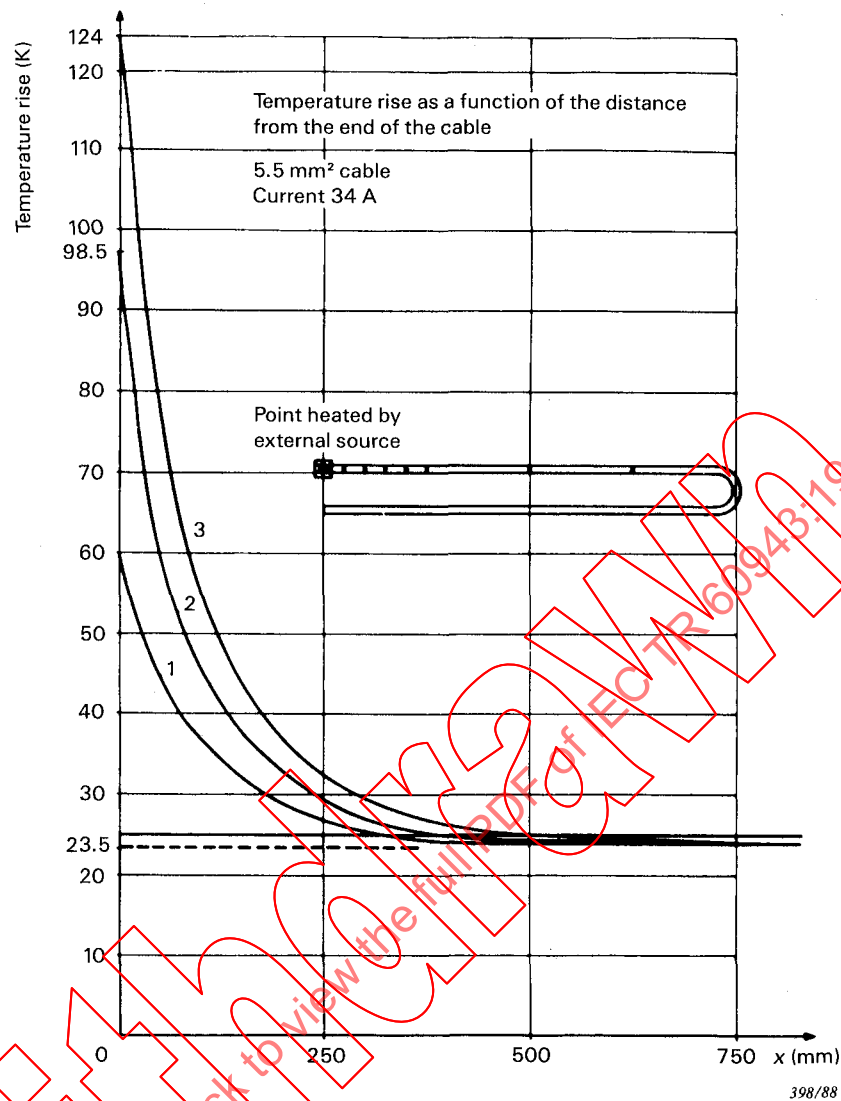


FIG. 23. — Temperature rise of a 5.5 mm² copper cable as a function of distance from the terminal, for three initial temperatures.

Example 3. — Aluminium cable, $S = 50 \text{ mm}^2$

a = PRC coated; b = bare.

Test results are given in Figure 24, page 127.

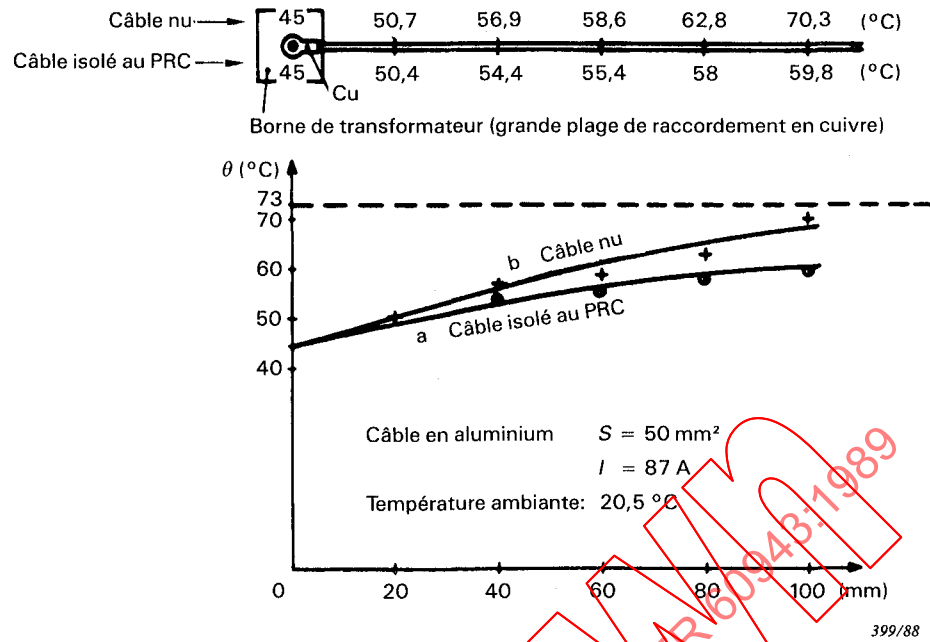


FIG. 24. — Résultats d'essais sur câble en aluminium de 50 mm^2 .

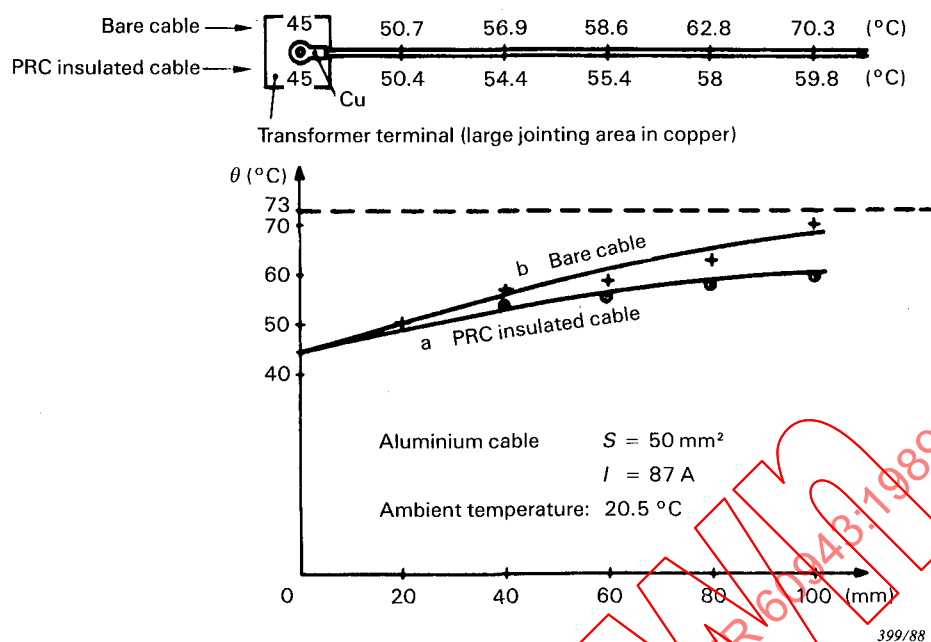
Dans ce cas particulier, c'est la borne du transformateur d'échauffement, de section importante, qui a refroidi le câble. Les paramètres d'échauffement obtenus sont donnés dans le tableau suivant:

Reference de la courbe	ΔT_0 (K)	Δx (mm)	$\left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0}$ (K/cm)	W (watts)	$\frac{W}{S}$ (W/mm ²)
a	-28	125	+0,22	+2,24	0,0448
b	-28	63	+0,44	+4,44	0,0889

Exemple 4. — Câble en aluminium, $S = 50 \text{ mm}^2$

a = recouvert de PRC; b = dénudé.

Résultats d'essais donnés dans la figure 25, page 128.

FIG. 24. — Test results on 50 mm^2 aluminium cable.

In this particular case, it is the terminal of the test transformer with its larger cross-section which has cooled the cable. The temperature rise parameters obtained are given in the following table:

Curve reference mark	ΔT_0 (K)	Δx (mm)	$\left[\frac{d(\Delta T_x)}{dx} \right]_{x \rightarrow 0}$ (K/cm)	W (watts)	$\frac{W}{S}$ (W/mm ²)
a	-28	125	+0.22	+2.24	0.0448
b	-28	63	+0.44	+4.44	0.0889

Example 4. — Aluminium cable, $S = 50 \text{ mm}^2$

a = PRC coated; b = bare.

Test results are given in Figure 25, page 129.