

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEC STANDARD

Publication 287

Deuxième édition — Second edition

1982

Calcul du courant admissible dans les câbles en régime permanent
(facteur de charge 100 %)

Calculation of the continuous current rating of cables
(100 % load factor)



© CEI 1982

Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

3, rue de Varembé

Genève, Suisse

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 (V.E.I.), qui est établie sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini, l'Index général étant publié séparément. Des détails complets sur le V.E.I. peuvent être obtenus sur demande.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit repris du V.E.I., 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 117 de la CEI: Symboles graphiques recommandés.

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit repris des Publications 27 ou 117 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 les pages 3 et 4 de la couverture, qui énumèrent 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 (I.E.V.), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field, the General Index being published as a separate booklet. Full details of the I.E.V. will be supplied on request.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the I.E.V. 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 117: Recommended graphical symbols.

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC Publications 27 or 117, 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 pages 3 and 4 of the cover, which list IEC publications issued by the Technical Committee which has prepared the present publication.

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEC STANDARD

Publication 287

Deuxième édition — Second edition
1982

Calcul du courant admissible dans les câbles en régime permanent
(facteur de charge 100%)

Calculation of the continuous current rating of cables
(100% load factor)

Mots clés: câbles; courant permanent;
calculs; calculs numériques.

Key words: cables; continuous current;
calculations; digital calculations.



© CEI 1982

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 Varembe
Genève, Suisse

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	6
PRÉFACE	6
INTRODUCTION	10

SECTION UN - GÉNÉRALITÉS

Articles

1. Domaine d'application	12
2. Symboles	12
3. Evaluation de l'intensité de courant admissible dans les câbles	18
3.1 Câbles à courant alternatif	18
3.2 Câbles à courant continu jusqu'à 5 kV	20
3.3 Plan de la recommandation	20

SECTION DEUX - CALCUL DES PERTES

4. Résistance de l'âme en courant alternatif	22
4.1 Résistance de l'âme en courant continu	22
4.2 Facteur d'effet de peau y_s	22
4.3 Facteur d'effet de proximité y_p dans le cas de câbles bipolaires ou de deux câbles unipolaires	24
4.4 Facteur d'effet de proximité y_p dans le cas de câbles tripolaires ou de trois câbles unipolaires	24
4.5 Effets de peau et de proximité dans le cas de câbles en tuyau d'acier	26
5. Pertes diélectriques (applicable uniquement aux câbles à courant alternatif)	26
6. Facteur de pertes dans les gaines ou les écrans (applicable uniquement aux câbles à courant alternatif à fréquence industrielle)	26
6.1 Deux câbles unipolaires et trois câbles unipolaires (disposés en trèfle) avec gaines court-circuitées aux deux extrémités d'une section électrique	28
6.2 Trois câbles unipolaires disposés en nappe, régulièrement transposés, avec gaines court-circuitées aux deux extrémités d'une section électrique	28
6.3 Trois câbles unipolaires disposés en nappe, non transposés, avec gaines court-circuitées aux deux extrémités d'une section électrique	30
6.4 Variation de l'écartement des câbles unipolaires entre les points où les gaines sont court-circuitées	30
6.5 Influence des grosses âmes segmentées	32
6.6 Câbles unipolaires avec gaines court-circuitées en un seul point ou permutées	34
6.7 Câbles bipolaires non armés sous gaine commune	36
6.8 Câbles tripolaires non armés sous gaine commune	38
6.9 Câbles bipolaires et tripolaires armés de feuillets d'acier	38
6.10 Câbles triplombs armés	40
6.11 Pertes dans les écrans et les gaines de câbles en tuyau d'acier	40
7. Facteur de pertes dans les armures, les frettages et les tuyaux d'acier (applicable uniquement aux câbles à courant alternatif à fréquence industrielle)	42
7.1 Armure ou frettage non magnétique	42
7.2 Armure ou frettage magnétique	42
7.3 Pertes dans les tuyaux d'acier	50

SECTION TROIS - CALCUL DES RÉSISTANCES THERMIQUES

8. Résistances thermiques des constituants des câbles, T_1 , T_2 et T_3	50
8.1 Résistance thermique entre âme et gaine T_1	50
8.2 Résistance thermique entre gaine et armure T_2	56

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
PREFACE	7
INTRODUCTION	11

SECTION ONE - GENERAL

Clause

1. Scope	13
2. Symbols	13
3. Permissible current rating of cables	19
3.1 A.C. cables	19
3.2 D.C. cables up to 5 kV	21
3.3 Layout of recommendation	21

SECTION TWO - CALCULATION OF LOSSES

4. A.C. resistance of conductor	23
4.1 D.C. resistance of conductor	23
4.2 Skin effect factor y_s	23
4.3 Proximity effect factor y_p for two-core cables and for two single-core cables	25
4.4 Proximity effect factor y_p for three-core cables and for three single-core cables	25
4.5 Skin and proximity effects in pipe-type cables	27
5. Dielectric losses (applicable to a.c. cables only)	27
6. Loss factor for sheath and screen (applicable to power frequency a.c. cables only)	27
6.1 Two single-core cables, and three single-core cables (in trefoil formation), sheaths bonded at both ends of an electrical section	29
6.2 Three single-core cables in flat formation, with regular transposition, sheaths bonded at both ends of an electrical section	29
6.3 Three single-core cables in flat formation, without transposition, sheaths bonded at both ends of an electrical section	31
6.4 Variation of spacing of single-core cables between sheath bonding points	31
6.5 Effect of large segmental type conductors	33
6.6 Single-core cables, with sheaths bonded at a single point or cross-bonded	35
6.7 Two-core unarmoured cables with common sheath	37
6.8 Three-core unarmoured cables with common sheath	39
6.9 Two-core and three-core cables with steel tape armour	39
6.10 Cables with each core in a separate lead sheath (SL type) and armoured	41
6.11 Losses in screens and sheaths of pipe-type cables	41
7. Loss factor for armour, reinforcement and steel pipes (applicable to power frequency a.c. cables only)	43
7.1 Non-magnetic armour or reinforcement	43
7.2 Magnetic armour or reinforcement	43
7.3 Losses in steel pipes	51

SECTION THREE - CALCULATION OF THERMAL RESISTANCES

8. Thermal resistance of the constituent parts of a cable T_1 , T_2 and T_3	51
8.1 Thermal resistance between one conductor and sheath T_1	51
8.2 Thermal resistance between sheath and armour T_2	57

Articles	Pages
8.3 Résistance thermique du revêtement externe T_3	56
8.4 Cas des câbles en tuyau	58
9. Résistance thermique extérieure T_4	58
9.1 Câbles posés à l'air libre	58
9.2 Un seul câble enterré	62
9.3 Groupe de câbles enterrés (non jointifs)	62
9.4 Groupes de câbles enterrés (jointifs) uniformément chargés	66
9.5 Tuyaux enterrés	68
9.6 Câbles en caniveaux enterrés	70
9.7 Câbles en fourreaux ou en tuyaux	70
TABLEAUX	74
ANNEXE A - Valeurs des températures ambiantes de référence et résistivités thermiques des sols dans divers pays	84
ANNEXE B - Informations exigées de l'acheteur pour permettre la sélection du type approprié de câble	104
ANNEXE C - Calcul numérique des quantités indiquées sous forme de graphiques dans les figures 2 à 6	108
ANNEXE D - Calcul graphique de $\Delta\theta_s$ (figure 8)	116
FIGURES	118

Clause	Page
8.3 Thermal resistance of outer covering (serving) T_3	57
8.4 Pipe-type cables	59
9. External thermal resistance T_4	59
9.1 Cables laid in free air	59
9.2 Single isolated buried cable	63
9.3 Groups of buried cables (not touching)	63
9.4 Groups of buried cables (touching) equally loaded	67
9.5 Buried pipes	69
9.6 Cables in buried troughs	71
9.7 Cables in ducts or pipes	71
TABLES	75
APPENDIX A – Reference ambient temperatures and thermal resistivities of soil in various countries	85
APPENDIX B – Information required from the purchaser for the selection of the appropriate type of cable	105
APPENDIX C – Digital calculation of quantities given graphically in Figures 2 to 6	109
APPENDIX D – Calculation of $\Delta\theta_s$ by means of a diagram (Figure 8)	117
FIGURES	118

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**CALCUL DU COURANT ADMISSIBLE
DANS LES Câbles EN RÉGIME PERMANENT
(FACTEUR DE CHARGE 100%)**

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

La présente norme a été établie par le Sous-Comité 20A: Câbles de haute tension, du Comité d'Etudes N° 20 de la CEI: Câbles électriques.

Un projet fut diffusé aux Comités nationaux suivant la Procédure Accélérée en février 1980.

A la suite de la réunion tenue à Florence en 1980, un projet, document 20A(Bureau Central)75, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en septembre 1980.

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

Allemagne	Espagne	Pays-Bas
Australie	Etats Unis d'Amérique	République Démocratique
Autriche	Finlande	Allemande
Belgique	France	Royaume-Uni
Brésil	Irlande	Suède
Bulgarie	Italie	Suisse
Canada	Japon	Turquie
Danemark	Norvège	Union des Républiques
Egypte	Nouvelle-Zélande	Socialistes Soviétiques

La première édition de cette norme était basée sur l'annexe 1 du rapport C.I.G.R.É. n° 233 de 1964 - rapport sur les travaux du Comité d'Etudes n° 2 de la C.I.G.R.É. sur les câbles à haute tension. Son but était de recommander une méthode complète de calcul de la capacité de transport des câbles d'énergie selon le critère thermique, indépendamment des considérations relatives à la charge économique.

La première édition (1969) recommandait des formules choisies parmi celles qui avaient été publiées antérieurement dans divers pays et qui conciliaient au mieux théorie et facilité d'application. Dans les années suivantes, quatre modifications et un supplément furent publiés et une modification supplémentaire fut mise en circulation pour être discutée. Ces modifications ont permis d'étendre les recommandations de ce document à une plus large gamme de types de câble et, dans certains cas, d'améliorer le degré de précision.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**CALCULATION OF THE CONTINUOUS CURRENT
RATING OF CABLES
(100% LOAD FACTOR)**

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 standard has been prepared by Sub-Committee 20A: High-voltage Cables, of IEC Technical Committee No. 20: Electric Cables.

A draft was submitted to the National Committees following the Accelerated Procedure in February 1980.

Following the meeting held in Florence in 1980, a draft, Document 20A(Central Office)75, was submitted to the National Committees for their approval under the Six Months' Rule in September 1980.

The National Committees of the following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia	France	Norway
Austria	German Democratic	Spain
Belgium	Republic	Sweden
Brazil	Germany	Switzerland
Bulgaria	Ireland	Turkey
Canada	Italy	Union of Soviet
Denmark	Japan	Socialist Republics
Egypt	Netherlands	United Kingdom
Finland	New Zealand	United States of America

The first edition of this standard was based on Appendix I of C.I.G.R.É. Report No. 233, 1964 (Report on the work of C.I.G.R.É., Study Committee No. 2 on High-voltage Cables). It was prepared with a view to recommending a complete method of calculation of the current rating of power cables on the basis of the thermal criterion, independent of considerations of economic loading.

The first edition (1969) recommended formulae, chosen from those previously published in various countries, which best combined compliance with theory and ease of application. In the succeeding years four amendments and one supplement have been issued, and a further amendment circulated for comment. These amendments have made the document applicable over a wider range of cable types and in some instances have improved accuracy.

Autres publications de la CEI citées dans la présente norme:

- Publications n^{os} 27: Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique.
28: Spécification internationale d'un cuivre-type recuit.
111: Recommandation concernant la résistivité des fils en aluminium écroui dur industriel pour conducteurs électriques.
141: Essais de câbles à huile fluide, à pression de gaz et de leurs dispositifs accessoires.
183: Guide au choix des câbles à haute tension.
228: Ames des câbles isolés.
502: Câbles de transport d'énergie isolés par diélectriques massifs extrudés pour des tensions assignées de 1 kV à 30 kV.

Withdawn
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60287:1982

Other IEC publications quoted in this standard:

- Publications Nos. 27: Letter Symbols to be Used in Electrical Technology.
28: International Standard of Resistance for Copper.
111: Recommendation for the Resistivity of Commercial Hard-drawn Aluminium Electrical Conductor Wire.
141: Tests on Oil-filled and Gas-pressure Cables and Their Accessories.
183: Guide to the Selection of High-voltage Cables.
228: Conductors of Insulated Cables.
502: Extruded Solid Dielectric Insulated Power Cables for Rated Voltages from 1 kV up to 30 kV.

Withdawn
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60287:1982

CALCUL DU COURANT ADMISSIBLE DANS LES CÂBLES EN RÉGIME PERMANENT (FACTEUR DE CHARGE 100%)

INTRODUCTION

Cette deuxième édition a pour but de réunir en un seul document les modifications précédentes ainsi que le supplément, d'incorporer d'autres formules plus précises et d'introduire dans la publication le système d'unités international. On a également saisi l'occasion pour revenir, lorsque cela était possible, à la forme fondamentale des équations afin d'indiquer l'origine des constantes numériques. L'amélioration de la précision est limitée, mais l'utilisation quasi universelle des calculateurs de poche, de bureau et des ordinateurs numériques permettent une plus grande facilité d'emploi. Afin d'aider l'utilisateur à calculer les régimes permanents au moyen de calculateurs numériques, les formules et les méthodes appropriées au calcul numérique des données graphiques de cette publication sont exposées dans le tableau V, page 80, et l'annexe C.

Les formules de cette publication contiennent des paramètres variant avec la spécification du câble et les matériaux utilisés. Les valeurs données dans les tableaux sont soit approuvées internationalement, comme les résistivités électriques et la constante diélectrique des matériaux, ou bien généralement acceptées dans la pratique, comme les résistivités thermiques et les permittivités des matériaux. Certaines des valeurs de la dernière catégorie ne sont pas caractéristiques de la qualité des câbles neufs mais de celle des câbles ayant déjà subi une longue période d'utilisation. Dans le but d'obtenir des résultats comparables et reproductibles, les régimes permanents doivent être calculés avec les valeurs indiquées dans la présente norme. Toutefois, lorsqu'on sait avec certitude que d'autres valeurs sont plus appropriées aux matériaux et à leur mise en œuvre, ces dernières peuvent alors être utilisées en déclarant le régime permanent correspondant, pourvu que les différentes valeurs soient indiquées.

Les données relatives aux conditions de service sont susceptibles de varier considérablement d'un pays à l'autre. Par exemple, pour ce qui est de la température ambiante et de la résistance thermique du sol, les valeurs sont régies dans les différents pays par diverses considérations. Une comparaison hâtive entre les valeurs utilisées dans les différents pays peut amener des conclusions erronées, si elle n'est pas faite sur des bases communes; par exemple, on peut compter sur des espérances de vie du câble différentes; de même, dans certains pays, la spécification est établie sur la valeur maximale de la résistance thermique du sol, tandis que dans d'autres c'est la valeur moyenne qui est utilisée. En particulier, dans le cas de la résistivité thermique du sol, il est bien connu que celle-ci est très sensible au taux d'humidité et peut varier sensiblement dans le temps suivant le type de sol, les conditions topographiques et météorologiques et la charge du câble.

Le choix des valeurs des différents paramètres sera dès lors effectué de la façon suivante:

Les valeurs numériques devront, de préférence, être basées sur des résultats de mesures valables. De tels résultats sont déjà souvent inclus dans les spécifications nationales sous forme de valeurs recommandées, de telle sorte que le calcul peut être exécuté sur la base de ces valeurs, généralement utilisées dans le pays en question; un examen de ces valeurs est fait à l'annexe A.

On trouvera un choix d'informations nécessaires pour sélectionner le type de câble approprié à l'annexe B.

CALCULATION OF THE CONTINUOUS CURRENT RATING OF CABLES (100% LOAD FACTOR)

INTRODUCTION

This second edition has been produced to consolidate the previous amendments and the supplement into one document, to incorporate further more accurate formulae, and to introduce SI units into the publication. The opportunity has also been taken to revert, where applicable, to the fundamental form of the equations so as to show the origin of the numerical constants. The improvement in accuracy is only small, but there is some improvement in convenience with the now almost universal use of hand, desk and large digital computers. To aid the user in the application of digital computers for current rating calculations, formulae and methods suitable for digital calculation of the quantities given graphically in this publication are set out in Table V, page 81, and Appendix C.

The formulae recommended in this publication contain quantities which vary with cable design and materials used. The values given in the tables are either internationally agreed, for example, electrical resistivities and resistance temperature coefficients, or are those which are generally accepted in practice, for example, thermal resistivities and permittivities of materials. In this latter category, some of the values given are not characteristic of the quality of new cables but are considered to apply to cables after a long period of use. In order that uniform and comparable results may be obtained, the current ratings should be calculated with the values given in this standard. However, where it is known with certainty that other values are more appropriate to the materials and design, then these may be used, and the corresponding current rating declared in addition, provided that the different values are quoted.

Quantities related to the operating conditions of cables are liable to vary considerably from one country to another. For instance, with respect to the ambient temperature and soil thermal resistivity, the values are governed in various countries by different considerations. Superficial comparisons between the values used in the various countries may lead to erroneous conclusions if they are not based on common criteria: for example, there may be different expectations for the life of the cables, and in some countries design is based on maximum values of soil thermal resistivity, whereas in others average values are used. Particularly, in the case of soil thermal resistivity, it is well known that this quantity is very sensitive to soil moisture content and may vary significantly with time, depending on the soil type, the topographical and meteorological conditions, and the cable loading.

The following procedure for choosing the values for the various parameters should, therefore, be adopted:

Numerical values should preferably be based on results of suitable measurements. Often such results are already included in national specifications as recommended values, so that the calculation may be based on these values generally used in the country in question; a survey of such values is given in Appendix A.

A suggested list of the information required to select the appropriate type of cable is given in Appendix B.

En ce qui concerne l'utilisation du système d'unités international, quelques exceptions à la règle habituelle ont été faites pour éviter des valeurs numériques démesurées et afin de satisfaire aux nombreuses normes nationales. Ainsi le mètre a été choisi comme unité de référence de longueur de câble alors que toutes les dimensions radiales, telles l'épaisseur d'isolant et la profondeur de pose, doivent être exprimées en millimètres. La seule exception se trouve au paragraphe 9.1 où le diamètre extérieur du câble doit être exprimé en mètres pour être cohérent avec la dissipation de la chaleur par unité de surface.

SECTION UN — GÉNÉRALITÉS

1. Domaine d'application

Cette norme concerne uniquement le fonctionnement en régime permanent des câbles de toutes tensions alternatives et de tensions continues jusqu'à 5 kV, enterrés directement dans le sol, placés dans des fourreaux, caniveaux ou tubes d'acier, ainsi que les câbles posés à l'air libre. On entend par «régime permanent» la circulation continue d'un courant constant (facteur de charge 100%) juste suffisant pour atteindre asymptotiquement la température maximale du conducteur en supposant que les conditions du milieu ambiant restent inchangées.

Les formules proposées sont essentiellement littérales et laissent en principe libre le choix de certains paramètres importants. Ceux-ci peuvent être divisés en trois groupes:

- les paramètres liés à la constitution du câble (par exemple résistance thermique de l'isolant) pour lesquels des valeurs représentatives ont été recueillies, à partir des travaux publiés;
- les paramètres liés aux conditions du milieu, qui peuvent varier considérablement; le choix de ceux-ci dépend du pays où les câbles sont ou doivent être utilisés;
- les paramètres résultant d'un accord entre fabricant et utilisateur et qui supposent une marge de sécurité en service (par exemple température maximale du conducteur).

2. Symboles

Note. — Ces symboles sont ceux qui sont utilisés dans l'annexe 1 du rapport C.I.G.R.É. n° 233 de 1964 et ne sont pas toujours conformes à ceux qui sont recommandés par la Publication 27 de la CEI: Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique.

Les symboles utilisés dans la présente norme et les grandeurs qu'ils représentent sont donnés dans la liste suivante:

A	= section droite de l'armure	mm ²
B_1 B_2	} = coefficients (voir paragraphe 7.2)	
C		
D'_a	= diamètre extérieur de l'armure	mm
D_d	= diamètre intérieur du fourreau	mm
D_e	= diamètre extérieur du câble ou diamètre équivalent d'un groupe de conducteurs isolés pour un câble en tuyau	mm
D_e^*	= diamètre extérieur du câble (voir paragraphe 9.1)	m
D_i	= diamètre sur isolant	mm
D_o	= diamètre extérieur du fourreau	mm
D_s	= diamètre extérieur de la gaine métallique	mm
D_{oc}	= diamètre du cylindre imaginaire coaxial à la gaine ondulée et tangent à la surface extérieure des crêtes	mm
D_{ot}	= diamètre du cylindre imaginaire coaxial à la gaine ondulée et tangent à la surface extérieure des creux $D_{it} + 2t_s$	mm

In introducing SI units, slight deviations from normal practice have been incorporated to avoid inconvenient sizes for some numerical values and to correspond to the practices of many national standards. Thus the metre has been adopted as the standard unit of cable length, but all radial dimensions, such as insulation thickness and depth of burial are to be expressed in millimetres. The one exception is in Sub-clause 9.1 where the external diameter of the cable must be expressed in metres to be consistent with the heat dissipation per unit surface area of the cable.

SECTION ONE — GENERAL

1. Scope

This standard deals solely with the condition of steady-state operation of cables at all alternating voltages, and direct voltages up to 5 kV, buried directly in the ground, in ducts, troughs or in steel pipes, as well as cables in air. The term "steady state" is intended to mean a continuous constant current (100% load factor) just sufficient to produce asymptotically the maximum conductor temperature, the surrounding ambient conditions being assumed constant.

The formulae given are essentially literal and designedly leave open the selection of certain important parameters. These may be divided into three groups:

- parameters related to construction of a cable (for example, thermal resistivity of insulating material) for which representative values have been selected based on published work;
- parameters related to the surrounding conditions which may vary widely the selection of which depends on the country in which the cables are used or are to be used;
- parameters which result from an agreement between manufacturer and user and which involve a margin for security of service (for example, maximum conductor temperature).

2. Symbols

Note. — These symbols are those used in Appendix 1 of C.I.G.R.É. Report No. 233, 1964, and are not the same in every case as those recommended in IEC Publication 27: Letter Symbols to be Used in Electrical Technology.

The symbols used in this standard and the quantities which they represent are given in the following list:

A	= cross-sectional area of the armour	mm ²
B_1 B_2	= coefficients used in Sub-clause 7.2	
C	= capacitance per core	F/m
D'_a	= external diameter of armour	mm
D_d	= internal diameter of duct	mm
D_e	= external diameter of cable, or equivalent diameter of a group of cores in pipe-type cable	mm
D_e^*	= external diameter of cable (used in Sub-clause 9.1)	m
D_i	= diameter over insulation	mm
D_o	= external diameter of duct	mm
D_s	= external diameter of metal sheath	mm
D_{oc}	= the diameter of the imaginary coaxial cylinder which just touches the crests of a corrugated sheath	mm
D_{ot}	= the diameter of the imaginary coaxial cylinder which would just touch the outside surface of the troughs of a corrugated sheath = $D_{it} + 2t_s$	mm

D_{ic}	= diamètre du cylindre imaginaire coaxial à la gaine ondulée et tangent à la surface intérieure des crêtes = $D_{oc} - 2t_s$	mm
D_{it}	= diamètre du cylindre imaginaire coaxial à la gaine ondulée et tangent à la surface intérieure des creux	mm
E	= constante (voir paragraphe 9.1.1)	
F	= coefficient défini au paragraphe 6.5	
F_1	= coefficient pour les câbles à ceinture défini au paragraphe 8.1.2.2	
F_2	= coefficient pour les câbles à ceinture défini au paragraphe 8.1.2.5	
G	= facteur géométrique pour câbles à ceinture	
$\bar{G}$	= facteur géométrique des câbles triplombs	
H	= intensité des radiations solaires (paragraphe 9.1.2)	W/m ²
H	= force magnétisante (paragraphe 7.2)	ampère-tours/m
H_s	= inductance de la gaine	H/m
H_1 H_2 H_3 }	= composantes de l'inductance due aux fils d'acier (voir paragraphe 7.2)	H/m
I	= intensité du courant dans une âme (valeur efficace)	A
K	= facteur d'écran pour la résistance thermique des câbles métallisés	
K_A	= coefficient (voir paragraphe 9.1)	
L	= profondeur de pose mesurée au centre du câble ou de la formation en trèfle	mm
L_G	= distance de la surface du sol au centre du bloc de fourreaux	mm
M N }	= coefficients définis au paragraphe 6.5	
N	= nombre de câbles chargés dans un bloc de fourreaux (voir paragraphe 9.7.3)	
P Q }	= coefficients définis au paragraphe 6.3	ohm/m
R	= résistance électrique de l'âme en courant alternatif à sa température maximale de service	ohm/m
R_A	= résistance de l'armure	ohm/m
R_s	= résistance de la gaine	ohm/m
R'	= résistance électrique de l'âme en courant continu à la température maximale de service	ohm/m
R_o	= résistance électrique de l'âme en courant continu à 20 °C	ohm/m
T_1	= résistance thermique par phase entre âme et gaine métallique ou écran	K.m/W
T_2	= résistance thermique entre gaine métallique ou écran et armure	K.m/W
T_3	= résistance thermique du revêtement externe	K.m/W
T_4	= résistance thermique du milieu extérieur (rapport de l'échauffement de la surface du câble au-dessus de l'ambiante aux pertes totales par unité de longueur)	K.m/W
T_4^*	= résistance thermique du milieu extérieur à l'air libre tenant compte du rayonnement solaire	K.m/W
T_4'	= résistance thermique entre câble et fourreau (ou tuyau)	K.m/W
T_4''	= résistance thermique du fourreau (ou tuyau)	K.m/W
T_4'''	= résistance thermique de l'environnement du fourreau (ou tuyau)	K.m/W
U_o	= tension entre âme et écran ou gaine	V
U V }	= constantes utilisées au paragraphe 9.7.1	
W_A	= pertes dissipées dans l'armure par unité de longueur	W/m
W_c	= pertes dissipées dans l'âme par unité de longueur	W/m
W_d	= pertes diélectriques par unité de longueur et par phase	W/m
W_k	= pertes dissipées par le câble k	W/m
W_s	= pertes dissipées dans la gaine par unité de longueur	W/m
$W_{(s+A)}$	= pertes totales dissipées dans la gaine et l'armure par unité de longueur	W/m
W_{TOT}	= puissance totale dissipée dans un caniveau par unité de longueur	W/m
X	= réactance de la gaine quand les câbles sont disposés en trèfle	ohm/m
X_1	= réactance de la gaine quand les câbles sont disposés en nappe	ohm/m
X_m	= réactance mutuelle entre la gaine d'un câble et les âmes des deux autres lorsque les câbles sont posés en nappe	ohm/m
Y	= constante utilisée au paragraphe 9.7.1	
Z	= constante utilisée au paragraphe 9.1.1	
a	= plus petite longueur d'une section électrique à permutation d'écran ayant des longueurs différentes	

D_{ic}	= the diameter of the imaginary cylinder which would just touch the inside surface of the crests of a corrugated sheath = $D_{oc} - 2t_s$	mm
D_{it}	= the diameter of the imaginary cylinder which just touches the inside surface of the troughs of a corrugated sheath	mm
E	= constant used in Sub-clause 9.1.1	
F	= coefficient defined in Sub-clause 6.5	
F_1	= coefficient for belted cables defined in Sub-clause 8.1.2.2	
F_2	= coefficient for belted cables defined in Sub-clause 8.1.2.5	
G	= geometric factor for belted cables	
$\bar{G}$	= geometric factor for SL and SA type cables	
H	= intensity of solar radiation (Sub-clause 9.1.2)	W/m ²
H	= magnetizing force (Sub-clause 7.2)	ampere turns/m
H_s	= inductance of sheath	H/m
H_1 H_2 H_3 }	= components of inductance due to the steel wires (Sub-clause 7.2)	H/m
I	= current in one conductor (r.m.s. value)	A
K	= screening factor for the thermal resistance of screened cables	
K_A	= coefficient used in Sub-clause 9.1	
L	= depth of laying, to cable axis or centre of trefoil	mm
L_G	= distance from the soil surface to the centre of a duct bank	mm
M N }	= coefficients defined in Sub-clause 6.5	
N	= number of loaded cables in a duct bank (Sub-clause 9.7.3)	
P Q }	= coefficients defined in Sub-clause 6.3	ohm/m
R	= alternating current resistance of conductor at its maximum operating temperature	ohm/m
R_A	= resistance of armour	ohm/m
R_s	= resistance of sheath	ohm/m
R'	= d.c. resistance of conductor at maximum operating temperature	ohm/m
R_0	= d.c. resistance of conductor at 20 °C	ohm/m
T_1	= thermal resistance per core between conductor and sheath	K.m/W
T_2	= thermal resistance between sheath and armour	K.m/W
T_3	= thermal resistance of external serving	K.m/W
T_4	= thermal resistance of surrounding medium (ratio of cable surface temperature rise above ambient to the losses per unit length)	K.m/W
T_4^*	= external thermal resistance in free air, adjusted for solar radiation	K.m/W
T_4'	= thermal resistance between cable and duct (or pipe)	K.m/W
T_4''	= thermal resistance of the duct (or pipe)	K.m/W
T_4'''	= thermal resistance of the medium surrounding the duct (or pipe)	K.m/W
U_0	= voltage between conductor and screen or sheath	V
U V }	= constants used in Sub-clause 9.7.1	
W_A	= losses in armour per unit length	W/m
W_c	= losses in conductor per unit length	W/m
W_d	= dielectric losses per unit length per phase	W/m
W_k	= losses dissipated by cable k	W/m
W_s	= losses dissipated in sheath per unit length	W/m
$W_{(s+A)}$	= total losses in sheath and armour per unit length	W/m
W_{TOT}	= total power dissipated in the trough per unit length	W/m
X	= reactance of sheath (two-core cables and three-core cables in trefoil)	ohm/m
X_1	= reactance of sheath (cables in flat formation)	ohm/m
X_m	= mutual reactance between the sheath of one cable and the conductors of the other two when cables are in flat formation	ohm/m
Y	= coefficient used in Sub-clause 9.7.1	
Z	= coefficient used in Sub-clause 9.1.1	
a	= shortest minor length in a cross-bonded electrical section having unequal minor lengths	

c	= distance entre les axes des âmes et l'axe du câble ($=0,55 r_1 + 0,29 t$ pour les âmes sectoriales)	mm
d	= diamètre moyen de la gaine ou de l'écran	mm
d'	= diamètre moyen de la gaine et du fretage	mm
d_2	= diamètre moyen du fretage	mm
d_A	= diamètre moyen de l'armure	mm
d_a	= diamètre extérieur de la ceinture isolante	mm
d_c	= diamètre extérieur de l'âme	mm
d_{cm}	= plus petit diamètre d'une âme ovale	mm
d_{cM}	= plus grand diamètre d'une âme ovale	mm
d'_c	= diamètre extérieur de l'âme massive ronde, ayant le même canal central qu'une âme creuse	mm
d_d	= diamètre intérieur du tuyau	mm
d_f	= diamètre d'un fil d'acier	mm
d_i	= diamètre intérieur d'une âme creuse	mm
d_M	= plus grand diamètre d'écran ou de gaine d'une âme ovale	mm
d_m	= plus petit diamètre d'écran ou de gaine d'une âme ovale	mm
d_x	= diamètre d'une âme circulaire équivalente ayant la même section et le même degré de rétreint que l'âme sectoriale	mm
f	= fréquence du réseau	
g	= coefficient utilisé au paragraphe 9.1.1	
g_s	= coefficient utilisé au paragraphe 6.6.1	
h	= coefficient de dissipation de chaleur	W/m ² K ^{5/4}
k	= facteur utilisé pour le calcul des pertes par hystérésis dans les armures ou frettages (voir paragraphe 7.2.4)	
k_p	= facteur utilisé dans le calcul de x_p (effet de proximité)	
k_s	= facteur utilisé dans le calcul de x_s (effet de peau)	
l	= longueur d'une section de câble (symbole général, voir article 6 et paragraphe 6.4)	m
$\ln$	= logarithme naturel (logarithme en base e)	
m	= $\frac{\omega}{R_s} 10^{-7}$	
n	= nombre d'âmes dans un câble	
n_1	= nombre de fils d'acier dans un câble (voir paragraphe 7.2)	
p	= partie du périmètre du caniveau qui participe à la dissipation de chaleur (paragraphe 9.6.2)	m
p	= pas d'assemblage d'un fil d'acier sur un câble (paragraphe 7.2)	
p, q	= coefficients utilisés au paragraphe 6.6.2	
r_1	= rayon du cercle circonscrit aux deux ou trois âmes sectoriales dans un câble bipolaire ou tripolaire	mm
s	= distance entre axes des âmes	mm
s_1	= distance entre axes de deux câbles adjacents dans une nappe horizontale de trois câbles non jointifs	mm
s_2	= séparation axiale des câbles (paragraphe 7.2)	mm
t	= épaisseur d'isolant entre âmes	mm
t_1	= épaisseur d'isolant entre âmes et gaine	mm
t_2	= épaisseur du bourrage ou du revêtement	mm
t_3	= épaisseur du revêtement externe	mm
t_i	= épaisseur de l'enveloppe isolante d'une phase y compris les rubans métallisés plus la moitié de l'épaisseur de tous les rubans non métalliques sur l'ensemble des phases	mm
t_s	= épaisseur de la gaine	
u	= $\frac{2L}{D_e}$ dans le paragraphe 9.2	
u	= $\frac{LG}{r_b}$ dans le paragraphe 9.7.3	
x_p	= argument de la fonction de Bessel, utilisé dans le calcul de l'effet de proximité	
x_s	= argument de la fonction de Bessel, utilisé dans le calcul de l'effet de peau	
x, y	= côtés d'un bloc de fourreaux ($y > x$) (paragraphe 9.7.3)	mm
y_p	= facteur d'effet de proximité	} (article 4)
y_s	= facteur d'effet de peau	

c	= distance between the axes of conductors and the axis of the cable for 3-core cables ($= 0.55 r_1 + 0.29 t$ for sector-shaped conductors)	mm
d	= mean diameter of sheath or screen	mm
d'	= mean diameter of sheath and reinforcement	mm
d_2	= mean diameter of reinforcement	mm
d_A	= mean diameter of armour	mm
d_a	= external diameter of belt insulation	mm
d_c	= external diameter of conductor	mm
d_{cm}	= minor diameter of an oval conductor	mm
d_{cM}	= major diameter of an oval conductor	mm
d'_c	= external diameter of equivalent round solid conductor having the same central duct as a hollow conductor	mm
d_d	= internal diameter of pipe	mm
d_f	= diameter of a steel wire	mm
d_i	= internal diameter of hollow conductor	mm
d_M	= major diameter of screen or sheath of an oval conductor	mm
d_m	= minor diameter of screen or sheath of an oval conductor	mm
d_x	= diameter of an equivalent circular conductor having the same cross-sectional area and degree of compactness as the shaped one	mm
f	= system frequency	Hz
g	= coefficient used in Sub-clause 9.1.1	
g_s	= coefficient used in Sub-clause 6.6.1	
h	= heat dissipation coefficient	$W/m^2K^{5/4}$
k	= factor used in the calculation of hysteresis losses in armour or reinforcement (Sub-clause 7.2.4)	
k_p	= factor used in calculating x_p (proximity effect)	
k_s	= factor used in calculating x_s (skin effect)	
l	= length of a cable section (general symbol, see Clause 6 and Sub-clause 6.4)	m
$\ln$	= natural logarithm (logarithm to base e)	
m	= $\frac{\omega}{R_s} 10^{-7}$	
n	= number of conductors in a cable	
n_1	= number of steel wires in a cable (see Sub-clause 7.2)	
p	= the part of the perimeter of the cable trough which is effective for heat dissipation (Sub-clause 9.6.2)	m
p	= length of lay of a steel wire along a cable (Sub-clause 7.2)	
$\left. \begin{matrix} p \\ q \end{matrix} \right\}$	= coefficients used in Sub-clause 6.6.2	
r_1	= circumscribing radius of two or three-sector shaped conductors	mm
s	= axial separation of conductors	mm
s_1	= axial separation of two adjacent cables in a horizontal group of three, not touching	mm
s_2	= axial separation of cables (Sub-clause 7.2)	mm
t	= insulation thickness between conductors	mm
t_1	= insulation thickness between conductors and sheath	mm
t_2	= thickness of the bedding	mm
t_3	= thickness of the serving	mm
t_i	= thickness of core insulation, including screening tapes plus half the thickness of any non-metallic tapes over the laid up cores	mm
t_s	= thickness of the sheath	
u	= $\frac{2L}{D_e}$ in Sub-clause 9.2	
u	= $\frac{LG}{r_b}$ in Sub-clause 9.7.3	
x_p	= argument of a Bessel function used to calculate proximity effect	
x_s	= argument of a Bessel function used to calculate skin effect	
x, y	= sides of duct bank ($y > x$) (Sub-clause 9.7.3)	mm
y_p	= proximity effect factor	} (Clause 4)
y_s	= skin effect factor	

α_{20}	= coefficient de variation de la résistance électrique avec la température à 20°C, par kelvin	1/K
β	= angle formé par l'axe d'un fil d'armure et l'axe du câble (paragraphe 7.2)	
β_1	= coefficient utilisé au paragraphe 6.6.1	
γ	= déphasage (paragraphe 7.2)	
Δ_1, Δ_2	= coefficients utilisés au paragraphe 6.6.1	
δ	= épaisseur équivalente de l'armure ou du fretage	mm
δ_1	= épaisseur de l'écran métallique des câbles métallisés	mm
$\text{tg } \delta$	= facteur de pertes de l'isolant	
ϵ	= permittivité relative de l'isolant	
θ	= température maximale de service de l'âme	°C
θ_m	= température moyenne du milieu entre câble et fourreau ou tuyau	°C
$\Delta\theta$	= échauffement admissible à l'âme par rapport à la température ambiante	K
$\Delta\theta_d$	= facteur tenant compte des pertes diélectriques dans le calcul de T_4 pour des câbles posés à l'air libre	K
$\Delta\theta_{ds}$	= facteur tenant compte des pertes diélectriques et du rayonnement solaire direct pour le calcul de T_4^* pour des câbles posés à l'air libre selon la figure 8, page 127	K
$\Delta\theta_{\text{duct}}$	= différence entre la température moyenne de l'air dans un fourreau et la température ambiante	K
$\Delta\theta_s$	= échauffement de la surface d'un câble posé dans l'air, au-dessus de la température ambiante	K
$\Delta\theta_{tr}$	= échauffement de l'air dans un caniveau de câble	K
λ_0	= coefficient utilisé au paragraphe 6.6.1	
λ_1, λ_2	= rapport des pertes totales dans les gaines métalliques et armures respectivement aux pertes totales des âmes (ou pertes dans une gaine ou armure aux pertes dans une âme)	
λ'_1	= rapport des pertes dans une gaine produites par les courants de circulation dans la gaine aux pertes dans une âme	
λ''_1	= rapport des pertes dans une gaine produites par les courants de Foucault aux pertes dans une âme	
λ'_{1m}	= facteur de perte du câble médian	Trois câbles posés en nappe non transposés avec gaines court-circuitées aux deux extrémités.
λ'_{11}	= facteur de perte du câble extérieur ayant les pertes les plus importantes	
λ'_{12}	= facteur de perte du câble extérieur ayant les pertes les plus faibles	
μ	= perméabilité magnétique relative du matériau constituant l'armure	
μ_e	= perméabilité relative longitudinale	
μ_t	= perméabilité relative transversale	
ρ	= résistivité de l'âme à 20°C	ohm·m
ρ_e	= résistivité thermique du sol entourant un bloc de fourreaux	K.m/W
ρ_c	= résistivité thermique du béton constituant le bloc de fourreaux	K.m/W
ρ_m	= résistivité thermique des écrans métalliques dans les câbles multipolaires	K.m/W
ρ_s	= résistivité de la gaine à 20°C	ohm/m
ρ_T	= résistivité thermique du matériau	K.m/W
σ	= coefficient d'absorption des rayons solaires par la surface du câble	
ω	= pulsation (fréquence angulaire $2\pi f$)	1/s

3. Evaluation de l'intensité du courant admissible dans les câbles

3.1 Câbles à courant alternatif

L'intensité du courant admissible dans un câble à courant alternatif peut être déduite de l'expression donnant l'échauffement de l'âme au-dessus de la température ambiante:

$$\Delta\theta = (I^2 R + \frac{1}{2} W_d) T_1 + [I^2 R(1 + \lambda_1) + W_d] n T_2 + [I^2 R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] n (T_3 + T_4)$$

α_{20}	= temperature coefficient of electrical resistivity at 20°C, per kelvin	1/K
β	= angle between axis of armour wires and axis of cable (Sub-clause 7.2)	
β_1	= coefficient used in Sub-clause 6.6.1	
γ	= angular time delay (Sub-clause 7.2)	
Δ_1 Δ_2 }	= coefficients used in Sub-clause 6.6.1	
δ	= equivalent thickness of armour or reinforcement	mm
δ_1	= thickness of metallic screens on screened type cables	mm
$\tan \delta$	= loss factor of insulation	
ε	= relative permittivity of insulation	
θ	= maximum operating temperature of conductor	°C
θ_m	= mean temperature of medium between a cable and duct or pipe	°C
$\Delta\theta$	= permissible temperature rise of conductor above the ambient temperature	K
$\Delta\theta_d$	= factor to account for dielectric loss for calculating T_4 for cables in free air	K
$\Delta\theta_{ds}$	= factor to account for both dielectric loss and direct solar radiation for calculating T_4 for cables in free air using Figure 8, page 127	K
$\Delta\theta_{duct}$	= difference between the mean temperature of air in a duct and ambient temperature	K
$\Delta\theta_s$	= difference between the surface temperature of a cable in air and ambient temperature	K
$\Delta\theta_{tr}$	= temperature rise of the air in a cable trough	K
λ_0	= coefficient used in Sub-clause 6.6.1	
λ_1, λ_2	= ratio of the total losses in metallic sheaths and armour respectively to the total conductor losses (or losses in one sheath or armour to the losses in one conductor)	
λ'_1	= ratio of the losses in one sheath caused by circulating currents in the sheath to the losses in one conductor	
λ''_1	= ratio of the losses in one sheath caused by eddy currents to the losses in one conductor	
λ'_{1m}	= loss factor for the middle cable	} Three cables in flat formation without transposition, with sheaths bonded at both ends
λ'_{11}	= loss factor for the outer cable with the greater losses	
λ'_{12}	= loss factor for the outer cable with the least losses	
μ	= relative magnetic permeability of armour material	
μ_e	= longitudinal relative permeability	
μ_t	= transverse relative permeability	
ϱ	= conductor resistivity at 20°C	ohm·m
ϱ_e	= thermal resistivity of earth surrounding a duct bank	K.m/W
ϱ_c	= thermal resistivity of concrete used for a duct bank	K.m/W
ϱ_m	= thermal resistivity of metallic screens on multicore cables	K.m/W
ϱ_s	= sheath resistivity at 20°C	ohm/m
ϱ_T	= thermal resistivity of material	K.m/W
σ	= absorption coefficient of solar radiation for the cable surface	
ω	= angular frequency of system ($2\pi f$)	1/s

3. Permissible current rating of cables

3.1 A.C. cables

The permissible current rating of an a.c. cable can be derived from the expression for the temperature rise above ambient temperature.

$$\Delta\theta = (I^2 R + \frac{1}{2} W_d) T_1 + [I^2 R(1 + \lambda_1) + W_d] n T_2 + [I^2 R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] n (T_3 + T_4)$$

expression dans laquelle les paramètres ont la signification suivante:

I = intensité du courant circulant dans une âme (A)

$\Delta\theta$ = échauffement de l'âme au-dessus de la température ambiante (K)

Note. — La température ambiante est la température du milieu environnant en régime normal à l'endroit où les câbles sont posés ou doivent être posés. Elle comprend les effets de n'importe quelle source de chaleur mais non pas l'élévation de température dans le voisinage immédiat des câbles provenant de la chaleur s'en dégageant.

R = résistance de l'âme en courant alternatif, par unité de longueur, à sa température maximale de service (ohm/m)

W_d = pertes diélectriques, par unité de longueur, de l'isolant entourant l'âme (W/m)

T_1 = résistance thermique, par unité de longueur, entre l'âme et la gaine (K.m/W)

T_2 = résistance thermique, par unité de longueur, entre la gaine et l'armure (K.m/W)

T_3 = résistance thermique, par unité de longueur, du revêtement extérieur du câble (K.m/W)

T_4 = résistance thermique, par unité de longueur, entre la surface du câble et le milieu environnant, telle que déduite de l'article 9 (K.m/W)

n = nombre d'âmes chargées dans le câble (âmes de même section et transportant la même charge)

λ_1 = rapport des pertes dans la gaine métallique aux pertes totales dans toutes les âmes de ce câble.

λ_2 = rapport des pertes dans l'armure aux pertes totales dans toutes les âmes de ce câble.

L'intensité du courant admissible est obtenue de la formule ci-dessus par la formule suivante:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5 T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Lorsque le câble est exposé au rayonnement solaire direct, on doit utiliser les formules données au paragraphe 9.1.2.

L'intensité du courant pour un câble à quatre conducteurs basse tension peut être considérée comme étant égale à l'intensité d'un câble tripolaire pour les mêmes tension et dimension et construction des âmes, à condition que ce câble soit utilisé dans un système triphasé où le quatrième conducteur est soit un conducteur neutre, soit un conducteur de protection. Lorsqu'il s'agit d'un conducteur neutre, l'intensité du courant s'applique à une charge équilibrée.

3.2 Câbles à courant continu jusqu'à 5 kV

L'intensité du courant admissible dans un câble à courant continu s'obtient par la simplification suivante de la formule en courant alternatif:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta}{R' T_1 + nR' T_2 + nR' (T_3 + T_4)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

où:

R' = résistance de l'âme en courant continu, par unité de longueur, à sa température maximale de service (ohm/m)

Lorsque le câble est directement exposé au rayonnement solaire, on doit utiliser les formules données au paragraphe 9.1.2.

3.3 Plan de la recommandation

La présente norme donne les méthodes d'évaluation des différentes quantités nécessaires au calcul de ces expressions.

La section deux contient les formules relatives aux quantités R , W_d , λ_1 et λ_2 .

La section trois contient les formules donnant les résistances thermiques T_1 , T_2 , T_3 et T_4 relatives aux différentes parties du circuit thermique.

L'annexe A fournit les valeurs de référence des températures ambiantes, des résistivités thermiques des sols habituellement rencontrées dans divers pays. D'autres valeurs peuvent

where:

I = current flowing in one conductor (A)

$\Delta\theta$ = conductor temperature rise above the ambient temperature (K)

Note. – The ambient temperature is the temperature of the surrounding medium under normal conditions, at a situation in which cables are installed, or are to be installed, including the effect of any local source of heat, but not the increase of temperature in the immediate neighbourhood of the cables due to heat arising therefrom.

R = alternating current resistance per unit length of the conductor at maximum operating temperature (ohm/m)

W_d = dielectric loss per unit length for the insulation surrounding the conductor (W/m)

T_1 = thermal resistance per unit length between one conductor and the sheath (K.m/W)

T_2 = thermal resistance per unit length of the bedding between sheath and armour (K.m/W)

T_3 = thermal resistance per unit length of the external serving of the cable (K.m/W)

T_4 = thermal resistance per unit length between the cable surface and the surrounding medium, as derived from Clause 9 (K.m/W)

n = number of load-carrying conductors in the cable (conductors of equal size and carrying the same load)

λ_1 = ratio of losses in the metal sheath to total losses in all conductors in that cable

λ_2 = ratio of losses in the armouring to total losses in all conductors in that cable

The permissible current rating is obtained from the above formula as follows:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0.5 T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Where the cable is exposed to direct solar radiation the formula given in Sub-clause 9.1.2 should be used.

The current rating for a four-core low-voltage cable may be taken to be equal to the current rating of a three-core cable for the same voltage and conductor size having the same construction, provided that the cable is to be used in a three-phase system where the fourth conductor is either a neutral conductor or a protective conductor. When it is a neutral conductor, the current rating applies to a balanced load.

3.2 D.C. cables up to 5 kV

The permissible current rating of a d.c. cable is obtained from the following simplification of the a.c. formula:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta}{R' T_1 + nR' T_2 + nR' (T_3 + T_4)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

where:

R' = direct current resistance per unit length of the conductor at maximum operating temperature (ohm/m)

Where the cable is exposed to direct solar radiation the formulae given in Sub-clause 9.1.2 should be used.

3.3 Layout of recommendation

This standard gives methods for calculating the different quantities required for the evaluation of these expressions, thus:

Section Two contains formulae for the quantities R , W_d , λ_1 and λ_2 .

Section Three contains formulae for the thermal resistances T_1 , T_2 , T_3 and T_4 associated with various parts of the thermal circuit.

Appendix A gives reference ambient temperatures and thermal resistivities of soils normally present in various countries. Other values may be used by agreement. For countries

être utilisées d'un commun accord. En ce qui concerne les pays non répertoriés, les informations doivent être obtenues auprès des intéressés: sinon, les valeurs données dans l'article A2 de l'annexe A peuvent être utilisées.

L'annexe B contient les informations exigées de l'acheteur pour permettre la sélection du type de câble approprié.

L'annexe C contient les formules exactes correspondant aux figures 2 à 6, pages 119 à 123 pour le calcul des intensités de courant à l'aide d'un calculateur numérique.

L'annexe D donne une autre méthode graphique pour le calcul de $\Delta\theta_s$ (voir paragraphe 9.1).

SECTION DEUX — CALCUL DES PERTES

4. Résistance de l'âme en courant alternatif

La résistance linéique de l'âme en courant alternatif et à la température maximale de service est donnée par la formule suivante, sauf dans le cas des câbles en tuyau d'acier (voir paragraphe 4.5):

$$R = R' (1 + y_s + y_p)$$

où:

R = résistance de l'âme en courant alternatif à la température maximale de service (ohm/m)

R' = résistance de l'âme en courant continu à la température maximale de service (ohm/m)

y_s = facteur d'effet de peau

y_p = facteur d'effet de proximité

4.1 Résistance de l'âme en courant continu

La résistance linéique de l'âme, en courant continu et à la température maximale de service θ , est donnée par:

$$R' = R_0 [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)]$$

où:

R_0 = résistance de l'âme en courant continu à 20°C (ohm/m)

La valeur de R_0 doit être tirée directement de la Publication 228 de la CEI: Ames des câbles isolés. Lorsque la dimension de l'âme n'est pas comprise dans la liste donnée dans la Publication 228 de la CEI, la valeur de R_0 doit être choisie en accord entre le constructeur et l'acheteur. On doit calculer la résistance de l'âme en utilisant les valeurs des résistivités données au tableau I, page 74.

α_{20} = coefficient de variation à 20°C de la résistivité en fonction de la température, par kelvin (voir le tableau I pour les valeurs de référence)

θ = température maximale de service en degrés Celsius (celle-ci est déterminée d'après le type d'isolant utilisé, voir la spécification de la CEI appropriée ou les normes nationales)

4.2 Facteur d'effet de peau y_s

Le facteur d'effet de peau y_s est donné par:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 x_s^4}$$

où:

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_s$$

f = fréquence du courant d'alimentation en hertz

Les valeurs k_s sont données dans le tableau II, page 74.

not listed this information must be obtained locally, or if this is not practicable the values given in Clause A2 of Appendix A may be used.

Appendix B contains the information required from the purchaser to allow the selection of the appropriate type of cable.

Appendix C contains exact formulae for Figures 2 to 6, pages 119 to 123, to allow the use of a digital computer for the calculation of current ratings.

Appendix D gives an alternative graphical method for calculating $\Delta\theta_s$ (see Sub-clause 9.1).

SECTION TWO – CALCULATION OF LOSSES

4. A.C. resistance of conductor

The a.c. resistance per unit length of the conductor at its maximum operating temperature is given by the following formula, except in the case of pipe type cables (see Sub-clause 4.5):

$$R = R' (1 + y_s + y_p)$$

where:

R = a.c. current resistance of conductor at maximum operating temperature (ohm/m)

R' = d.c. resistance of conductor at maximum operating temperature (ohm/m)

y_s = the skin effect factor

y_p = the proximity effect factor

4.1 D.C. resistance of conductor

The d.c. resistance per unit length of the conductor at its maximum operating temperature θ is given by:

$$R' = R_0 [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)]$$

where:

R_0 = d.c. resistance of the conductor at 20°C (ohm/m)

The value of R_0 shall be derived directly from IEC Publication 228: Conductors of Insulated Cables. Where the conductor size is outside the range covered by IEC Publication 228, the value of R_0 may be chosen by agreement between manufacturer and purchaser. The conductor resistance should then be calculated using the values of resistivity given in Table I, page 75.

α_{20} = constant mass temperature coefficient at 20°C per kelvin (see Table I for standard values)

θ = maximum operating temperature in degrees Celsius (this will be determined by the type of insulation to be used) see appropriate IEC specification or national standard

4.2 Skin effect factor y_s

The skin effect factor is given by:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8 x_s^4}$$

where:

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_s$$

f = supply frequency in hertz

Values for k_s are given in Table II, page 75.

La formule ci-dessus est valable tant que x_s n'excède pas 2,8, ce qui est vrai dans la majorité des cas.

En l'absence d'autres formules, il est recommandé d'utiliser les formules ci-dessus pour des âmes sectoriales ou ovales.

4.3 Facteur d'effet de proximité y_p dans le cas de câbles bipolaires ou de deux câbles unipolaires

Le facteur d'effet de proximité est donné par:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \times 2,9$$

où:

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p$$

d_c = diamètre de l'âme (mm)

s = distance entre axes des âmes (mm)

Les valeurs de k_p sont données dans le tableau II, page 74.

La formule ci-dessus est valable tant que x_p n'excède pas 2,8, ce qui est vrai dans la majorité des cas.

4.4 Facteur d'effet de proximité y_p dans le cas de câbles tripolaires ou de trois câbles unipolaires

4.4.1 Câbles à âme circulaire

Le facteur d'effet de proximité est donné par:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} + 0,27} \right]$$

où:

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p$$

d_c = diamètre de l'âme (mm)

s = distance entre axes des âmes (mm)

Note. — Pour des câbles disposés en nappe, s est l'intervalle entre des phases adjacentes. Lorsque l'intervalle entre des phases adjacentes n'est pas égal, la distance utilisée sera $s = \sqrt{s_1 \times s_2}$.

Les valeurs de k_p sont données dans le tableau II.

La formule ci-dessus est valable tant que x_p n'excède pas 2,8, ce qui est vrai dans la majorité des cas.

4.4.2 Câbles à âmes sectoriales

Dans le cas de câbles à plusieurs conducteurs à âmes sectoriales, la valeur de y_p sera les deux tiers de la valeur calculée au paragraphe 4.4.1,

avec:

$d_c = d_x$ = diamètre d'une âme circulaire équivalente de même section, et degré de rétreint (mm)

$s = (d_x + t)$ (mm)

où:

t = épaisseur de l'isolant entre âmes (mm)

The above formula is accurate providing x_s does not exceed 2.8, and therefore applies to the majority of practical cases.

In the absence of alternative formulae it is recommended that the above formula should be used for sector and oval-shaped conductors.

4.3 Proximity effect factor y_p for two-core cables and for two single-core cables

The proximity effect factor is given by:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8 x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \times 2.9$$

where:

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p$$

d_c = diameter of conductor (mm)

s = distance between conductor axes (mm)

Values for k_p are given in Table II, page 75.

The above formula is accurate providing x_p does not exceed 2.8, and therefore applies to the majority of practical cases.

4.4 Proximity effect factor y_p for three-core cables and for three single-core cables

4.4.1 Circular conductor cables

The proximity effect factor is given by:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8 x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0.312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8 x_p^4} + 0.27} \right]$$

where:

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p$$

d_c = diameter of conductor (mm)

s = distance between conductor axes (mm)

Note. — For cables in flat formation, s is the spacing between adjacent phases. Where the spacing between adjacent phases is not equal, the distance will be taken as $s = \sqrt{s_1 \times s_2}$.

Values for k_p are given in Table II.

The above formula is accurate provided x_p does not exceed 2.8, and therefore applies to the majority of practical cases.

4.4.2 Shaped conductor cables

In the case of multicore cables with shaped conductors, the value of y_p shall be two-thirds of the value calculated according to Sub-clause 4.4.1,

with:

$d_c = d_x$ = diameter of an equivalent circular conductor of the same cross-sectional area, and degree of compaction (mm)

$s = (d_x + t)$ (mm)

where:

t = thickness of insulation between conductors (mm)

Les valeurs de k_p sont données dans le tableau II, page 74.

La formule ci-dessus est valable tant que x_p n'excède pas 2,8, ce qui est vrai dans la majorité des cas.

4.5 Effets de peau et de proximité dans le cas des câbles en tuyau d'acier

Pour les câbles en tuyau, les effets de peau et de proximité calculés aux paragraphes 4.2, 4.3 et 4.4 devront être multipliés par un facteur égal à 1,7. Pour ces câbles:

$$R = R' [1 + 1,7 (y_s + y_p)] \quad (\text{ohm/m})$$

5. Pertes diélectriques (applicable uniquement aux câbles à courant alternatif)

Les pertes diélectriques dépendent de la tension et ne deviennent donc importantes qu'à des niveaux de tension correspondant au matériel isolant utilisé. Le tableau III, page 76, donne, pour les matériaux isolants communément utilisés, la valeur U_0 à partir de laquelle les pertes diélectriques doivent être prises en considération, que les câbles soient tripolaires métallisés ou unipolaires. Il n'est pas nécessaire de calculer les pertes diélectriques pour les câbles à plusieurs conducteurs sans écran ou les câbles à courant continu.

Les pertes diélectriques par unité de longueur de chaque phase sont données par:

$$W_d = \omega C U_0^2 \text{tg } \delta \quad (\text{W/m})$$

où:

$$\omega = 2\pi f \quad (\text{l/s})$$

$$C = \text{capacité par unité de longueur} \quad (\text{F/m})$$

$$U_0 = \text{tension par rapport à la terre} \quad (\text{V})$$

Les valeurs de $\text{tg } \delta$, facteur de perte de l'isolant à la fréquence et à la température de service, sont données dans le tableau III.

La capacité pour des âmes circulaires est donnée par:

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \ln \left(\frac{D_i}{d_c} \right)} 10^{-9} \quad (\text{F/m})$$

où:

$$\varepsilon = \text{permittivité relative de l'isolant}$$

$$D_i = \text{diamètre extérieur de l'isolant, à l'exclusion de l'écran} \quad (\text{mm})$$

$$d_c = \text{diamètre de l'âme y compris l'écran, s'il existe} \quad (\text{mm})$$

La même formule peut être utilisée pour des âmes ovales en remplaçant D_i et d_c par la moyenne géométrique des grand et petit diamètres sur isolant et sur âme.

Les valeurs numériques de ε sont données dans le tableau III.

6. Facteur de pertes dans les gaines ou les écrans (applicable uniquement aux câbles à courant alternatif à fréquence industrielle)

Les pertes dans les gaines ou les écrans (λ_1) sont dues au passage de courants de circulation (λ'_1) et aux courants de Foucault (λ''_1),

soit:

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1$$

Les formules indiquées donnent l'expression de ces pertes rapportées aux pertes totales dans l'âme, de plus, on indique pour chaque cas particulier le type de pertes à considérer. Les

Values for k_p are given in Table II, page 75.

The above formula is accurate provided x_p does not exceed 2.8, and therefore applies to the majority of practical cases.

4.5 Skin and proximity effects in pipe-type cables

For pipe-type cables, the skin and proximity effects calculated according to Sub-clauses 4.2, 4.3 and 4.4 shall be increased by a factor of 1.7. For these cables:

$$R = R' [1 + 1.7 (y_s + y_p)] \quad (\text{ohm/m})$$

5. Dielectric losses (applicable to a.c. cables only)

The dielectric loss is voltage dependent and thus only becomes important at voltage levels related to the insulation material being used. Table III, page 77, gives for the insulation materials in common use, the value of U_o at which the dielectric loss should be taken into account where three-core screened or single-core cables are used. It is not necessary to calculate the dielectric loss for unscreened multicore or d.c. cables.

The dielectric loss per unit length in each phase is given by:

$$W_d = \omega C U_o^2 \tan \delta \quad (\text{W/m})$$

where:

$$\omega = 2\pi f \quad (\text{1/s})$$

$$C = \text{capacitance per unit length} \quad (\text{F/m})$$

$$U_o = \text{voltage to earth} \quad (\text{V})$$

Values of $\tan \delta$, the loss factor of the insulation at power frequency and operating temperature, are given in Table III.

The capacitance for circular conductors is given by:

$$C = \frac{\epsilon}{18 \ln \left(\frac{D_i}{d_c} \right)} 10^{-9} \quad (\text{F/m})$$

where:

$$\epsilon = \text{relative permittivity of the insulation}$$

$$D_i = \text{external diameter of the insulation (excluding screen)} \quad (\text{mm})$$

$$d_c = \text{diameter of conductor, including screen, if any} \quad (\text{mm})$$

The same formula can be used for oval conductors if the geometric mean of the appropriate major and minor diameters is substituted for D_i and d_c .

Values of ϵ are given in Table III.

6. Loss factor for sheath and screen (applicable to power frequency a.c. cables only)

The power loss in the sheath or screen (λ_1) consists of losses caused by circulating currents (λ'_1) and eddy currents (λ''_1),

thus:

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1$$

The formulae given in this section express the loss in terms of the total power loss in the conductor(s) and for each particular case it is indicated which type of loss has to be con-

formules pour les câbles unipolaires s'appliquent à un seul circuit et les effets de retour par la terre sont négligés. Des méthodes pour gaines lisses et ondulées sont données.

Pour les câbles unipolaires avec gaines court-circuitées aux deux extrémités d'une section électrique, seules les pertes dues aux courants de circulation doivent être prises en considération (paragraphes 6.1, 6.2 et 6.3). Une section électrique est définie comme la partie située entre les points où les gaines de tous les câbles sont court-circuitées et mises à la terre.

Il y a également lieu de prendre une certaine marge de sécurité pour tenir compte d'une augmentation d'écartement en certains points de parcours (voir paragraphe 6.4).

Pour les câbles à grosses âmes segmentées, le facteur de pertes doit être majoré pour tenir compte également des pertes dues aux courants de Foucault dans les gaines (voir paragraphe 6.5).

Pour une installation à permutation des écrans, il n'est pas réaliste d'admettre que les longueurs élémentaires sont électriquement identiques et que les pertes dues aux courants de circulation dans les gaines sont négligeables. Des recommandations sont faites au paragraphe 6.6 pour tenir compte de ce déséquilibre électrique.

Le tableau I, page 74, donne les résistivités et coefficients de température du plomb et de l'aluminium, pour le calcul de la résistance de la gaine R_s .

6.1 Deux câbles unipolaires et trois câbles unipolaires (disposés en trèfle), avec gaines court-circuitées aux deux extrémités d'une section électrique

Pour deux câbles unipolaires et trois câbles unipolaires (disposés en trèfle), avec gaines court-circuitées aux deux extrémités, le facteur de pertes est donné par:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2}$$

où:

R_s = résistance de la gaine ou de l'écran par unité de longueur de câble à sa température de service maximale (ohm/m)

X = réactance de la gaine ou de l'écran par unité de longueur de câble (ohm/m)

$$= 2\omega \cdot 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right) \quad (\text{ohm/m})$$

ω = $2\pi \times$ fréquence (1/s)

s = distance entre axes des âmes de la section électrique considérée (mm)

d = diamètre moyen de la gaine (mm)

— pour des conducteurs ovales, d est donné par $\sqrt{d_M \cdot d_m}$

où d_M et d_m représentent respectivement les grand et petit diamètres de la gaine

— pour les gaines ondulées, d est donné par $\frac{1}{2}(D_{oc} + D_{it})$

$\lambda'_1 = 0$, c'est-à-dire que les pertes par courants de Foucault sont négligeables, sauf dans les câbles ayant de grosses âmes segmentées pour lesquels λ'_1 est calculé par la méthode donnée au paragraphe 6.5.

6.2 Trois câbles unipolaires disposés en nappe, régulièrement transposés, avec gaines court-circuitées aux deux extrémités d'une section électrique

Pour les câbles unipolaires disposés en nappe et régulièrement transposés, le câble médian étant équidistant des deux autres et les gaines étant transposées et court-circuitées aux extrémités de chaque section de transposition ternaire, le facteur de pertes est donné par:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_1}\right)^2}$$

sidered. The formulae for single-core cables apply to single circuits only and the effects of earth return paths are neglected. Methods are given for both smooth-sided and corrugated sheaths.

For single-core cables with sheaths bonded at both ends of an electrical section, only the loss due to circulating currents in the sheaths need be considered (Sub-clauses 6.1, 6.2 and 6.3). An electrical section is defined as a portion of the route between points at which the sheaths or screens of all cables are solidly bonded.

An allowance has usually also to be made for increased spacing at certain points on the route (see Sub-clause 6.4).

For cables with large segmental conductors, the loss factor should be increased to take account of the loss due to eddy currents in the sheaths (see Sub-clause 6.5).

For a cross-bonded installation, it is considered unrealistic to assume that minor sections are electrically identical and that the loss due to circulating currents in the sheaths is negligible. Recommendations are made in Sub-clause 6.6 for augmenting the losses in the sheaths to take account of this electrical unbalance.

The electrical resistivities and temperature coefficients of lead and aluminium, for use in calculating the resistance of the sheath R_s are given in Table I, page 75.

6.1 *Two single-core cables, and three single-core cables (in trefoil formation), sheaths bonded at both ends of an electrical section*

For two single-core cables, and three single-core cables (in trefoil formation) with sheaths bonded at both ends, the loss factor is given by:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2}$$

where:

R_s = resistance of sheath or screen per unit length of cable at its maximum operating temperature (ohm/m)

X = reactance per unit length of sheath or screen per unit length of cable (ohm/m)

$$= 2\omega 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right) \text{ (ohm/m)}$$

ω = $2\pi \times$ frequency (1/s)

s = distance between conductor axes in the electrical section being considered (mm)

d = mean diameter of the sheath (mm)

— for oval-shaped cores, d is given by $\sqrt{d_M \cdot d_m}$

where d_M and d_m are the major and minor mean diameters respectively of the sheath

— for corrugated sheaths d is given by $\frac{1}{2}(D_{oc} + D_{it})$

$\lambda'_1 = 0$, i.e. eddy-current loss is ignored, except for cables having large conductors of segmental construction when λ'_1 is calculated by the method given in Sub-clause 6.5.

6.2 *Three single-core cables in flat formation, with regular transposition, sheaths bonded at both ends of an electrical section*

For three single-core cables in flat formation, with the middle cable equidistant from the outer cables, regular transposition of the cables and the sheaths bonded at every third transposition, the loss factor is given by:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_1}\right)^2}$$

où:

$$X_l = \text{réactance linéique de la gaine (ohm/m)} \\ = 2\omega 10^{-7} \ln \left\{ 2\sqrt[3]{2} \cdot \left(\frac{s}{d} \right) \right\}$$

$\lambda'_l = 0$, c'est-à-dire que les pertes par courants de Foucault sont négligeables, sauf pour des câbles ayant de grosses âmes segmentées pour lesquels λ'_l est calculé par la méthode donnée dans le paragraphe 6.5.

6.3 Trois câbles unipolaires disposés en nappe, non transposés, avec gaines court-circuitées aux deux extrémités d'une section électrique

Pour trois câbles unipolaires disposés en nappe et non transposés dont le câble médian est équidistant des deux autres et les gaines court-circuitées aux deux extrémités d'une section électrique, le facteur de pertes pour le câble qui a les plus fortes pertes (c'est-à-dire le câble extérieur dont le courant est déphasé en arrière) est donné par:

$$\lambda'_{11} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{\frac{3}{4} P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4} Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3} (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)} \right]$$

Pour l'autre câble extérieur, le facteur de pertes est donné par:

$$\lambda'_{12} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{\frac{3}{4} P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4} Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3} (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)} \right]$$

Pour le câble médian, le facteur de pertes est donné par:

$$\lambda'_{1m} = \frac{R_s}{R} \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2}$$

Dans ces formules:

$$P = X + X_m$$

$$Q = X - \frac{X_m}{3}$$

où:

X = réactance de la gaine ou de l'écran par unité de longueur de câble pour deux câbles unipolaires adjacents (ohm/m)

$$= 2\omega 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right) \quad (\text{ohm/m})$$

X_m = réactance mutuelle par unité de longueur de câble entre la gaine d'un des câbles extérieurs et l'âme des deux autres, quand les câbles sont disposés en nappe

$$= 2\omega 10^{-7} \ln(2) \quad (\text{ohm/m})$$

$\lambda'_l = 0$, c'est-à-dire que les pertes par courants de Foucault sont négligeables sauf dans les câbles ayant de grosses âmes segmentées pour lesquels λ'_l est calculé par la méthode indiquée au paragraphe 6.5.

Les intensités du courant pour les câbles dans l'air doivent être basées sur la première formule donnée ci-dessus, c'est-à-dire, les pertes pour le câble extérieur dont le courant est déphasé en arrière.

6.4 Variation de l'écartement des câbles unipolaires entre les points où les gaines sont court-circuitées

Pour les circuits de câbles unipolaires à gaines court-circuitées à chaque extrémité et éventuellement en des points intermédiaires, les courants de circulation, et par conséquent les pertes, augmentent avec l'écartement, d'où l'intérêt de réduire celui-ci. En fait, il existe un écartement optimal obtenu par la double considération des pertes et de l'échauffement mutuel entre câbles.

where:

X_1 = reactance per unit length of sheath (ohm/m)

$$= 2\omega 10^{-7} \ln \left\{ 2\sqrt[3]{2} \cdot \left(\frac{s}{d} \right) \right\}$$

$\lambda_1'' = 0$, i.e. eddy-current loss is ignored, except for cables having large conductors of segmental construction when λ_1'' is calculated by the method given in Sub-clause 6.5.

6.3 Three single-core cables in flat formation, without transposition, sheaths bonded at both ends of an electrical section

For three single-core cables in flat formation, with the middle cable equidistant from the outer cables, without transposition and with the sheaths bonded at both ends of an electrical section, the loss factor for the cable which has the greatest loss (i.e. the outer cable carrying the lagging phase) is given by:

$$\lambda_{11}' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{\frac{3}{4} P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4} Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3} (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)} \right]$$

For the other outer cable, the loss factor is given by:

$$\lambda_{12}' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{\frac{3}{4} P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4} Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3} (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)} \right]$$

For the middle cable, the loss factor is given by:

$$\lambda_{1m}' = \frac{R_s}{R} \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2}$$

In these formulae:

$$P = X + X_m$$

$$Q = X - \frac{X_m}{3}$$

where:

X = reactance of sheath or screen per unit length of cable for two adjacent single-core cables (ohm/m)

$$= 2\omega 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d} \right) \text{ (ohm/m)}$$

X_m = mutual reactance per unit length of cable between the sheath of an outer cable and the conductors of the other two, when the cables are in flat formation

$$= 2\omega 10^{-7} \ln(2) \text{ (ohm/m)}$$

$\lambda_1'' = 0$, i.e. the eddy-current loss is ignored, except for cables having large conductors of segmental construction, when λ_1'' is calculated by the method given in Sub-clause 6.5.

Ratings for cables in air should be based on the first formula given above, i.e. the loss for the outer cable carrying the lagging phase.

6.4 Variation of spacing of single-core cables between sheath bonding points

For single-core cable circuits with sheaths solidly bonded at both ends and possibly at intermediate points, the circulating currents and the consequent loss increase as the spacing increases, and it is advisable to use as close a spacing as possible. The optimum spacing is achieved by considering both losses and mutual heating between cables.

Il n'est pas toujours possible d'installer les câbles avec le même écartement tout le long d'un parcours. Les recommandations suivantes concernent le calcul des pertes dues au courant de circulation des gaines lorsqu'il est impossible d'installer les câbles avec le même écartement sur toute la longueur d'une section électrique. Une section est définie comme la partie située entre les points où les gaines de tous les câbles sont court-circuitées et mises à la terre. Les recommandations ci-dessous donnent des valeurs pour des facteurs de pertes qui sont valables pour une section entière mais il faut remarquer que les valeurs appropriées de la résistance de l'âme et de la résistance thermique externe doivent être calculées sur la base du plus petit espacement entre câbles sur tout le long de la section.

- a) Lorsque l'écartement le long de la section n'est pas constant mais que les diverses valeurs sont connues, la valeur de X dans les paragraphes 6.1, 6.2 ou 6.3 sera déduite de:

$$X = \frac{l_a X_a + l_b X_b + \dots + l_n X_n}{l_a + l_b + \dots + l_n}$$

où:

$l_a, l_b, \dots, l_n$ sont les longueurs correspondant à des écartements différents le long d'une section électrique

$X_a, X_b, \dots, X_n$ sont les réactances par unité de longueur du câble, les formules correspondantes étant données aux paragraphes 6.1, 6.2 ou 6.3 où les valeurs appropriées des écartements $s_a, s_b, \dots, s_n$ sont utilisées

- b) Lorsque dans une section l'écartement entre les câbles et sa variation le long du parcours ne sont pas connus et ne peuvent être prévus, les pertes de cette section calculées à partir de l'écartement type devront être arbitrairement augmentées de 25%, cette valeur étant estimée convenir aux câbles haute tension sous gaine de plomb. Si l'on pense qu'un accroissement de 25% ne convient pas, on peut se mettre d'accord sur un autre pourcentage.
- c) Lorsque les phases de la section s'épanouissent à une extrémité, la marge de b) peut ne pas être suffisante et il est recommandé de faire une estimation de l'écartement prévu et de calculer les pertes en utilisant la procédure donnée en a).

Note. — Cette augmentation n'est pas applicable aux installations dont les gaines ne sont réunies qu'en un seul point ou transposées (voir paragraphe 6.6).

6.5 Influence des grosses âmes segmentées

Lorsque des dispositions ont été prises pour réduire l'effet de proximité, par exemple par l'utilisation de grosses âmes à segments isolés, le facteur de perte λ_1'' des paragraphes 6.1, 6.2 et 6.3 ne peut plus être négligé; ce facteur sera obtenu en multipliant la valeur λ_1'' au paragraphe 6.6 par le facteur F donné par la formule:

$$F = \frac{4 M^2 N^2 + (M + N)^2}{4 (M^2 + 1) (N^2 + 1)}$$

où:

$$M = N = \frac{R_s}{X} \quad \text{pour les câbles posés en trèfle}$$

et

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{R_s}{X + X_m} \\ N &= \frac{R_s}{X - \frac{X_m}{3}} \end{aligned} \right\} \quad \text{pour les câbles posés en nappe, le câble central étant équidistant des câbles latéraux}$$

Lorsque l'espacement le long d'une section électrique n'est pas constant, la valeur de X doit être calculée comme au paragraphe 6.4a).

It is not always possible to install cables with one value of spacing all along a route. The following recommendations relate to the calculation of sheath circulating current losses when it is not possible to install cables with a constant value of spacing over the length of one electrical section. A section is defined as a portion of the route between points at which sheaths of all cables are solidly bonded. The recommendations below give values for loss factors which apply to the whole of a section, but it should be noted that the appropriate values of conductor resistance and external thermal resistance must be calculated on the basis of the closest cable spacing at any place along the section.

- a) Where spacing along a section is not constant but the various values are known, the value for X in Sub-clauses 6.1, 6.2 or 6.3 shall be derived from:

$$X = \frac{l_a X_a + l_b X_b + \dots + l_n X_n}{l_a + l_b + \dots + l_n}$$

where:

$l_a, l_b \dots l_n$ are lengths with different spacings along an electrical section

$X_a, X_b \dots X_n$ are the reactances per unit length of cable, the relevant formulae being given in Sub-clauses 6.1, 6.2 or 6.3 where appropriate values of spacings $s_a, s_b \dots s_n$ are used

- b) Where in any section the spacing between cables and its variation along the route are not known and cannot be anticipated, the losses in that section, calculated from the design spacing, shall be arbitrarily increased by 25%, this value having been found to be appropriate for lead sheathed H.V. cables. A different increase may be used by agreement if it is considered that 25% is not appropriate to a particular installation.
- c) Where the section includes a spread-out end, the allowance in b) may not be sufficient and it is recommended that an estimate of the probable spacing be made and the loss calculated by the procedure given in a) above.

Note. — This increase does not apply to installations with single-point bonding or cross-bonding (see Sub-clause 6.6).

6.5 Effect of large segmental type conductors

Where the conductors are subject to a reduced proximity effect, as with large conductors of insulated segmental construction, the sheath loss factor λ'_s for Sub-clauses 6.1, 6.2 and 6.3 cannot be ignored, but shall be obtained by multiplying the value of λ'_s obtained from Sub-clause 6.6 for the same cable configuration, by the factor F given by the formula:

$$F = \frac{4 M^2 N^2 + (M + N)^2}{4 (M^2 + 1)(N^2 + 1)}$$

where:

$$M = N = \frac{R_s}{X} \text{ for cables in trefoil formation}$$

and

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{R_s}{X + X_m} \\ N &= \frac{R_s}{X - \frac{X_m}{3}} \end{aligned} \right\} \text{ for cables in flat formation with equidistant spacing}$$

Where the spacing along a section is not constant the value of X shall be calculated as in Sub-clause 6.4a).

6.6 Câbles unipolaires avec gaines court-circuitées en un seul point ou permutées

6.6.1 Pertes par courants de Foucault

Pour des câbles unipolaires, à gaines court-circuitées en un seul point ou permutées, le facteur de pertes par courants de Foucault est donné par:

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{R} \left[g_s \lambda_0 (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}} \right]$$

où:

$$g_s = 1 + \left(\frac{t_s}{D_s} \right)^{1,74} (\beta_1 D_s 10^{-3} - 1,6)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi\omega}{10^7 \varrho_s}}$$

ϱ_s = résistivité électrique du matériau constituant la gaine à la température de service (voir tableau I, page 74) (ohm.m)

D_s = diamètre extérieur de la gaine du câble (mm)

Note. — Pour les gaines ondulées, le diamètre extérieur moyen $\frac{D_{oc} + D_{it}}{2} + t_s$ doit être utilisé.

t_s = épaisseur de la gaine (mm)

$\omega = 2\pi f$

Note. — Pour les câbles à gaine de plomb, g_s peut être pris égal à 1 et $\frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}}$ peut être négligé. Pour les câbles à gaine d'aluminium il peut être nécessaire d'évaluer les deux termes lorsque le diamètre de la gaine est supérieur à 70 mm ou lorsque la gaine est plus épaisse que d'ordinaire.

Les formules pour λ_0 , Δ_1 et Δ_2 sont données ci-dessous:

(dans lesquelles: $m = \frac{\omega}{R_s} 10^{-7}$, pour $m \leq 0,1$, Δ_1 et Δ_2 peuvent être négligés)

(i) Trois câbles unipolaires en trèfle:

$$\lambda_0 = 3 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = (1,14 m^{2,45} + 0,33) \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0,92 m + 1,66)}$$

$$\Delta_2 = 0$$

(ii) Trois câbles unipolaires en nappe:

a) câble central:

$$\lambda_0 = 6 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = 0,86 m^{3,08} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1,4 m + 0,7)}$$

$$\Delta_2 = 0$$

b) câble extérieur, déphasé avant:

$$\lambda_0 = 1,5 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = 4,7 m^{0,7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0,16 m + 2)}$$

$$\Delta_2 = 21 m^{3,3} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1,47 m + 5,06)}$$

6.6 Single-core cables, with sheaths bonded at a single point or cross-bonded

6.6.1 Eddy-current losses

For single-core cables with sheaths bonded at a single point or cross-bonded the eddy-current loss factor is given by:

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{R} \left[g_s \lambda_0 (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}} \right]$$

where:

$$g_s = 1 + \left(\frac{t_s}{D_s} \right)^{1.74} (\beta_1 D_s 10^{-3} - 1.6)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi\omega}{10^7 \rho_s}}$$

ρ_s = electrical resistivity of sheath material at operating temperature (see Table I, page 75) (ohm.m)

D_s = external diameter of cable sheath (mm)

Note. — For corrugated sheaths, the mean outside diameter $\frac{D_{oc} + D_{it}}{2} + t_s$ shall be used.

t_s = thickness of sheath (mm)

$\omega = 2\pi f$

Note. — For lead sheathed cables, g_s can be taken as unity and $\frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \times 10^{12}}$ can be neglected. For aluminium-sheathed cables both terms may need to be evaluated when sheath diameter is greater than about 70 mm or the sheath is thicker than usual.

Formulae for λ_0 , Δ_1 and Δ_2 are given below:

(in which: $m = \frac{\omega}{R_s} 10^{-7}$, for $m \leq 0.1$, Δ_1 and Δ_2 can be neglected)

(i) Three single-core cables in trefoil formation:

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 3 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \\ \Delta_1 &= (1.14 m^{2.45} + 0.33) \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0.92 m + 1.66)} \\ \Delta_2 &= 0 \end{aligned}$$

(ii) Three single-core cables, flat formation:

a) centre cable:

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 6 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \\ \Delta_1 &= 0.86 m^{3.08} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1.4 m + 0.7)} \\ \Delta_2 &= 0 \end{aligned}$$

b) outer cable leading phase:

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 1.5 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2 \\ \Delta_1 &= 4.7 m^{0.7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0.16 m + 2)} \\ \Delta_2 &= 21 m^{3.3} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1.47 m + 5.06)} \end{aligned}$$

c) câble extérieur, déphasé arrière:

$$\lambda_0 = 1,5 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = - \frac{0,74 (m + 2) m^{0,5}}{2 + (m - 0,3)^2} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m+1)}$$

$$\Delta_2 = 0,92 m^{3,7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m+2)}$$

6.6.2 Pertes par courants de circulation

Les pertes par courants de circulation sont nulles pour les installations dont les gaines sont court-circuitées en un seul point et pour celles dont les gaines sont permutées et où chaque section ternaire est divisée en trois sections élémentaires électriquement identiques.

Lorsqu'une installation permutée comprend des sections dont le déséquilibre n'est pas négligeable, il apparaît dans ces sections une tension résiduelle, donc une circulation de courant et des pertes dont il importe de tenir compte.

Dans les installations où les longueurs effectives des sections simples sont connues, le facteur de pertes λ'_1 peut être obtenu à partir du facteur de pertes dû au courant de circulation dans un système de même configuration, non permuté et dont les gaines seront court-circuitées aux deux extrémités, en multipliant ce dernier facteur par:

$$\left[\frac{p + q - 2}{p + q + 1} \right]^2$$

dans cette expression, p et q désignent pour la section ternaire considérée le rapport de longueurs des deux plus grandes sections à la plus petite (longueur de la plus petite: a , longueurs des deux autres: pa et qa).

Cette formule n'intervient que lorsque les sections simples ont des longueurs différentes.

Les variations d'écartement doivent également être prises en considération.

Lorsqu'on ne connaît pas les longueurs des sections simples, on prendra, en se basant sur l'expérience des circuits installés:

$\lambda'_1 = 0,03$ pour les câbles directement enterrés, et

$\lambda'_1 = 0,05$ pour les câbles posés en fourreaux.

6.7 Câbles bipolaires non armés sous gaine commune

Pour un câble bipolaire non armé dont les conducteurs sont sous une gaine métallique commune, λ'_1 est négligeable et le facteur de pertes est donné par une des formules suivantes:

— pour les âmes rondes ou ovales:

$$\lambda''_1 = \frac{16 \omega^2 10^{-14}}{R R_s} \left(\frac{c}{d} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{c}{d} \right)^2 \right]$$

— pour les âmes sectoriales:

$$\lambda''_1 = \frac{10,8 \omega^2 10^{-16}}{R R_s} \left(\frac{1,48 r_1 + t}{d} \right)^2 \left[12,2 + \left(\frac{1,48 r_1 + t}{d} \right)^2 \right]$$

c) outer cable lagging phase:

$$\lambda_0 = 1.5 \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = - \frac{0.74 (m + 2) m^{0.5}}{2 + (m - 0.3)^2} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m+1)}$$

$$\Delta_2 = 0.92 m^{3.7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m+2)}$$

6.6.2 Circulating current losses

The circulating current loss is zero for installations where the sheaths are single-point bonded, and for installations where the sheaths are cross-bonded and each major section is divided into three electrically identical minor sections.

Where a cross-bonded installation contains sections whose unbalance is not negligible, a residual voltage is produced which results in a circulating current loss in that section which must be taken into account.

For installations where the actual lengths of the minor sections are known, the loss factor λ'_l can be calculated by multiplying the circulating current loss factor for the cable configuration concerned, calculated as if it were bonded and earthed at both ends of each major section without cross-bonding by:

$$\left[\frac{p + q + 2}{p + q + 1} \right]^2$$

where in any major section, the two longer minor sections are p and q times the length of the shortest minor section (i.e. the minor section lengths are a , pa and qa , where the shortest section is a).

This formula deals only with differences in the length of minor sections.

Any variations in spacing must also be taken into account.

Where lengths of the minor sections are not known, it is recommended that the value for λ'_l based on experience with carefully installed circuits, be:

$$\lambda'_l = 0.03 \text{ for cables laid direct, and}$$

$$\lambda'_l = 0.05 \text{ for cables installed in ducts.}$$

6.7 Two-core unarmoured cables with common sheath

For a two-core unarmoured cable where the cores are contained in a common metallic sheath, λ'_l is negligible and the loss factor is given by one of the following formulae:

— for round or oval conductors:

$$\lambda''_l = \frac{16 \omega^2 10^{-14}}{R R_s} \left(\frac{c}{d} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{c}{d} \right)^2 \right]$$

— for sector-shaped conductors:

$$\lambda''_l = \frac{10.8 \omega^2 10^{-16}}{R R_s} \left(\frac{1.48 r_l + t}{d} \right)^2 \left[12.2 + \left(\frac{1.48 r_l + t}{d} \right)^2 \right]$$

où:

$$\omega = 2\pi f$$

f = fréquence (Hz)

c = distance entre l'axe d'une âme et l'axe du câble (mm)

r_1 = rayon du cercle circonscrit aux deux âmes en secteur (mm)

d = diamètre moyen de la gaine (mm)

- pour les conducteurs ovales d est donné par $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ où d_M et d_m sont respectivement les grand et petit diamètres;
- pour des gaines ondulées d est donné par $\frac{1}{2} (D_{oc} + D_{it})$.

6.8 Câbles tripolaires non armés sous gaine commune

Pour un câble tripolaire non armé dont les conducteurs sont sous une gaine métallique commune, λ'_1 est négligeable et le facteur de pertes est donné par une des formules suivantes:

- pour les câbles à âmes circulaires ou ovales dont la résistance de gaine R_s est inférieure ou égale à $100 \mu\Omega/\text{m}$:

$$\lambda'_1 = \frac{3R_s}{R} \left[\left(\frac{2c}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{\omega} 10^7 \right)^2} + \left(\frac{2c}{d} \right)^4 \frac{1}{1 + 4 \left(\frac{R_s}{\omega} 10^7 \right)^2} \right]$$

- pour les mêmes câbles dont la résistance R_s est supérieure à $100 \mu\Omega/\text{m}$:

$$\lambda'_1 = \frac{3,2 \omega^2}{R R_s} \left(\frac{2c}{d} \right)^2 10^{-14}$$

- pour les câbles à âmes sectoriales, quelle que soit la valeur de R_s :

$$\lambda'_1 = 0,94 \frac{R_s}{R} \left(\frac{2r_1 + t}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{\omega} 10^7 \right)^2}$$

où:

r_1 = rayon du cercle circonscrit aux trois âmes sectoriales (mm)

t = épaisseur de l'isolant entre âmes (mm)

d = diamètre moyen de la gaine (mm)

- pour des conducteurs ovales, d est donné pour $\sqrt{d_M \cdot d_m}$, où d_M et d_m sont respectivement les grand et petit diamètres de la gaine ou de l'écran;
- pour des gaines ondulées d est donné par $\frac{1}{2} (D_{oc} + D_{it})$.

6.9 Câbles bipolaires et tripolaires armés de feuillards d'acier

L'adjonction d'une armure de feuillards d'acier augmente les pertes par courants de Foucault dans la gaine. Dans ce cas, les valeurs correspondantes λ'_1 des paragraphes 6.7 et 6.8 doivent être multipliées par le facteur suivant:

$$\left[1 + \left(\frac{d}{d_A} \right)^2 \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu\delta}} \right]^2$$

where:

$$\omega = 2\pi f$$

f = frequency (Hz)

c = distance between the axis of one conductor and the axis of the cable (mm)

r_1 = radius of the circle circumscribing the two sector-shaped conductors (mm)

d = mean diameter of the sheath (mm)

- for oval-shaped cores d is given by $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ where d_M and d_m are the major and minor mean diameters respectively;
- for corrugated sheaths d is given by $\frac{1}{2}(D_{oc} + D_{it})$.

6.8 Three-core unarmoured cables with common sheath

For a three-core unarmoured cable where the cores are contained in a common metallic sheath, λ'_1 is negligible and the loss factor is, therefore, given by one of the following formulae:

- for round or oval conductors, and where the sheath resistance R_s is less than or equal to $100 \mu\Omega/\text{m}$:

$$\lambda''_1 = \frac{3R_s}{R} \left[\left(\frac{2c}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{\omega} 10^7 \right)^2} + \left(\frac{2c}{d} \right)^4 \frac{1}{1 + 4 \left(\frac{R_s}{\omega} 10^7 \right)^2} \right]$$

- for round or oval conductors, and where the sheath resistance R_s is greater than $100 \mu\Omega/\text{m}$:

$$\lambda''_1 = \frac{3.2 \omega^2}{R R_s} \left(\frac{2c}{d} \right)^2 10^{-14}$$

- for sector-shaped conductors, and R_s any value:

$$\lambda''_1 = 0.94 \frac{R_s}{R} \left(\frac{2r_1 + t}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{\omega} 10^7 \right)^2}$$

where:

r_1 = radius of the circle circumscribing the three shaped conductors (mm)

t = thickness of insulation between conductors (mm)

d = mean diameter of the sheath (mm)

- for oval-shaped cores, d is given by $\sqrt{d_M \cdot d_m}$, where d_M and d_m are the major and minor mean diameters respectively of the sheath or screen;
- for corrugated sheaths d is given by $\frac{1}{2}(D_{oc} + D_{it})$.

6.9 Two-core and three-core cables with steel tape armour

The addition of steel tape armour increases the eddy-current loss in the sheath. The values for λ''_1 given in Sub-clauses 6.7 and 6.8 should be multiplied by the following factor if the cable has steel-tape armour:

$$\left[1 + \left(\frac{d}{d_A} \right)^2 \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu\delta}} \right]^2$$

où:

d_A = diamètre moyen de l'armure (mm)

μ = perméabilité relative du ruban d'acier (prise habituellement égale à 300)

δ = épaisseur équivalente de l'armure = $\frac{A}{\pi d_A}$ (mm)

où A est la section transversale de l'armure (mm²)

Cette correction n'est applicable qu'aux rubans d'épaisseur comprise entre 0,3 mm à 1,0 mm.

6.10 Câbles triplombs armés

Pour un câble tripolaire dont chaque phase possède sa propre gaine de plomb, λ'_1 est nul et le facteur de pertes pour les gaines est donné par:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1,7}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2}$$

où:

$X = 2\omega 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d}\right)$ (ohm/m)

s = distance entre axes d'âmes (mm)

6.11 Pertes dans les écrans et les gaines de câbles en tuyau d'acier

Lorsque, dans un câble en tuyau, chaque âme n'a qu'un écran sur l'isolant, par exemple une gaine de plomb ou un ruban de cuivre, le rapport des pertes dans les écrans aux pertes dans les âmes peut être calculé par la formule donnée dans le paragraphe 6.1 pour la gaine d'un câble unipolaire, mais en corrigeant celle-ci pour tenir compte des pertes supplémentaires dues à la présence du tuyau d'acier.

La formule modifiée s'écrit:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1,7}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2}$$

Si chaque phase comporte un écran métallique et un frettage non magnétique, la même formule peut être utilisée, mais la résistance R_s est remplacée par la résistance équivalente à la mise en parallèle de l'écran et du frettage. Le diamètre d est remplacé par la valeur d' :

$$d' = \sqrt{\frac{d^2 + d_2^2}{2}}$$

où:

d' = diamètre moyen de gaine et frettage (mm)

d = diamètre moyen de l'écran ou gaine (mm)

d_2 = diamètre moyen du frettage (mm)

Dans le cas des conducteurs de forme ovale, d et d_2 sont donnés par $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ où d_M et d_m sont respectivement les grand et petit diamètres.

Note. — Voir aussi le paragraphe 7.2.

where:

d_A = mean diameter of armour (mm)

μ = relative permeability of the steel tape (usually taken as 300)

δ = equivalent thickness of armour = $\frac{A}{\pi d_A}$ (mm)

where A = cross-sectional area of the armour (mm²)

This correction is only known to be applicable to tapes 0.3 mm to 1.0 mm thick.

6.10 Cables with each core in a separate lead sheath (SL type) and armoured

For a three-core cable of which each core has a separate lead sheath λ'_1 is zero and the loss factor for the sheaths is given by:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1.7}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2}$$

where:

$$X = 2\omega 10^{-7} \ln \left(\frac{2s}{d}\right) \text{ (ohm/m)}$$

s = distance between conductor axes (mm)

6.11 Losses in screens and sheaths of pipe-type cables

If each conductor of a pipe-type cable has a screen only over the insulation, for example a lead sheath or copper tape, the ratio of the screen loss to the conductor loss may be calculated by the formula given in Sub-clause 6.1 for the sheath of a single-core cable, provided that the formula is corrected for the additional loss caused by the presence of the steel pipe.

This modifies the formula to:

$$\lambda'_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1.7}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2}$$

If each core has a diaphragm sheath and non-magnetic reinforcement, the same formula is used, but the resistance R_s is replaced by the parallel combination of the resistance of the sheath and reinforcement. The diameter d is replaced by the value d' :

$$d' = \sqrt{\frac{d^2 + d_2^2}{2}}$$

where:

d' = mean diameter of sheath and reinforcement (mm)

d = mean diameter of screen or sheath (mm)

d_2 = mean diameter of reinforcement (mm)

In the case of oval-shaped cores d and d_2 are given by $\sqrt{d_M \cdot d_m}$, where d_M and d_m are the major and minor mean diameters respectively.

Note. — See also Sub-clause 7.2.

7. Facteur de pertes dans les armures, les frettages et les tuyaux d'acier (applicable uniquement aux câbles à courant alternatif à fréquence industrielle)

Les formules données dans cet article expriment la puissance dissipée dans l'armure métallique ou le frettage ou le tuyau d'acier des câbles sous la forme d'une fraction λ_2 de la puissance perdue dans toutes les âmes.

Les valeurs à utiliser pour la résistivité et les coefficients de variation de la résistivité avec la température sont données dans le tableau I, page 74.

7.1 Armure ou frettage non magnétique

Le procédé général est de combiner le calcul des pertes dans le frettage avec celui des pertes dans la gaine. Les formules sont données dans l'article 6 et la combinaison en parallèle des résistances de la gaine et du frettage est utilisée à la place de la résistance R_s de la gaine. La moyenne quadratique des diamètres de la gaine et du frettage remplace le diamètre moyen d de la gaine (voir paragraphe 6.11). Cette méthode est applicable aux câbles unipolaires, bipolaires et multipolaires.

La valeur de la résistance du frettage dépend du pas des rubans:

- Si le ruban a un très long pas (rubans longitudinaux), la résistance est calculée comme celle d'un cylindre ayant la même masse de matériau par unité de longueur de câble et le même diamètre intérieur que les rubans.
- Si les rubans font avec l'axe du câble un angle d'environ 54° , la résistance est le double de celle calculée ci-dessus en a).
- Si les rubans ont un pas très court (rubans circonférentiels), la résistance est considérée comme infinie, c'est-à-dire que les pertes peuvent être négligées.
- Dans le cas où il y a deux couches ou plus de rubans à pas court au contact l'une de l'autre, la résistance est le double de celle considérée à l'alinéa a).

Ces considérations s'appliquent aussi aux câbles en tuyaux, comme il est indiqué dans le paragraphe 6.11.

7.2 Armure ou frettage magnétique

7.2.1 Câbles unipolaires sous gaine de plomb et armure de fils d'acier, court-circuitée à la gaine à chaque extrémité

La méthode est appliquée à des installations où l'écartement entre les câbles est grand (c'est-à-dire 10 m ou plus). Elle donne la valeur totale des pertes de la gaine et de l'armure qui sont habituellement plus grandes que les pertes réelles, ainsi, l'erreur sur le calcul des courants est du côté de la sécurité. Ce sujet est à l'étude avec la perspective de fournir une méthode plus précise et d'application plus générale.

La méthode suivante ne tient pas compte de l'influence des milieux environnants, qui peut être appréciable dans le cas des câbles sous-marins en particulier.

Le calcul des pertes dans les gaines de plomb et les armures des câbles unipolaires sous armure de fils d'acier dont la gaine et l'armure sont court-circuitées aux deux extrémités est le suivant:

- La résistance équivalente aux résistances de la gaine et l'armure en parallèle est donnée par:

$$R_e = \frac{R_s \cdot R_A}{R_s + R_A} \quad (\text{ohm/m})$$

7. Loss factor for armour, reinforcement and steel pipes (applicable to power frequency a.c. cables only)

The formulae given in this clause express the power loss occurring in metallic armour, reinforcement or steel pipes of a cable in terms of an increment λ_2 of the power loss in all conductors.

Appropriate values of electrical resistivity and resistance temperature coefficients for the materials used for armour and reinforcement are given in Table I, page 75.

7.1 Non-magnetic armour or reinforcement

The general procedure is to combine the calculation of the loss in the reinforcement with that of the sheath. The formulae are given in Clause 6 and the parallel combination of sheath and reinforcement resistance is used in place of the single sheath resistance R_s . The root mean square value of the sheath and reinforcement diameter replaces the mean sheath diameter d (see Sub-clause 6.11). This procedure applies to both single, twin and multicore cables.

The value of the reinforcement resistance is dependent on the lay of the tapes as follows:

- If the tapes have a very long lay (longitudinal tapes), the resistance is based on a cylinder having the same mass of material per unit length of cable and also the same internal diameter as the tapes.
- If the tapes are wound at approximately 54° to the cable axis, the resistance is twice the value calculated according to Item a) above.
- If the tapes are wound with a very short lay (circumferential tapes), the resistance is regarded as infinite, i.e. the loss can be neglected.
- If there are two or more layers of tapes in contact with each other, having a very short lay, the resistance is twice the value calculated according to Item a) above.

These considerations apply also to the cores of pipe-type cables dealt with in Sub-clause 6.11.

7.2 Magnetic armour or reinforcement

7.2.1 Single-core lead-sheathed cables – steel wire armour, bonded to sheath at both ends

The method is intended for installations where spacing between cables is large (i.e. 10 m or more). It gives values for the combined sheath and armour losses which are usually higher than the actual ones, so that ratings are on the safe side. This subject is under consideration with a view to providing a more precise and generally applicable method.

The following method does not take into account the possible influence of the surrounding media, which may be appreciable in particular for cables laid under water.

Calculation of the power loss in the lead sheath and armour of single-core cables with steel-wire armour with the sheath and armour bonded together at both ends is as follows:

- The equivalent resistance of sheath and armour in parallel is given by:

$$R_e = \frac{R_s \cdot R_A}{R_s + R_A} \quad (\text{ohm/m})$$

où:

R_s = résistance de la gaine par unité de longueur à sa température de service maximale (ohm/m)

R_A = résistance de l'armure en courant alternatif par unité de longueur à sa température de service maximale (ohm/m)

La résistance en courant alternatif des fils d'armure varie d'environ 1,2 fois la résistance en courant continu pour les fils de 2 mm de diamètre jusqu'à 1,4 fois la résistance en courant continu pour les fils de 5 mm. La valeur de la résistance n'a pas un effet très sensible sur le résultat final.

b) L'inductance des éléments du circuit est calculée par phase, de la façon suivante:

$$H_s = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{2s_2}{d} \right)$$

où H_s est l'inductance due à la gaine (H/m)

$$H_1 = \pi \mu_e \left(\frac{n_1 d_f^2}{p d_A} \right) 10^{-7} \sin \beta \cos \gamma$$

$$H_2 = \pi \mu_e \left(\frac{n_1 d_f^2}{p d_A} \right) 10^{-7} \sin \beta \sin \gamma$$

$$H_3 = 0,4 (\mu_t - 1) \left(\frac{d_f}{d_A} \right) 10^{-6} \cos^2 \beta$$

où:

H_1, H_2 et H_3 = composantes de l'inductance due aux fils d'acier (H/m)

s_2 = distance entre axes des câbles adjacents disposés en trèfle; pour les câbles disposés en nappe, s_2 est la moyenne géométrique des trois distances (mm)

d_A = diamètre moyen de l'armure (mm)

d_f = diamètre du fil d'acier (mm)

p = pas d'assemblage du fil d'acier (mm)

n_1 = nombre de fils d'acier

β = angle formé par l'axe d'un fil d'armure et l'axe du câble

γ = déphasage du flux magnétique longitudinal dans les fils d'acier sur la force magnétisante

μ_e = perméabilité relative longitudinale des fils d'acier

μ_t = perméabilité relative transversale des fils d'acier

Pour les valeurs de γ, μ_e et μ_t , voir le point d).

Prendre $B_1 = \omega (H_s + H_1 + H_3)$ (ohm/m)

$$B_2 = \omega H_2 \quad (\text{ohm/m})$$

c) Les pertes totales dans la gaine et l'armure $W_{(s+A)}$ sont données par:

$$W_{(s+A)} = I^2 R_e \left(\frac{B_2^2 + B_1^2 + R_e B_2}{(R_e + B_2)^2 + B_1^2} \right) \quad (\text{W/m})$$

Les pertes dans la gaine et l'armure sont supposées être approximativement égales, donc:

$$\lambda'_1 = \lambda_2 = \frac{W_{(s+A)}}{2 W_c}$$

où:

$W_c = I^2 R$ pertes dans l'âme

d) Choix des caractéristiques magnétiques γ, μ_e et μ_t .

Ces valeurs varient suivant les échantillons particuliers d'acier et, à moins de pouvoir se référer à des mesures faites sur les fils d'acier utilisés, des valeurs moyennes doivent être adoptées.

where:

R_s = resistance of sheath per unit length of cable at its maximum operating temperature (ohm/m)

R_A = a.c. resistance of armour per unit length at its maximum operating temperature (ohm/m)

The a.c. resistance of armour wire varies from about 1.2 times the d.c. resistance of 2 mm diameter wires up to 1.4 times the d.c. resistance for 5 mm wires. The resistance does not critically affect the final result.

- b) The inductance of the elements of the circuit is calculated per phase, as follows:

$$H_s = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{2s_2}{d} \right)$$

where H_s is the inductance due to the sheath

$$H_1 = \pi \mu_e \left(\frac{n_1 d_f^2}{p d_A} \right) 10^{-7} \sin \beta \cos \gamma$$

$$H_2 = \pi \mu_e \left(\frac{n_1 d_f^2}{p d_A} \right) 10^{-7} \sin \beta \sin \gamma$$

$$H_3 = 0.4 (\mu_t - 1) \left(\frac{d_f}{d_A} \right) 10^{-6} \cos^2 \beta$$

where:

H_1, H_2 and H_3 = components of the inductance due to the steel wires (H/m)

s_2 = axial spacing between adjacent cables in trefoil formation; for cables in flat formation s_2 is the geometric mean of the three spacings (mm)

d_A = mean diameter of armour (mm)

d_f = diameter of a steel wire (mm)

p = length of lay of a steel wire along the cable (mm)

n_1 = number of steel wires

β = angle between axis of armour wire and axis of cable

γ = angular time delay of the longitudinal magnetic flux in the steel wires behind the magnetizing force

μ_e = longitudinal relative permeability of steel wires

μ_t = transverse relative permeability of steel wires

For values of γ, μ_e and μ_t , see Item d).

Let $B_1 = \omega (H_s + H_1 + H_3)$ (ohm/m)

$B_2 = \omega H_2$ (ohm/m)

- c) The total loss in sheath and armour $W_{(s+A)}$ is given by:

$$W_{(s+A)} = I^2 R_e \left(\frac{B_2^2 + B_1^2 + R_e B_2}{(R_e + B_2)^2 + B_1^2} \right) \text{ (W/m)}$$

The loss in sheath and armour may be assumed to be approximately equal, so that:

$$\lambda'_1 = \lambda_2 = \frac{W_{(s+A)}}{2 W_c}$$

where:

$W_c = I^2 R$ loss in conductor

- d) Choice of magnetic properties γ, μ_e and μ_t .

These quantities vary with the particular sample of steel and unless reference can be made to measurements on the steel wire to be used, some average values must be assumed.

L'erreur résultante n'est pas sensible si, pour des fils de 4 mm à 6 mm de diamètre et de charges à la rupture voisines de 400 N/mm², les valeurs suivantes sont adoptées:

$$\mu_e = 400$$

$$\mu_t = 10, \text{ lorsque les fils sont en contact}$$

$$\mu_t = 1, \text{ lorsque les fils sont séparés}$$

$$\gamma = 45^\circ$$

Si un calcul plus précis est exigé et si les caractéristiques des fils sont connues, il est alors nécessaire de connaître d'abord la valeur approchée de la force magnétisante H afin de trouver les caractéristiques magnétiques qui conviennent.

$$H = \frac{1000 |\bar{I} + \bar{I}_s|}{\pi d_A} \quad (\text{ampères-tours/m})$$

où $\bar{I}$ et $\bar{I}_s$ sont les valeurs vectorielles du courant dans l'âme et du courant dans la gaine. Pour le choix initial des caractéristiques magnétiques, il suffit généralement de supposer que $|\bar{I} + \bar{I}_s| = 0,6 I$, et de reprendre les calculs s'il s'avère ensuite que la valeur calculée accuse une différence importante.

7.2.2 Câbles bipolaires sous armure de fil d'acier

$$\lambda_2 = \frac{0,62 \omega^2 10^{-14}}{R \cdot R_A} + \frac{3,82 4 \omega 10^{-5}}{R} \left[\frac{1,48 r_1 + t}{d_A^2 + 95,7 A} \right]^2$$

où:

R_A = résistance de l'armure à sa température maximale (ohm/m)

d_A = diamètre moyen de l'armure (mm)

A = section de l'armure (mm²)

r_1 = rayon circonscrit aux âmes (mm)

t = épaisseur de l'isolant entre les âmes (mm)

Aucune correction tenant compte de la non-uniformité de la distribution du courant dans les âmes n'est proposée, car elle reste négligeable jusqu'à des sections de 400 mm².

7.2.3 Câbles tripolaires - Armure en fils d'acier

7.2.3.1 Câbles à âmes circulaires

$$\lambda_2 = 1,23 \frac{R_A \left(\frac{2c}{d_A} \right)^2}{R} \frac{1}{\left(\frac{2,77 R_A 10^6}{\omega} \right)^2 + 1}$$

où:

R_A = résistance de l'armure à sa température maximale (ohm/m)

d_A = diamètre moyen de l'armure (mm)

c = distance entre l'axe d'une âme et le centre du câble (mm)

Aucune correction tenant compte de la non-uniformité de la distribution du courant dans les âmes n'est proposée, car elle reste négligeable jusqu'à des sections de 400 mm².

7.2.3.2 Câbles triplombs

Quand il s'agit de câbles triplombs armés, l'effet d'écran résultant des courants dans les gaines réduit les pertes dans l'armure. La valeur de λ_2 calculée ci-dessus doit être multipliée par le facteur $(1 - \lambda'_1)$ où λ'_1 a la valeur déterminée au paragraphe 6.1.

No appreciable error is involved if, for wires of diameters from 4 mm to 6 mm and tensile breaking strengths around 400 N/mm², the following values are assumed:

$$\mu_e = 400$$

$$\mu_t = 10, \text{ when wires are in contact}$$

$$\mu_t = 1, \text{ where wires are separated}$$

$$\gamma = 45^\circ$$

If a more precise calculation is required and the wire properties are known, then it is initially necessary to know an approximate value for the magnetizing force H in order to find the appropriate magnetic properties.

$$H = \frac{1000 |\bar{I} + \bar{I}_s|}{\pi d_A} \quad (\text{ampere turns/m})$$

where $\bar{I}$ and $\bar{I}_s$ are the vectorial values of conductor current and sheath current. For the initial choice of magnetic properties it is usually satisfactory to assume that $|\bar{I} + \bar{I}_s| = 0.6 I$, and to repeat the calculations if it is subsequently established that the calculated value is significantly different.

7.2.2 Two-core cables – steel wire armour

$$\lambda_2 = \frac{0.62 \omega^2 10^{-14}}{R \cdot R_A} + \frac{3.82 A \omega 10^{-5}}{R} \left[\frac{1.48 r_1 + t}{d_A^2 + 95.7 A} \right]^2$$

where:

R_A = resistance of armour at maximum armour temperature (ohm/m)

d_A = mean diameter of armour (mm)

A = cross-sectional area of armour (mm²)

r_1 = circumscribing radius over conductors (mm)

t = insulation thickness between conductors (mm)

No correction has been made for non-uniform current distribution in the conductors because it is considered negligible for conductor sizes up to 400 mm².

7.2.3 Three-core cables – steel wire armour

7.2.3.1 Round conductor cable

$$\lambda_2 = 1.23 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2c}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{2.77 R_A 10^6}{\omega} \right)^2 + 1}$$

where:

R_A = resistance of armour at maximum armour temperature (ohm/m)

d_A = mean diameter of armour (mm)

c = distance between the axis of a conductor and the cable centre (mm)

No correction has been made for non-uniform current distribution in the conductors because it is considered negligible for conductor sizes up to 400 mm².

7.2.3.2 SL type cables

Where the armour is over an SL type cable, the screening effect of the sheath currents reduces the armour loss. The formula for λ_2 given above should be multiplied by the factor $(1 - \lambda'_1)$, where λ'_1 is obtained from Sub-clause 6.1.

7.2.3.3 Câbles à âmes sectoriales

$$\lambda_2 = 0,358 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2r_1}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{2,77 R_A 10^6}{\omega} \right)^2 + 1}$$

où:

r_1 = rayon du cercle circonscrit aux trois âmes sectoriales (mm)

$\omega = 2\pi f$

f = fréquence d'alimentation (Hz)

7.2.4 Câbles tripolaires sous feuillets d'acier

Les formules suivantes s'appliquent aux feuillets dont l'épaisseur est comprise entre 0,3 mm et 1 mm.

Les pertes par hystérésis sont, pour une fréquence de 50 Hz, données par:

$$\lambda'_2 = \frac{s^2 k^2 10^{-7}}{R d_A \delta}$$

où:

s = distance entre axes des âmes (mm)

δ = épaisseur équivalente de l'armure (mm)

soit $\frac{A}{\pi d_A}$

et:

A = section de l'armure (mm²)

d_A = diamètre moyen de l'armure (mm)

Le facteur k est donné par:

$$k = \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu \delta}}$$

où:

μ = perméabilité relative du ruban d'acier, habituellement prise égale à 300

Pour des fréquences f différentes de 50 Hz, la valeur de k doit être multipliée par $\frac{f}{50}$.

Le facteur de pertes par courants de Foucault, à 50 Hz, est:

$$\lambda''_2 = \frac{2,25 s^2 k^2 \delta 10^{-8}}{R d_A}$$

et pour toute autre fréquence f , la valeur calculée par la formule ci-dessus doit être multipliée par le facteur $\left(\frac{f}{50} \right)^2$.

Le facteur de pertes total dans l'armure est donné par la somme des facteurs correspondant aux pertes par hystérésis et courants de Foucault, soit:

$$\lambda_2 = \lambda'_2 + \lambda''_2$$

Note. — La présence de frettages ou d'armures magnétiques augmente les pertes par courants de Foucault dans les gaines; il doit en être tenu compte comme il est indiqué au paragraphe 6.9.

7.2.3.3 Sector conductor cables

$$\lambda_2 = 0.358 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2r_1}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{2.77 R_A 10^6}{\omega} \right)^2 + 1}$$

where:

r_1 = radius of the circle circumscribing the three shaped conductors (mm)

$\omega = 2\pi f$

f = frequency of supply (Hz)

7.2.4 Three-core cables – steel tape armour or reinforcement

The following formulae apply to tapes 0.3 mm to 1.0 mm thick.

The hysteresis loss is given for a frequency of 50 Hz by:

$$\lambda'_2 = \frac{s^2 k^2 10^{-7}}{R d_A \delta}$$

where:

s = distance between conductor axes (mm)

δ = equivalent thickness of armour (mm)

i.e. $\frac{A}{\pi d_A}$

and:

A = armour cross-sectional area (mm²)

d_A = mean diameter of armour (mm)

The factor k is given by:

$$k = \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu \delta}}$$

where:

μ = relative permeability of the steel tape, usually taken as 300

For frequencies f other than 50 Hz, multiply the value given by the above formula by the factor $\frac{f}{50}$.

The eddy-current loss is given for a frequency of 50 Hz by:

$$\lambda''_2 = \frac{2.25 s^2 k^2 \delta 10^{-8}}{R d_A}$$

and for any other frequency the value calculated from this formula must be multiplied by the factor $\left(\frac{f}{50} \right)^2$.

The total armour loss factor is given by the sum of both hysteresis and eddy-current losses, thus:

$$\lambda_2 = \lambda'_2 + \lambda''_2$$

Note. — Magnetic armour or reinforcement, if any, increase eddy-current losses in the sheaths. Reference should be made to Sub-clause 6.9.

7.3 Pertes dans les tuyaux d'acier

Les pertes dans les tuyaux d'acier sont données par deux formules empiriques, une pour les câbles où les phases sont posées en trèfle jointif, et une autre pour les câbles où les phases sont posées au fond du tuyau dans une configuration plus ouverte (dite en berceau). Les câbles en service ont probablement une configuration intermédiaire. Aussi, les pertes devront être calculées pour les deux configurations et on prendra leur valeur moyenne:

Note. — Ces formules ont été obtenues empiriquement aux Etats-Unis d'Amérique et ne s'appliquent actuellement qu'aux dimensions des tuyaux et aux types d'acier utilisés dans ce pays.

$$\lambda_2 = \left(\frac{0,0115 s - 0,001485 d_d}{R} \right) 10^{-5} \text{ pour la configuration en trèfle jointif}$$

$$\lambda_2 = \left(\frac{0,00438 s + 0,00226 d_d}{R} \right) 10^{-5} \text{ pour la configuration en berceau}$$

où:

s = espacement entre axes des âmes (mm)

d_d = diamètre intérieur du tuyau (mm)

R = résistance linéique de l'âme en courant alternatif à la température maximale de service (ohm/m)

Les formules indiquées s'appliquent à une fréquence de 60 Hz. Pour 50 Hz, chaque formule doit être multipliée par 0,76.

Pour les câbles en tuyaux, dont l'armure en fils plats est appliquée sur les trois phases après qu'elles ont été mises en place, les pertes sont indépendantes de la présence du tuyau. Pour ces câbles, les pertes dans l'armure doivent être calculées comme pour les câbles triplombs (voir paragraphe 7.2.3.2) et les pertes dans le tuyau peuvent être négligées.

SECTION TROIS — CALCUL DES RÉSISTANCES THERMIQUES

8. Résistances thermiques des constituants des câbles, T_1 , T_2 et T_3

Cet article donne les formules pour le calcul des résistances thermiques linéiques des différentes parties de câbles, T_1 , T_2 et T_3 (voir article 3). Les résistivités thermiques des matériaux utilisés comme isolants et revêtements sont données dans le tableau IV, page 78.

Lorsqu'il y a des écrans, on considère pour les calculs thermiques que les rubans métalliques font partie de l'âme ou de la gaine alors que les rubans semi-conducteurs (y compris le papier carbone métallisé) font partie de l'isolant. Les dimensions appropriées des composants doivent être modifiées en conséquence.

8.1 Résistance thermique entre âme et gaine T_1

8.1.1 Câbles unipolaires

La résistance thermique T_1 entre une âme et la gaine est donnée par:

$$T_1 = \frac{\varrho_T}{2\pi} \ln \left[1 + \frac{2t_1}{d_c} \right]$$

où:

ϱ_T = résistivité thermique de l'isolant (K.m/W)

d_c = diamètre de l'âme (mm)

t_1 = épaisseur de l'isolant entre âme et gaine (mm)

7.3 Losses in steel pipes

The loss in steel pipes is given by two empirical formulae, one for cables where the cores are bound in close trefoil formation and the other for cables where the cores are placed in a more open configuration (cradled) on the bottom of the pipe. Actual cores in service probably approximate to a configuration somewhere between the two. It is considered that the losses should be calculated for each configuration and a mean value used:

Note. — These formulae have been empirically obtained in the United States of America and at present apply only to pipe sizes and steel types used in that country.

$$\lambda_2 = \left(\frac{0.0115 s - 0.001485 d_d}{R} \right) 10^{-5} \text{ for closely bound triangular configuration}$$

$$\lambda_2 = \left(\frac{0.00438 s + 0.00226 d_d}{R} \right) 10^{-5} \text{ for the open or cradled formation}$$

where:

s = axial spacing of adjacent conductors (mm)

d_d = internal diameter of pipe (mm)

R = a.c. resistance per unit length of the conductor at maximum operating temperature (ohm/m)

The formulae given apply to a frequency of 60 Hz. For 50 Hz, each formula should be multiplied by 0.76.

For pipe-type cables, where flat-wire armour is applied over all three cores after they are laid up, the losses are independent of the presence of the pipe. For such cables, the losses in the armour are to be calculated as for SL type cables (see Sub-clause 7.2.3.2) and the losses in the pipe are to be ignored.

SECTION THREE — CALCULATION OF THERMAL RESISTANCES

8. Thermal resistance of the constituent parts of a cable, T_1 , T_2 and T_3

This clause gives the formulae for calculating the thermal resistances per unit length of the different parts of the cable T_1 , T_2 and T_3 (see Clause 3). The thermal resistivities of materials used for insulation and for protective coverings are given in Table IV, page 79.

Where screening layers are present; for thermal calculations metallic tapes are considered to be part of the conductor or sheath while semi-conducting layers (including metallized carbon paper tapes) are considered as part of the insulation. The appropriate component dimensions must be modified accordingly.

8.1 Thermal resistance between one conductor and sheath T_1

8.1.1 Single-core cables

The thermal resistance between one conductor and the sheath T_1 is given by:

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[1 + \frac{2t_1}{d_c} \right]$$

where:

ρ_T = thermal resistivity of insulation (K.m/W)

d_c = diameter of conductor (mm)

t_1 = thickness of insulation between conductor and sheath (mm)

Note. — Pour les gaines ondulées, t_1 est mesurée d'après le diamètre intérieur moyen de la gaine

$$t_1 = \left(\frac{D_{it} + D_{oc}}{2} \right) - t_s$$

8.1.2 Câbles à ceinture

La résistance thermique T_1 entre une âme et la gaine est donnée par:

$$T_1 = \frac{\varrho_T}{2\pi} G$$

où:

G = facteur géométrique

Note. — Pour les gaines ondulées, t_1 est mesurée d'après le diamètre intérieur moyen de la gaine

$$t_1 = \left(\frac{D_{it} + D_{oc}}{2} \right) - t_s$$

8.1.2.1 Câbles bipolaires à ceinture et âmes circulaires

Le facteur géométrique G est donné par la figure 2, page 119.

8.1.2.2 Câbles bipolaires à ceinture et âmes sectoriales

Le facteur géométrique G est donné par:

$$G = 2 F_1 \ln \left[\frac{d_a}{2r_1} \right]$$

où:

$$F_1 = 1 + \frac{2,2 t}{2\pi (d_x + t) - t}$$

d_a = diamètre extérieur de la ceinture isolante (mm)

r_1 = rayon du cercle circonscrit aux âmes (mm)

d_x = diamètre d'une âme circulaire ayant la même section et le même degré de rétreint que l'âme sectoriale considérée (mm)

t = épaisseur de l'isolation entre âmes (mm)

8.1.2.3 Câbles tripolaires à ceinture et âmes circulaires

Le facteur géométrique G est donné par la figure 3, page 120.

8.1.2.4 Câbles tripolaires à ceinture à âmes ovales

Le câble sera considéré comme un câble à âme circulaire équivalent avec un diamètre d_c
équivalent = $\sqrt{d_{cM} \cdot d_{cm}}$ (mm)

où:

d_{cM} = grand diamètre de l'âme ovale (mm)

d_{cm} = petit diamètre de l'âme ovale (mm)

8.1.2.5 Câbles tripolaires à ceinture et âmes sectoriales

Le facteur géométrique G de ces câbles dépend de la forme des secteurs, qui varie d'un fabricant à l'autre. Une formule appropriée est:

$$G = 3 F_2 \ln \left[\frac{d_a}{2r_1} \right]$$

Note. — For corrugated sheaths, t_1 is based on the mean internal diameter of the sheath

$$t_1 = \left(\frac{D_{it} + D_{oc}}{2} \right) - t_s$$

8.1.2 *Belted cables*

The thermal resistance T_1 between one conductor and sheath is given by:

$$T_1 = \frac{\varrho_T}{2\pi} G$$

where:

G = geometric factor

Note. — For corrugated sheaths, t_1 is based on the mean internal diameter of the sheath

$$t_1 = \left(\frac{D_{it} + D_{oc}}{2} \right) - t_s$$

8.1.2.1 *Two-core belted cables with circular conductors*

The geometric factor G is given in Figure 2, page 119.

8.1.2.2 *Two-core belted cables with sector-shaped conductors*

The geometric factor G is given by:

$$G = 2 F_1 \ln \left[\frac{d_a}{2r_1} \right]$$

where:

$$F_1 = 1 + \frac{2.2 t}{2\pi (d_x + t) - t}$$

d_a = external diameter of the belt insulation (mm)

r_1 = radius of the circle circumscribing the conductors (mm)

d_x = diameter of a circular conductor having the same cross-sectional area and degree of compaction as the shaped one (mm)

t = insulation thickness between conductors (mm)

8.1.2.3 *Three-core belted cables with circular conductors*

The geometric factor G is given in Figure 3, page 120.

8.1.2.4 *Three-core belted cables with oval conductors*

The cable shall be treated as an equivalent circular conductor cable with an equivalent diameter $d_c = \sqrt{d_{cM} \cdot d_{cm}}$ (mm)

where:

d_{cM} = major diameter of the oval conductor (mm)

d_{cm} = minor diameter of the oval conductor (mm)

8.1.2.5 *Three-core belted cables with sector-shaped conductors*

The geometric factor G for these cables depends on the shape of the sectors, which varies from one manufacturer to another. A suitable formula is:

$$G = 3 F_2 \ln \left[\frac{d_a}{2r_1} \right]$$

où:

$$F_2 = 1 + \frac{3t}{2\pi(d_x + t) - t}$$

d_a = diamètre extérieur de la ceinture isolante (mm)

r_l = rayon du cercle circonscrit aux âmes (mm)

d_x = diamètre de l'âme câblée circulaire ayant la même section et le même degré de rétreint que l'âme sectorale considérée (mm)

t = épaisseur de l'isolation entre âmes (mm)

8.1.3 Câbles tripolaires métallisés

8.1.3.1 Câbles métallisés à âmes circulaires

Les câbles de ce type peuvent être considérés comme des câbles à ceinture pour lesquels $\frac{t_l}{t} = 0,5$. Mais pour tenir compte de la conductivité thermique des écrans métalliques, le résultat doit être multiplié par un facteur K , dit facteur d'écran, donné par la figure 4, page 121, pour différentes valeurs de $\frac{t_l}{d_c}$ et différentes spécifications de câbles.

On a donc:

$$T_1 = K \frac{\varrho_T}{2\pi} G$$

8.1.3.2 Câbles métallisés à âmes ovales

Le câble sera considéré comme un câble à âme circulaire ayant un diamètre équivalent

$$d_c = \sqrt{d_{cM} \cdot d_{cm}}$$

8.1.3.3 Câbles métallisés à âmes sectorales

Pour ces câbles, T_1 est calculée de la même manière que pour les câbles à ceinture à âmes sectorales, mais d_a est égal au diamètre du cercle circonscrit aux conducteurs isolés assemblés. Le résultat est multiplié par un facteur d'écran donné par la figure 5, page 122.

8.1.4 Câbles à huile fluide

8.1.4.1 Câbles tripolaires à âmes circulaires, à écrans sur isolant en papier métallisé et à canaux d'huile circulaires entre les conducteurs

La résistance thermique T_1 entre une âme et la gaine est donnée par:

$$T_1 = 0,358 \varrho_T \left(\frac{2t_i}{d_c + 2t_i} \right)$$

où:

d_c = diamètre de l'âme (mm)

t_i = épaisseur de l'isolation du conducteur comprenant les rubans de noir de carbone et de papier métallisé et la moitié de tous les rubans non métalliques couvrant l'assemblage des trois conducteurs (mm)

ϱ_T = résistivité thermique de l'isolation (K.m/W)

Cette formule suppose que l'espace occupé par les canaux métalliques et l'huile qui s'y trouve a une conductivité thermique très élevée par rapport à l'isolation et par conséquent s'applique sans tenir compte du métal constituant les canaux d'huile ou de leur épaisseur.

where:

$$F_2 = 1 + \frac{3t}{2\pi(d_x + t) - t}$$

d_a = external diameter of the belt insulation (mm)

r_1 = radius of the circle circumscribing the conductors (mm)

d_x = diameter of a circular conductor having the same cross-sectional area and degree of compaction as the shaped one (mm)

t = insulation thickness between conductors (mm)

8.1.3 Three-core cables, metal tape screened type

8.1.3.1 Screened cables with circular conductors

Cables of this type may be first considered as belted cables for which $\frac{t_1}{t}$ is 0.5. Then, in order to take account of the thermal conductivity of the metallic screens, the result must be multiplied by a factor K , called the screening factor, which is given in Figure 4, page 121, for different values of $\frac{t_1}{d_c}$ and different cable specifications.

Thus:

$$T_1 = K \frac{\rho_T}{2\pi} G$$

8.1.3.2 Screened cables with oval-shaped conductors

The cable shall be treated as an equivalent circular conductor cable with an equivalent diameter $d_c = \sqrt{d_{cm} \cdot d_{cm}}$.

8.1.3.3 Screened cables with sector-shaped conductors

T_1 is calculated for these cables in the same way as for belted cables with sector-shaped conductors, but d_a is taken as the diameter of a circle which circumscribes the core assembly. The result is multiplied by a screening factor given in Figure 5, page 122.

8.1.4 Oil-filled cables

8.1.4.1 Three-core cables with circular conductors and metallized paper core screens and circular oil ducts between the cores

The thermal resistance between one conductor and the sheath T_1 is given by:

$$T_1 = 0.358 \rho_T \left(\frac{2t_i}{d_c + 2t_i} \right)$$

where:

d_c = conductor diameter (mm)

t_i = thickness of core insulation including carbon black and metallized paper tapes plus half of any non-metallic tapes over the three laid up cores (mm)

ρ_T = thermal resistivity of insulation (K.m/W)

This formula assumes that the space occupied by the metal ducts and the oil inside them has a thermal conductance very high compared with the insulation, it therefore applies irrespective of the metal used to form the duct or its thickness.

8.1.4.2 Câbles tripolaires à âmes circulaires, à écrans sur isolant en ruban métallique et canaux d'huile circulaires entre les conducteurs

La résistance thermique T_1 entre une âme et la gaine est donnée par:

$$T_1 = 0,35 \varrho_T \left(0,923 - \frac{d_c}{d_c + 2t_i} \right)$$

où:

t_i = épaisseur de l'isolation du conducteur comprenant les rubans métalliques et la moitié de tous les rubans non métalliques par-dessus les trois conducteurs (mm)

Note. — Cette formule est indépendante des métaux utilisés pour les écrans et pour les canaux d'huile.

8.1.5 Câbles triplombs et sous gaines d'aluminium individuelles

La résistance thermique T_1 est calculée de la même manière que pour les câbles unipolaires.

8.2 Résistance thermique entre gaine et armure T_2

8.2.1 Câbles unipolaires, bipolaires et tripolaires ayant une gaine métallique commune

La résistance thermique T_2 entre la gaine et l'armure est donnée par:

$$T_2 = \frac{1}{2\pi} \varrho_T \ln \left(1 + \frac{2t_2}{D_s} \right)$$

où:

t_2 = épaisseur du revêtement sous armure (mm)

D_s = diamètre extérieur de la gaine (mm)

8.2.2 Câbles triplombs ou sous gaines d'aluminium individuelles

La résistance thermique des bourrages et revêtements situés sous l'armure est donnée par:

$$T_2 = \frac{\varrho_T}{6\pi} \bar{G}$$

où:

$\bar{G}$ = facteur géométrique donné par la figure 6, page 123.

8.3 Résistance thermique du revêtement externe T_3

Les revêtements extérieurs sont généralement disposés en couches concentriques et la résistance thermique T_3 est donnée par:

$$T_3 = \frac{1}{2\pi} \varrho_T \ln \left(1 + \frac{2t_3}{D'_a} \right)$$

où:

t_3 = épaisseur du revêtement externe (mm)

D'_a = diamètre extérieur de l'armure (mm)

Note. — Pour les câbles non armés D'_a est égal au diamètre extérieur du composant immédiatement dessous, c'est-à-dire une gaine, un écran ou un revêtement.

Pour les gaines ondulées:

$$T_3 = \frac{1}{2\pi} \varrho_T \ln \left[\frac{D_{oc} + 2t_3}{\left(\frac{D_{oc} + D_{it}}{2} \right) + t_s} \right]$$

8.1.4.2 Three-core cables with circular conductors and metal tape core screens and circular oil ducts between the cores

The thermal resistance T_1 between one conductor and the sheath is given by:

$$T_1 = 0.35 \varrho_T \left(0.923 - \frac{d_c}{d_c + 2t_1} \right)$$

where:

t_1 = thickness of core insulation including the metal screening tapes and half of any non-metallic tapes over the three laid up cores (mm)

Note. — This formula is independent of the metals used for the screens and for the oil ducts.

8.1.5 SL and SA type cables

The thermal resistance T_1 is calculated in the same way as for single-core cables.

8.2 Thermal resistance between sheath and armour T_2

8.2.1 Single-core, two-core and three-core cables having a common metallic sheath

The thermal resistance between sheath and armour, T_2 , is given by:

$$T_2 = \frac{1}{2\pi} \varrho_T \ln \left(1 + \frac{2t_2}{D_s} \right)$$

where:

t_2 = thickness of the bedding (mm)

D_s = external diameter of the sheath (mm)

8.2.2 SL and SA type cables

The thermal resistance of fillers and bedding under the armour is given by:

$$T_2 = \frac{\varrho_T}{6\pi} \bar{G}$$

where:

$\bar{G}$ = geometric factor given in Figure 6, page 123.

8.3 Thermal resistance of outer covering (serving) T_3

The external servings are generally in the form of concentric layers and the thermal resistance T_3 is given by:

$$T_3 = \frac{1}{2\pi} \varrho_T \ln \left(1 + \frac{2t_3}{D'_a} \right)$$

where:

t_3 = thickness of serving (mm)

D'_a = external diameter of the armour (mm)

Note. — For unarmoured cables D'_a is taken as the external diameter of the component immediately beneath it, i.e. sheath, screen or bedding.

For corrugated sheaths:

$$T_3 = \frac{1}{2\pi} \varrho_T \ln \left[\frac{D_{oc} + 2t_3}{\left(\frac{D_{oc} + D_{it}}{2} \right) + t_s} \right]$$

8.4 Cas des câbles en tuyau

Pour ces câbles, nous avons:

- a) La résistance thermique T_1 de l'isolant de chaque conducteur entre âme et écran. Celle-ci est calculée par la méthode indiquée au paragraphe 8.1 relatif aux câbles unipolaires.
- b) La résistance thermique T_2 comprenant deux parts:

- 1) La résistance de chaque revêtement placé sur écran ou sur gaine de chaque conducteur. La valeur à introduire dans l'équation de l'article 3, pour cette partie de T_2 , est la valeur relative à l'ensemble du câble, c'est-à-dire que la valeur d'un câble tripolaire est le tiers de la valeur d'un conducteur seul.

La valeur par conducteur est calculée par la méthode donnée au paragraphe 8.2 pour le revêtement des câbles unipolaires. Dans le cas de conducteurs ovales, on prend le diamètre équivalent (moyenne géométrique), $\sqrt{d_M \cdot d_m}$.

- 2) La résistance thermique du gaz ou de l'huile comprise entre la surface extérieure du conducteur et le tuyau. Cette résistance est calculée de la même façon que la partie T_4 correspondant à l'espace compris entre un câble et la surface du fourreau dans lequel il serait posé (paragraphe 9.7.1).

La valeur calculée doit se rapporter à l'ensemble du câble et être ajoutée à la valeur trouvée plus haut en 1) pour former la résistance T_2 qui sera introduite dans l'équation du courant admissible de l'article 3.

- c) La résistance thermique T_3 de tout type de revêtement extérieur au tuyau sera déterminée comme indiqué au paragraphe 8.3. La résistance thermique du tuyau métallique lui-même est négligeable.

9. Résistance thermique extérieure T_4

9.1 Câbles posés à l'air libre

9.1.1 Câbles protégés du rayonnement solaire direct

La résistance thermique T_4 de l'environnement d'un câble placé dans l'air, mais protégé des rayons solaires, est donnée par la formule:

$$T_4 = \frac{1}{\pi D_e^* h (\Delta\theta_s)^{1/4}}$$

où:

$$h = \frac{Z}{(D_e^*)^g} + E$$

D_e^* = diamètre extérieur du câble (m)

pour les gaines ondulées $D_e^* = (D_{oc} + 2t_3) \cdot 10^{-3}$ (m)

h = coefficient de dissipation de chaleur obtenu soit à partir de la formule ci-dessus utilisant les valeurs appropriées des constantes Z , E et g données au tableau V, page 80, soit à partir des courbes des figures 7A, 7B et 7C, pages 124 à 126, données pour plus de commodité ($W/m^2 (K)^{5/4}$)

Les câbles revêtus de jute et les câbles ayant une surface non métallique doivent être considérés comme ayant une surface noire. Pour les câbles non revêtus de jute, à plomb nu ou à armure nue, il faut prendre une valeur de h égale à 88% de la valeur donnée pour une surface noire

$\Delta\theta_s$ = échauffement de la surface du câble par rapport à la température ambiante (voir ci-après pour la méthode de calcul) (K)

8.4 Pipe-type cables

For these three-core cables, we have:

- a) The thermal resistance T_1 of the insulation of each core between the conductor and the screen. This is calculated by the method set out in Sub-clause 8.1 for single-core cables.
- b) The thermal resistance T_2 is made up of two parts:
 - 1) The thermal resistance of any serving over the screen or sheath of each core. The value to be substituted for part of T_2 in the rating equation of Clause 3 is the value per cable, i.e. the value for a three-core cable is one-third the value of a single core.

The value per core is calculated by the method given in Sub-clause 8.2 for the bedding of single-core cables. For oval cores, the geometric mean of the major and minor diameters $\sqrt{d_M \cdot d_m}$, shall be used in place of the diameter for a circular core assembly.

- 2) The thermal resistance of the gas or oil between the surface of the cores and the pipe. This resistance is calculated in the same way as that part of T_4 which is between a cable and the internal surface of a duct, as given in Sub-clause 9.7.1.

The value calculated will be per cable and should be added to the quantity calculated in 1) above, before substituting for T_2 in the rating equation of Clause 3.

- c) The thermal resistance T_3 of any external covering on the pipe is dealt with as in Sub-clause 8.3. The thermal resistance of the metallic pipe itself is negligible.

9. External thermal resistance T_4

9.1 Cables laid in free air

9.1.1 Cables protected from direct solar radiation

The thermal resistance T_4 of the surroundings of a cable in air and protected from solar radiation is given by the formula:

$$T_4 = \frac{1}{\pi D_e^* h (\Delta\theta_s)^{1/4}}$$

where:

$$h = \frac{Z}{(D_e^*)^g} + E$$

D_e^* = external diameter of cable in metres (m)

for corrugated sheaths $D_e^* = (D_{oc} + 2t_3) \cdot 10^{-3}$ (m)

h = heat dissipation coefficient obtained either from the above formula using the appropriate values of constants Z , E and g given in Table V, page 81, or from the curves in Figures 7A, 7B and 7C, page 124 to 126, which are reproduced for convenience ($W/m^2 (K)^{5/4}$)

Served cables and cables having a non-metallic surface should be considered to have a black surface. Unserved cables, either plain lead or armoured should be given a value of h equal to 88% of the value for a black surface

$\Delta\theta_s$ = excess of cable surface temperature above ambient temperature (see hereinafter for method of calculation) (K)

Pour les câbles en caniveaux non remplis, se reporter au paragraphe 9.6.

Calcul de $(\Delta\theta_s)^{1/4}$:

Une méthode itérative simple de calcul $(\Delta\theta_s)^{1/4}$ est donnée ci-dessous. Une autre méthode graphique est donnée dans l'annexe D.

Calculer

$$K_A = \frac{\pi D_e^* h}{(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \left[\frac{T_1}{n} + T_2 (1 + \lambda_1) + T_3 (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right]$$

puis:

$$(\Delta\theta_s)^{1/4}_{n+1} = \left[\frac{\Delta\theta + \varphi_d}{1 + K_A (\Delta\theta_s)^{1/4}_n} \right]^{1/4}$$

Poser la valeur initiale de $(\Delta\theta_s)^{1/4} = 2$ et réitérer le calcul jusqu'à ce que $(\Delta\theta_s)^{1/4}_{n+1} - (\Delta\theta_s)^{1/4}_n \leq 0,001$

où:

$$\Delta\theta_d = W_d \left[\left(\frac{1}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} + \frac{1}{2} \right) T_1 - \frac{n \lambda_2 T_2}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \right]$$

Le facteur $\Delta\theta_d$ a les dimensions d'une différence de température et rend compte des pertes diélectriques. Si les pertes diélectriques sont négligées, $\Delta\theta_d = 0$.

$\Delta\theta$ = échauffement admissible de l'âme par rapport à la température ambiante

9.1.2 Câbles soumis au rayonnement solaire direct

9.1.2.1 Intensité de courant admissible

Si l'on tient compte de l'effet des rayons solaires sur un câble, l'intensité de courant admissible est donnée par les formules suivantes:

a) pour les câbles à courant alternatif:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5 T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4^*)] - \sigma D_e^* H T_4^*}{R T_1 + nR(1 + \lambda_1) T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4^*)} \right]^{1/2}$$

b) pour les câbles à courant continu:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - \sigma D_e^* H T_4^*}{R' T_1 + nR' T_2 + nR' (T_3 + T_4^*)} \right]^{1/2}$$

où:

σ = coefficient d'absorption des rayons solaires par la surface du câble (voir tableau VI, page 82)

H = intensité des rayons solaires qu'on peut prendre égale à 10^3 W/m² sous la plupart des latitudes; il est recommandé d'obtenir une valeur locale lorsque cela est possible

T_4^* = résistance thermique extérieure d'un câble à l'air libre, modifiée pour tenir compte des rayons solaires (voir paragraphe 9.1.2.2) (K.m/W)

D_e^* = diamètre extérieur du câble (m)

pour les gaines ondulées $D_e^* = (D_{oc} + 2t_3) \cdot 10^{-3}$ (m)

t_3 = épaisseur du revêtement (mm)

For cables in unfilled troughs, see Sub-clause 9.6.

Calculation of $(\Delta\theta_s)^{1/4}$:

A simple iterative method of calculating $(\Delta\theta_s)^{1/4}$ is given below. The alternative graphical method is described in Appendix D.

Calculate

$$K_A = \frac{\pi D_e^* h}{(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \left[\frac{T_1}{n} + T_2(1 + \lambda_1) + T_3(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right]$$

then:

$$(\Delta\theta_s)^{1/4}_{n+1} = \left[\frac{\Delta\theta + \varphi_d}{1 + K_A (\Delta\theta_s)^{1/4}_n} \right]^{1/4}$$

Set the initial value of $(\Delta\theta_s)^{1/4} = 2$ and reiterate until $(\Delta\theta_s)^{1/4}_{n+1} - (\Delta\theta_s)^{1/4}_n \leq 0.001$

where:

$$\Delta\theta_d = W_d \left[\left(\frac{1}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} - \frac{1}{2} \right) T_1 - \frac{n\lambda_2 T_2}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \right]$$

This being a factor, having the dimensions of temperature difference, to account for the dielectric losses. If the dielectric losses are neglected, $\Delta\theta_d = 0$.

$\Delta\theta$ = permissible conductor temperature rise above ambient temperature

9.1.2 Cables directly exposed to solar radiation

9.1.2.1 Permissible current ratings

Taking into account the effect of solar radiation on a cable, the permissible current rating is given by the formulae:

a) for a.c. cables:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0.5 T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4^*)] - \sigma D_e^* H T_4^*}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1) T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4^*)} \right]^{1/2}$$

b) for d.c. cables:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - \sigma D_e^* H T_4^*}{R' T_1 + nR' T_2 + nR' (T_3 + T_4^*)} \right]^{1/2}$$

where:

σ = absorption coefficient of solar radiation for the cable surface (see Table VI, page 83)

H = intensity of solar radiation which should be taken as 10^3 W/m² for most latitudes; it is recommended that the local value should be obtained where possible

T_4^* = external thermal resistance of the cable in free air, adjusted to take account of solar radiation (see Sub-clause 9.1.2.2) (K.m/W)

D_e^* = external diameter of cable (m)

for corrugated sheaths $D_e^* = (D_{oc} + 2t_3) \cdot 10^{-3}$ (m)

t_3 = thickness of the serving (mm)

9.1.2.2 Résistivité thermique extérieure T_4^*

Lorsque les câbles sont soumis au rayonnement solaire direct, T_4^* est calculé par la méthode du paragraphe 9.1.1, mais dans la méthode itérative $(\Delta\theta_s)^{1/4}$ est calculé en utilisant la formule suivante:

$$(\Delta\theta_s)^{1/4}_{n+1} = \left[\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d + \Delta\theta_s}{1 + K_A (\Delta\theta_s)^{1/4}_n} \right]^{1/4}$$

où:

$$\Delta\theta_{ds} = \frac{\sigma D_e^* H}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \left[\frac{T_1}{n} + T_2 (1 + \lambda_1) + T_3 (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right]$$

est un facteur ayant les dimensions d'une différence de température et tenant compte de l'influence du rayonnement solaire.

La méthode graphique correspondante est donnée figure 8, page 127.

9.2 Un seul câble enterré

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \varrho_T \ln \left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right)$$

où:

ϱ_T = résistivité thermique du sol (K.m/W)

$$u = \frac{2L}{D_e}$$

L = distance de la surface du sol à l'axe du câble (mm)

D_e = diamètre extérieur du câble (mm)

pour les gaines ondulées $D_e = D_{oc} + 2t_s$

Quand la valeur de u dépasse 10, une bonne approximation (supérieure à 1 pour 1 000) est obtenue en utilisant la formule:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \varrho_T \ln (2u)$$

9.3 Groupe de câbles enterrés (non jointifs)

Ces cas peuvent être résolus par l'application du principe de superposition, en supposant que chaque câble est assimilable à une source de chaleur rectiligne ne perturbant pas le champ dû aux autres câbles.

Ils sont de deux types principaux: le premier cas, le plus général, est celui d'un groupe de câbles inégalement chargés et de construction différente, pour lequel on ne peut donner qu'une indication sur la méthode à suivre. Le deuxième cas, qui est plus particulier, est celui d'un groupe de câbles identiques et également chargés et pour lequel une solution simple peut être proposée.

9.3.1 Câbles inégalement chargés

La méthode suggérée, pour un groupe de câbles inégalement chargés et de construction différente, consiste à calculer l'élévation de température, à la surface d'un des câbles, due aux autres câbles du groupe, et à retrancher cette valeur de celle de $\Delta\theta$ utilisée dans l'équation de l'article 3. Il faut donc estimer auparavant la puissance linéique dissipée par chaque câble, quitte à corriger ultérieurement ces valeurs si nécessaire.

9.1.2.2 External thermal resistance T_4^*

Where cables are directly exposed to solar radiation, T_4^* is calculated by the method of Sub-clause 9.1.1 except that in the iterative method $(\Delta\theta_s)^{1/4}$ is calculated using the following formula:

$$(\Delta\theta_s)^{1/4}_{n+1} = \left[\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d + \Delta\theta_s}{1 + K_A (\Delta\theta_s)^{1/4}_n} \right]^{1/4}$$

where:

$$\Delta\theta_{ds} = \frac{\sigma D_e^* H}{(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \left[\frac{T_1}{n} + T_2(1 + \lambda_1) + T_3(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right]$$

this being a factor, having the dimensions of temperature difference, to account for direct solar radiation.

The alternative graphical method is included with Figure 8, page 127.

9.2 Single isolated buried cable

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \varrho_T \ln \left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right)$$

where:

ϱ_T = the thermal resistivity of the soil (K.m/W)

$$u = \frac{2L}{D_e}$$

L = distance from the surface of the ground to the cable axis (mm)

D_e = external diameter of the cable (mm)

for corrugated sheaths $D_e = D_{oc} + 2t_3$

When the value of u exceeds 10, a good approximation (closer than 1 part in 1 000) is:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \varrho_T \ln (2u)$$

9.3 Groups of buried cables (not touching)

Such cases may be solved by using superposition, assuming that each cable acts as a line source and does not distort the heat field due to the other cables.

These cables are of two main types: the first, and most general type, is a group of unequally loaded cables of different construction, and for this problem a general indication of the method only can be given. The second type, which is a more particular one, is a group of equally loaded identical cables, and for this problem a fairly simple solution can be derived.

9.3.1 Unequally loaded cables

The method suggested for groups of unequally loaded dissimilar cables is to calculate the temperature rise at the surface of the cable under consideration caused by the other cables of the group, and to subtract this rise from the value of $\Delta\theta$ used in the equation for the rated current in Clause 3. An estimate of the power dissipated per unit length of each cable must be made beforehand, and this can be subsequently amended as a result of the calculation where this becomes necessary.

Ainsi, pour le câble de rang p dont on veut déterminer la charge admissible, l'échauffement $\Delta\theta_p$ (au-dessus de la température ambiante) dû à la puissance dissipée par les $(q - 1)$ autres câbles du groupe sera:

$$\Delta\theta_p = \Delta\theta_{1p} + \Delta\theta_{2p} + \dots + \Delta\theta_{kp} + \dots + \Delta\theta_{qp}$$

(le terme $\Delta\theta_{pp}$ étant exclu de la sommation)

où:

$\Delta\theta_{kp}$ = échauffement à la surface du câble produit par la puissance linéique W_k dissipée par le câble k , c'est-à-dire:

$$\Delta\theta_{kp} = \frac{1}{2\pi} \varrho_T W_k \ln \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right)$$

Les distances d_{pk} et d'_{pk} sont mesurées du centre du câble p^{th} au centre du câble k et au centre du câble symétrique de k par rapport à la surface du sol (voir figure 1, page 118).

La valeur de $\Delta\theta$ figurant dans l'équation du courant admissible de l'article 3 est alors minorée de la quantité $\Delta\theta_p$ et la charge dans le câble p^{th} est calculée avec la valeur T_4 correspondant au câble p supposé seul.

Le calcul est effectué pour tous les câbles du groupe et recommencé quand c'est nécessaire pour éviter un échauffement excessif de l'un quelconque des autres câbles.

9.3.2 Câbles identiques également chargés

Le deuxième cas est celui d'un groupe de câbles identiques et également chargés pour lesquels le courant admissible sera déterminé par le câble le plus chaud. Il est en général possible, d'après la configuration de l'installation, de déterminer ce câble et de ne faire le calcul que pour celui-ci. En cas de difficulté, on peut avoir à faire le calcul pour un autre câble du groupe. La méthode de calcul consiste à utiliser une valeur modifiée de T_4 tenant compte de l'échauffement mutuel des câbles du groupe et à ne plus modifier la valeur de $\Delta\theta$ dans l'équation de l'article 3.

La valeur modifiée de la résistance thermique extérieure T_4 pour le câble de rang p est donnée par:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \varrho_T \ln \left\{ \left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right) \left[\left(\frac{d'_{p1}}{d_{p1}} \right) \left(\frac{d'_{p2}}{d_{p2}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pq}}{d_{pq}} \right) \right] \right\}$$

Il y a $(q - 1)$ termes, le terme $\frac{d'_{pp}}{d_{pp}}$ étant exclus.

Les distances d_{pk} , etc., sont les mêmes que celles indiquées par la figure 1 pour la première méthode.

L'expression simplifiée $2u$ peut être utilisée à la place de $u + \sqrt{u^2 - 1}$ si les conditions nécessaires sont remplies (voir paragraphe 9.2).

Pour des configurations de câbles simples, cette formule peut être considérablement simplifiée. Les exemples suivants ont été obtenus en utilisant le principe de superposition.

9.3.2.1 Deux câbles non jointifs ayant des pertes égales, posés en nappe horizontale:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \varrho_T \left\{ \ln (u + \sqrt{u^2 - 1}) + \frac{1}{2} \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\}$$

Thus, the temperature rise $\Delta\theta_p$ above ambient at the surface of the p^{th} cable, whose rating is being determined, caused by the power dissipated by the other $(q - 1)$ cables in the group, is given by:

$$\Delta\theta_p = \Delta\theta_{1p} + \Delta\theta_{2p} + \dots \Delta\theta_{kp} + \dots \Delta\theta_{qp}$$

(the term $\Delta\theta_{pp}$ is excluded from the summation)

where:

$\Delta\theta_{kp}$ = the temperature rise at the surface of the cable produced by the power W_k watt per unit length dissipated in cable k ;

$$\Delta\theta_{kp} = \frac{1}{2\pi} e_T W_k \ln \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right)$$

The distances d_{pk} and d'_{pk} are measured from the centre of the p^{th} cable to the centre of cable k , and to the centre of the reflection of cable k in the ground-air surface respectively (see Figure 1, page 118).

The value of $\Delta\theta$ in the equation for the rated current in Clause 3 is then reduced by the amount $\Delta\theta_p$ and the rating of the p^{th} cable is determined using a value T_4 corresponding to an isolated cable at position p .

This calculation is performed for all cables in the group and is repeated where necessary to avoid the possibility of overheating any cable.

9.3.2 Equally loaded identical cables

The second type of grouping is where the rating of a number of equally loaded identical cables is determined by the rating of the hottest cable. It is usually possible to decide from the configuration of the installation which cable will be the hottest, and to calculate the rating for this one. In cases of difficulty, a further calculation for another cable may be necessary. The method is to calculate a modified value of T_4 which takes into account the mutual heating of the group and to leave unaltered the value of $\Delta\theta$ used in the rating equation of Clause 3.

The modified value of the external thermal resistance T_4 of the p^{th} cable is given by:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} e_T \ln \left\{ \left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right) \left[\left(\frac{d'_{p1}}{d_{p1}} \right) \left(\frac{d'_{p2}}{d_{p2}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pq}}{d_{pq}} \right) \right] \right\}$$

There are $(q - 1)$ terms, with the term $\frac{d'_{pp}}{d_{pp}}$ excluded.

The distances d_{pk} , etc., are the same as those shown in Figure 1, for the first method.

The simpler version $2u$ may be used instead of $u + \sqrt{u^2 - 1}$ if suitable (see Sub-clause 9.2).

For simple configurations of cables, this formula may be simplified considerably. The following examples were obtained by the use of superposition.

9.3.2.1 Two cables having equal losses, laid in a horizontal plane, spaced apart:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} e_T \left\{ \ln (u + \sqrt{u^2 - 1}) + \frac{1}{2} \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\}$$

où:

$$u = \frac{2L}{D_e}$$

L = distance de la surface du sol à l'axe du câble (mm)

D_e = diamètre extérieur du câble (mm)

s_1 = distance entre axes de deux câbles voisins (mm)

Lorsque la valeur de u dépasse 10, le terme $(u + \sqrt{u^2 - 1})$ peut être remplacé par $(2u)$.

9.3.2.2 Trois câbles ayant approximativement des pertes égales, posés en nappe horizontale à distance égale:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \varrho_T \left\{ \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) + \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\}$$

La valeur T_4 est celle correspondant au câble central du groupe et celle à introduire directement dans les équations du paragraphe 3.1.

9.3.2.3 Trois câbles ayant des pertes inégales dans les gaines, posés en nappe horizontale à distance égale:

Lorsque les pertes dans les gaines de câbles unipolaires posés en nappe horizontale sont importantes et quand les gaines ne sont pas transposées et/ou que les gaines sont court-circuitées au niveau de chacune des jonctions, l'inégalité des pertes influence les résistances thermiques extérieures du câble le plus chaud. Dans ces cas, la valeur de T_4 à utiliser dans le numérateur de l'équation du calcul du courant dans le paragraphe 3.1 est celle qui est donnée dans le paragraphe 9.3.2.2 mais une valeur modifiée de T_4 doit être utilisée dans le dénominateur. Elle est donnée par:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \varrho_T \left(\ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) + \left[\frac{1 + 0,5(\lambda'_{11} + \lambda'_{12})}{1 + \lambda'_{1m}} \right] \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right)$$

Cela suppose que le câble central est le câble le plus chaud. La valeur de λ_1 à utiliser dans l'équation du paragraphe 3.1 est celle qui correspond au câble central,

où:

$$u = \frac{2L}{D_e}$$

L = distance de la surface du sol à l'axe du câble (mm)

D_e = diamètre extérieur du câble (mm)

s_1 = distance entre axes de deux câbles voisins (mm)

λ'_{11} = facteur de perte de la gaine pour un câble extérieur du groupe

λ'_{12} = facteur de perte de la gaine pour l'autre câble extérieur du groupe

λ'_{1m} = facteur de perte de la gaine pour le câble central du groupe

Lorsque la valeur de u dépasse 10, le terme $(u + \sqrt{u^2 - 1})$ peut être remplacé par $(2u)$.

9.4 Groupes de câbles enterrés (jointifs) uniformément chargés

9.4.1 Deux câbles unipolaires posés en nappe

$$T_4 = \frac{\varrho_T}{\pi} \left(\ln(2u) - 0,451 \right)$$

pour $u \geq 5$

where:

$$u = \frac{2L}{D_e}$$

L = distance from the surface of the ground to the cable axis (mm)

D_e = external diameter of one cable (mm)

s_1 = axial separation between two adjacent cables (mm)

When the value of u exceeds 10, the term $(u + \sqrt{u^2 - 1})$ may be replaced by $(2u)$.

9.3.2.2 Three cables having approximately equal losses, laid in a horizontal plane, equally spaced apart:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \varrho_T \left\{ \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) + \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\}$$

The value T_4 is that of the centre cable of the group and is used directly in the equation of Sub-clause 3.1.

9.3.2.3 Three cables having unequal sheath losses, laid in a horizontal plane, equally spaced apart:

When the losses in the sheaths of single-core cables laid in a horizontal plane are appreciable, and the sheaths are laid without transposition and/or the sheaths are bonded at all joints, their inequality affects the external thermal resistances of the hottest cable. In such cases the value of T_4 to be used in the numerator of the rating equation in Sub-clause 3.1 is as given in Sub-clause 9.3.2.2, but a modified value of T_4 must be used in the denominator, and is given by:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \varrho_T \left(\ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) + \left[\frac{1 + 0.5(\lambda'_{11} + \lambda'_{12})}{1 + \lambda'_{1m}} \right] \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right)$$

This assumes that the centre cable is the hottest cable. The value of λ_1 to be used in the rating equation of Sub-clause 3.1 is that for the centre cable,

where:

$$u = \frac{2L}{D_e}$$

L = distance from the surface of the ground to the cable axis (mm)

D_e = external diameter of one cable (mm)

s_1 = axial separation between adjacent cables (mm)

λ'_{11} = sheath loss factor for an outer cable of the group

λ'_{12} = sheath loss factor for the other outer cable of the group

λ'_{1m} = sheath loss factor for the middle cable of the group

When the value of u exceeds 10, the term $(u + \sqrt{u^2 - 1})$ may be replaced by $(2u)$.

9.4 Groups of buried cables (touching) equally loaded

9.4.1 Two single-core cables, flat formation

$$T_4 = \frac{\varrho_T}{\pi} \left(\ln(2u) - 0.451 \right)$$

for $u \geq 5$

9.4.2 Trois câbles unipolaires posés en nappe

$$T_4 = \varrho_T (0,475 \ln(2u) - 0,346)$$

pour $u \geq 5$

9.4.3 Trois câbles unipolaires posés en trèfle

Pour cette configuration, L est mesurée à partir du centre du groupe en trèfle et D_e est le diamètre d'un câble. T_4 est la résistance thermique extérieure de l'un quelconque des câbles, que le triangle formé par les câbles ait son sommet dirigé vers le haut ou vers le bas.

Pour les gaines ondulées, $D_e = D_{oc} + 2t_3$.

9.4.3.1 Câbles à gaines métalliques

$$T_4 = \frac{1,5}{\pi} \varrho_T [\ln(2u) - 0,630]$$

Dans ce cas, la résistance thermique du revêtement sur la gaine ou les fils d'armure, T_3 , calculée au paragraphe 8.3 doit être multipliée par 1,6.

9.4.3.2 Câbles recouverts partiellement d'un revêtement métallique (armure posée hélicoïdalement ou fils d'écran couvrant 20% à 50% de la circonférence du câble)

Cette formule correspond à un écran en fils de cuivre de 0,7 mm de diamètre posés à pas long (15 fois le diamètre sous l'écran) dont la section droite totale est comprise entre 15 mm² et 35 mm².

$$T_4 = \frac{1,5}{\pi} \varrho_T [\ln(2u) - 0,630]$$

Dans ce cas, la résistance thermique de l'enveloppe isolante T_1 , calculée au paragraphe 8.1.1 et la résistance thermique du revêtement externe T_3 , calculée au paragraphe 8.3 doivent être multipliées par les facteurs suivants:

T_1 : par 1,07 pour les câbles jusqu'à 35 kV
 par 1,16 pour les câbles de 35 kV à 110 kV
 T_3 : par 1,6.

Note. — Ce sujet est à l'étude.

9.4.3.3 Câbles à gaines non métalliques

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \varrho_T [\ln(2u) + 2 \ln(u)]$$

Note. — Ce sujet est à l'étude.

9.5 Tuyaux enterrés

La résistance thermique externe des conduites enterrées utilisées pour les câbles en tuyaux est calculée comme pour les câbles ordinaires, en utilisant la formule du paragraphe 9.2. Dans ce cas, la profondeur de pose L est mesurée à partir du centre du tuyau et D_e est le diamètre extérieur du tuyau, y compris le revêtement anticorrosion.

9.4.2 Three single-core cables, flat formation

$$T_4 = \varrho_T (0.475 \ln(2u) - 0.346)$$

for $u \geq 5$

9.4.3 Three single-core cables, trefoil formation

For this configuration, L is measured to the centre of the trefoil group and D_e is the diameter of one cable. T_4 is the external thermal resistance of any one of the cables and the configuration may be with the apex either at the top or at the bottom of the group.

For corrugated sheaths, $D_e = D_{oc} + 2t_3$.

9.4.3.1 Metallic sheathed cables

$$T_4 = \frac{1.5}{\pi} \varrho_T [\ln(2u) - 0.630]$$

In this case, the thermal resistance of the serving over the sheath or armour, T_3 , as calculated by the method of Sub-clause 8.3 must be multiplied by a factor of 1.6.

9.4.3.2 Part-metallic covered cables (where helically laid armour or screen wires cover from 20% to 50% of the cable circumference)

This formula is based on long lay (15 times the diameter under the wire screen) 0.7 mm diameter individual copper wires having a total cross-sectional area of between 15 mm² and 35 mm².

$$T_4 = \frac{1.5}{\pi} \varrho_T [\ln(2u) - 0.630]$$

In this case, the thermal resistance of the insulation T_1 , as calculated by the method of Sub-clause 8.1.1 and the thermal resistance of the serving T_3 , as calculated by the method of Sub-clause 8.3 must be multiplied by the following factors:

T_1 : by 1.07 for cables up to 35 kV
by 1.16 for cables from 35 kV to 110 kV

T_3 : by 1.6.

Note. — This subject is under consideration.

9.4.3.3 Non-metallic sheathed cables

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \varrho_T [\ln(2u) + 2 \ln(u)]$$

Note. — This subject is under consideration.

9.5 Buried pipes

The external thermal resistance of buried pipes used for pipe-type cables is calculated as for ordinary cables, using the formula in Sub-clause 9.2. In this case, the depth of laying L is measured to the centre of the pipe and D_e is the external diameter of the pipe, including anti-corrosion covering.

9.6 Câbles en caniveaux enterrés

9.6.1 Caniveaux enterrés remplis de sable

Lorsque les câbles sont posés dans des caniveaux remplis de sable, complètement enterrés ou affleurant la surface du sol, le sable risque de se dessécher et de rester sec pendant de longues périodes. La résistance thermique externe du câble peut être alors très élevée et le câble peut atteindre des températures élevées, ce qui n'est pas souhaitable. Il est conseillé de calculer le courant du câble en utilisant une valeur de 2,5 K.m/W pour la résistivité thermique du sable de remplissage, à moins qu'on utilise un matériau de remplissage spécial dont la résistivité à l'état sec est connue.

9.6.2 Caniveaux de tous types non remplis dont le sommet affleure la surface du sol et exposés à l'air libre

On utilise une formule empirique donnant l'échauffement de l'air du caniveau au-dessus de l'ambiante:

$$\Delta\theta_{tr} = \frac{W_{TOT}}{3p}$$

où:

W_{TOT} = puissance totale dissipée dans le caniveau par mètre de longueur (W/m)

p = partie du périmètre du caniveau qui participe à la dissipation de chaleur (m)

Note. — La validité de cette formule est à l'étude.

On ne doit pas introduire dans la valeur de p les parties du périmètre exposées aux rayons solaires. Le calcul de l'échauffement d'un câble particulier du caniveau est identique à celui d'un câble à l'air libre (voir paragraphe 9.1), mais la température ambiante doit être augmentée de $\Delta\theta_{tr}$.

9.7 Câbles en fourreaux ou en tuyaux

La résistance thermique extérieure d'un câble posé en fourreau comprend trois parties:

- 1) La résistance thermique de l'intervalle d'air entre la surface du câble et la surface intérieure du fourreau T'_4 .
- 2) La résistance thermique du matériau constituant le fourreau T''_4 . La résistance thermique d'un tuyau métallique est négligeable.
- 3) La résistance thermique entre la surface extérieure du fourreau et le milieu ambiant T'''_4 .

La valeur de T_4 qui doit figurer dans l'équation donnant l'intensité admissible (article 3) est la somme de ces trois termes:

$$T_4 = T'_4 + T''_4 + T'''_4$$

Note. — Les câbles en fourreaux, qui ont été complètement remplis d'un matériau pompé ayant une résistivité thermique égale ou inférieure à celle du sol environnant soit à l'état sec, soit effectivement étanche de manière à ce que le matériau de remplissage conserve son humidité, peuvent être traités comme des câbles directement enterrés.

9.7.1 Résistance thermique entre câble et fourreau (ou tuyau) T'_4

Pour les câbles de diamètre compris entre 25 mm et 100 mm posés en fourreaux, on utilisera la formule indiquée ci-après. On l'utilisera également pour le calcul de la résistance thermique de l'espace compris entre les conducteurs et la surface du tuyau d'un câble en tuyau (voir paragraphe 8.4b)), quand le diamètre équivalent des trois phases dans le tuyau est compris entre 75 mm et 125 mm. Le diamètre équivalent est défini plus loin:

$$T'_4 = \frac{U}{1 + 0,1 (V + Y\theta_m) D_e}$$

9.6 Cables in buried troughs

9.6.1 Buried troughs filled with sand

Where cables are installed in sand-filled troughs, either completely buried or with the cover flush with the ground surface, there is danger that the sand will dry out and remain dry for long periods. The cable external thermal resistance may then be very high and the cable may reach undesirably high temperatures. It is advisable to calculate the cable rating using a value of 2.5 K.m/W for the thermal resistivity of the sand filling unless a specially selected filling has been used for which the dry resistivity is known.

9.6.2 Unfilled troughs of any type, with the top flush with the soil surface and exposed to free air

An empirical formula is used which gives the temperature rise of the air in the trough above the air ambient as:

$$\Delta\theta_{tr} = \frac{W_{TOT}}{3p}$$

where:

W_{TOT} = the total power dissipated in the trough per metre length (W/m)

p = that part of the trough perimeter which is effective for heat dissipation (m)

Note. — The validity of this formula is at present under investigation.

Any portion of the perimeter, which is exposed to sunlight, is therefore not included in the value of p . The rating of a particular cable in the trough is then calculated as for a cable in free air (see Sub-clause 9.1), but the ambient temperature shall be increased by $\Delta\theta_{tr}$.

9.7 Cables in ducts or pipes

The external thermal resistance of a cable in a duct consists of three parts:

- 1) The thermal resistance of the air space between the cable surface and duct internal surface T'_4 .
- 2) The thermal resistance of the duct itself, T''_4 . The thermal resistance of a metal pipe is negligible.
- 3) The external thermal resistance of the duct T'''_4 .

The value of T_4 to be substituted in the equation for the permissible current rating in Clause 3 will be the sum of the individual parts, i.e.:

$$T_4 = T'_4 + T''_4 + T'''_4$$

Note. — Cables in ducts which have been completely filled with a pumpable material having a thermal resistivity not exceeding that of the surrounding soil, either in the dry state or when sealed to preserve the moisture content of the filling material, may be treated as directly buried cables.

9.7.1 Thermal resistance between cable and duct (or pipe) T'_4

For the cable diameters in the range 25 mm to 100 mm the following formula shall be used for ducted cable. It shall also be used for the thermal resistance of the space between cores and pipe surface of a pipe-type cable (see Sub-clause 8.4b)), when the equivalent diameter of the three cores in the pipe is within the range 75 mm to 125 mm. The equivalent diameter is defined below:

$$T'_4 = \frac{U}{1 + 0.1(V + Y\theta_m)D_e}$$

où:

$\left. \begin{matrix} U \\ V \\ Y \end{matrix} \right\} = \text{constantes dépendant des installations dont les valeurs sont données dans le tableau VII, page 82}$

$D_e = \text{diamètre extérieur du câble (mm)}$

Lorsque la formule est appliquée aux câbles en tuyaux (voir paragraphe 8.4b)), D_e est le diamètre équivalent du groupe de conducteurs, soit:

- deux conducteurs: $D_e = 1,65 \times \text{diamètre extérieur d'un conducteur (mm)}$
- trois conducteurs: $D_e = 2,15 \times \text{diamètre extérieur d'un conducteur (mm)}$
- quatre conducteurs: $D_e = 2,50 \times \text{diamètre extérieur d'un conducteur (mm)}$

$\theta_m = \text{température moyenne du milieu remplissant l'espace compris entre le câble et le conduit. Une valeur présumée est choisie au départ et le calcul repris avec une valeur modifiée si nécessaire (°C)}$

9.7.2 Résistance thermique du fourreau (ou tuyau) T_4''

La résistance thermique (T_4'') du fourreau est:

$$T_4'' = \frac{1}{2\pi} \varrho_T \ln \left(\frac{D_o}{D_d} \right)$$

où:

$D_o = \text{diamètre extérieur du fourreau (mm)}$

$D_d = \text{diamètre intérieur du fourreau (mm)}$

$\varrho_T = \text{résistivité thermique du matériau constituant le fourreau (K.m/W)}$

La valeur de ϱ_T peut être considérée comme nulle pour les fourreaux métalliques, pour les autres matériaux, voir tableau IV, page 78.

9.7.3 Résistance thermique extérieure au fourreau (ou tuyau) T_4'''

Elle doit être calculée pour un seul fourreau non noyé dans le béton, de la même façon que pour les câbles, à l'aide des formules appropriées des paragraphes 9.1, 9.2, 9.3 ou 9.4, le rayon extérieur du câble étant remplacé par le rayon extérieur du fourreau ou tuyau, y compris le revêtement extérieur anti-corrosion éventuel. Si les fourreaux sont noyés dans le béton, on admettra, pour le calcul de la résistance thermique, que le milieu qui entoure les fourreaux est homogène et que sa résistivité thermique est égale à celle du béton. Une correction est alors ajoutée algébriquement pour tenir compte de la différence éventuelle entre la résistivité thermique du béton et celle du sol, pour la partie du circuit thermique extérieure au bloc de fourreaux.

La correction de résistance thermique est donnée par:

$$\frac{N}{2\pi} (\varrho_e - \varrho_c) \ln (u + \sqrt{u^2 - 1})$$

où:

$N = \text{nombre de câbles chargés dans le bloc de fourreaux}$

$\varrho_e = \text{résistivité thermique du sol entourant le bloc de fourreaux (K.m/W)}$

$\varrho_c = \text{résistivité thermique du béton (K.m/W)}$

$$u = \frac{L_G}{r_b}$$

$L_G = \text{profondeur de pose, au centre du bloc de fourreaux (mm)}$

$r_b = \text{rayon équivalent au bloc de béton (mm)}$
donné par:

$$\ln r_b = \frac{1}{2} \frac{x}{y} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \frac{x}{2}$$

Les quantités x et y sont respectivement la plus faible et la plus grande des dimensions du bloc de fourreaux, indépendamment de sa position, en millimètres.

Cette formule n'est applicable que lorsque $\frac{y}{x}$ est inférieur à 3.

where:

$\left. \begin{matrix} U \\ V \\ Y \end{matrix} \right\} =$ are constants, depending on the installations and values are given in Table VII, page 83

$D_e =$ the external diameter of the cable (mm)

When the formula is used for pipe-type cables (see Sub-clause 8.4b)), D_e becomes the equivalent diameter of the group of cores as follows:

- two cores: $D_e = 1.65 \times \text{core outside diameter}$ (mm)
- three cores: $D_e = 2.15 \times \text{core outside diameter}$ (mm)
- four cores: $D_e = 2.50 \times \text{core outside diameter}$ (mm)

$\theta_m =$ the mean temperature of the medium filling the space between cable and duct. An assumed value has to be used initially and the calculation repeated with a modified value if necessary (°C)

9.7.2 Thermal resistance of the duct (or pipe) itself T_4''

The thermal resistance (T_4'') across the wall of a duct shall be calculated from:

$$T_4'' = \frac{1}{2\pi} \varrho_T \ln \left(\frac{D_o}{D_d} \right)$$

where:

$D_o =$ the outside diameter of the duct (mm)

$D_d =$ the inside diameter of the duct (mm)

$\varrho_T =$ thermal resistivity of duct material (K.m/W)

The value of ϱ_T can be taken as zero for metal ducts, for other materials, see Table IV, page 79.

9.7.3 External thermal resistance of the duct (or pipe) T_4'''

This shall be determined for single-way duct(s) not embedded in concrete in the same way as for cable, using the appropriate formulae from Sub-clauses 9.1, 9.2, 9.3 or 9.4, and the external radius of the duct or pipe including any protective covering thereon, replacing the external radius of the cable. When the ducts are embedded in concrete, the calculation of the thermal resistance outside the ducts is first of all made assuming a uniform medium outside the ducts having a thermal resistivity equal to the concrete. A correction is then added algebraically to take account of the difference, if any, between the thermal resistivities of concrete and soil for that part of the thermal circuit exterior to the duct bank.

The correction to the thermal resistance is given by:

$$\frac{N}{2\pi} (\varrho_e - \varrho_c) \ln (u + \sqrt{u^2 - 1})$$

where:

$N =$ number of loaded cables in the duct bank

$\varrho_e =$ thermal resistivity of earth around bank (K.m/W)

$\varrho_c =$ thermal resistivity of concrete (K.m/W)

$$u = \frac{L_G}{r_b}$$

$L_G =$ depth of laying to centre of duct bank (mm)

$r_b =$ equivalent radius of concrete bank (mm)

given by:

$$\ln r_b = \frac{1}{2} \frac{x}{y} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \frac{x}{2}$$

The quantities x and y are the shorter and longer sides, respectively, of the duct bank section irrespective of its position, in millimetres.

This formula is only valid for ratios of $\frac{y}{x}$ less than 3.

TABLEAU I

Résistivités électriques et coefficients de variation de la résistivité avec la température des métaux utilisés

Matériau	Résistivité (ρ) ohm · m à 20 °C	Température Coefficient (α_{20}) par K à 20 °C
a) <i>Âmes</i>		
Cuivre	1,7241 10 ⁻⁸	3,93 10 ⁻³
Aluminium	2,8264 10 ⁻⁸	4,03 10 ⁻³
b) <i>Matériaux de gaines et d'armure</i>		
Plomb et alliage	21,4 10 ⁻⁸	4,0 10 ⁻³
Acier	13,8 10 ⁻⁸	4,5 10 ⁻³
Bronze	3,5 10 ⁻⁸	3,0 10 ⁻³
Acier inoxydable	70 10 ⁻⁸	Négligeable
Aluminium	2,84 10 ⁻⁸	4,03 10 ⁻³

Note. — Les valeurs se rapportant au cuivre constituant les âmes sont prises dans la Publication 28 de la CEI: Spécification internationale d'un cuivre-type recuit.
Les valeurs se rapportant à l'aluminium constituant les âmes sont prises dans la Publication 111 de la CEI: Recommandation concernant la résistivité des fils en aluminium écroui dur industriel pour conducteurs électriques.

TABLEAU II

Effets de peau et de proximité

Valeurs expérimentales généralement admises pour les coefficients k_s et k_p pour des âmes en cuivre

(Les valeurs correspondantes pour les âmes en aluminium sont à l'étude.)

Type d'âme	Séché et imprégné ou non	k_s	k_p
Circulaire, câblé	Oui	1	0,8
Circulaire, câblé	Non	1	1
Circulaire, rétreint	Oui	1	0,8
Circulaire, rétreint	Non	1	1
Circulaire, segmenté*		0,435	0,37
Creux, câblé, hélicoïdal	Oui	**	0,8
Sectoral	Oui	1	0,8
Sectoral	Non	1	1

* Les valeurs données s'appliquent aux âmes ayant quatre segments (avec ou sans canal central) et aux sections jusqu'à 1 500 mm². Ces valeurs s'appliquent aux âmes dans lesquelles toutes les couches de fils vont dans le même sens. Les valeurs sont provisoires et cette question est à l'étude.

** La formule suivante doit être utilisée pour le calcul de k_s :

$$k_s = \frac{d'_c - d_i}{d'_c + d_i} \left(\frac{d'_c + 2d_i}{d'_c + d_i} \right)^2$$

où: d_i est le diamètre intérieur de l'âme (canal central) (mm)

d'_c est le diamètre extérieur de l'âme pleine équivalente ayant le même canal central (mm)

Note. — Bien qu'à présent aucun résultat expérimental s'appliquant tout particulièrement aux âmes câblées en aluminium n'ait été approuvé, on recommande aux utilisateurs d'appliquer aux âmes en aluminium à couches concentrique les mêmes méthodes et les mêmes coefficients que ceux indiqués pour les âmes câblées en cuivre analogues. L'erreur sera du côté de la sécurité.

TABLE I

Electrical resistivities and temperature coefficients of metals used

Material	Resistivity (ρ) ohm · m at 20 °C	Temperature coefficient (α_{20}) per K at 20 °C
<i>a) Conductors</i>		
Copper	1.7241 10^{-8}	3.93 10^{-3}
Aluminium	2.8264 10^{-8}	4.03 10^{-3}
<i>b) Sheaths and armour</i>		
Lead or lead alloy	21.4 10^{-8}	4.0 10^{-3}
Steel	13.8 10^{-8}	4.5 10^{-3}
Bronze	3.5 10^{-8}	3.0 10^{-3}
Stainless steel	70 10^{-8}	Negligible
Aluminium	2.84 10^{-8}	4.03 10^{-3}

Note. – Values for copper conductors are taken from IEC Publication 28: International Standard of Resistance for Copper.

Values for aluminium conductors are taken from IEC Publication 111: Recommendation for the Resistivity of Commercial Hard-drawn Aluminium Electrical Conductor wire.

TABLE II

*Skin and proximity effects**Experimental values for copper conductors currently available for the coefficients k_s and k_p*

(The corresponding figures for aluminium conductors are under consideration.)

Type of conductor	Whether dried and impregnated or not	k_s	k_p
Round, stranded	Yes	1	0.8
Round, stranded	No	1	1
Round, compact	Yes	1	0.8
Round, compact	No	1	1
Round, segmental*		0.435	0.37
Hollow, helical stranded	Yes	**	0.8
Sector-shaped	Yes	1	0.8
Sector-shaped	No	1	1

* The values given apply to conductors having four segments (with or without central duct) and sectional areas up to 1 500 mm². These values apply to conductors in which all the layers of wire have the same direction of lay. The values are provisional and the subject is under consideration.

** The following formula should be used for k_s :

$$k_s = \frac{d'_c - d_i}{d'_c + d_i} \left(\frac{d'_c + 2d_i}{d'_c + d_i} \right)^2$$

where: d_i is the inside diameter of the conductor (central duct) (mm)

d'_c is the outside diameter of the equivalent solid conductor having the same central duct (mm)

Note. — Although there are no accepted experimental results dealing specifically with aluminium stranded conductors at present, users are recommended to apply the same methods and coefficients to stranded aluminium conductors of concentric stranded design as are already given for similar stranded copper conductors. The error will be on the safe side.

TABLEAU III

Valeurs numériques de la permittivité relative et du facteur de pertes pour les isolants utilisés dans les câbles à haute tension et moyenne tension à fréquence industrielle

1	2	3
Type de câble	ϵ	$\text{tg } \delta^*$
<i>Câbles isolés au papier imprégné</i>		
Type «solid» à imprégnation totale, préimprégnés ou imprégnés de matière non migrante	4	0,01
A huile fluide, basse pression (i)	3,3	0,004**
A huile fluide, haute pression	3,5	0,0045**
A pression d'huile, du type en tuyau (ii)	3,7	0,0045
A pression externe de gaz (iii)	3,5	0,0040
A pression interne de gaz (iv)	3,4	0,0045
<i>Câbles isolés avec d'autres matériaux (v)</i>		
Caoutchouc butyle	4	0,050
EPR	3	0,040
P.V.C.	8	0,1
PE	2,3	0,0010
XLPE	2,5	0,008

* Valeurs prudentes relatives au maximum de température admissible et applicables à la plus haute tension normalement spécifiée pour chaque type de câble.

** Les valeurs différentes sont plus le fait des caractéristiques du papier utilisé que de la pression. Les valeurs de $\text{tg } \delta$ données ci-dessus s'appliquent jusqu'à la tension de 275 kV incluse.

(i) Voir la Publication 141-1 de la CEI: Essais des câbles à huile fluide, à pression de gaz et de leurs dispositifs accessoires, Première partie: Câbles au papier à huile fluide et à gaine métallique et accessoires pour des tensions inférieures ou égales à 400 kV.

(ii) Voir la Publication 141-4 de la CEI: Essais des câbles à huile fluide, à pression de gaz et de leurs dispositifs accessoires. Quatrième partie: Câbles à huile fluide en tuyau à isolation de papier imprégné sous forte pression d'huile et accessoires pour des tensions alternatives inférieures ou égales à 400 kV.

(iii) Voir la Publication 141-3 de la CEI: Essais des câbles à huile fluide, à pression de gaz de leurs dispositifs accessoires, Troisième partie: Câbles à pression de gaz externe (à compression de gaz) et accessoires pour des tensions alternatives inférieures ou égales à 275 kV.

(iv) Voir la Publication 141-2 de la CEI: Essais des câbles à huile fluide, à pression de gaz et de leurs dispositifs accessoires, Deuxième partie: Câbles à pression de gaz interne et accessoires pour des tensions alternatives inférieures ou égales à 275 kV.

(v) Voir la Publication 502 de la CEI: Câbles de transport d'énergie isolés par diélectriques massifs extrudés pour des tensions assignées de 1 kV à 30 kV.

Note. — Il devrait être tenu compte de la perte diélectrique pour les valeurs de U_0 supérieures ou égales aux valeurs suivantes:

Type de câble	U_0 (kV)
Câbles isolés au papier imprégné	30
Câbles isolés avec d'autres matériaux	
Caoutchouc butyle	15
EPR	15
P.V.C.	6
PE	110
XLPE	45

TABLE III

Values of relative permittivity and loss factors for the insulation of high-voltage and medium-voltage cables at power frequency

1	2	3
Type of cable	ϵ	$\tan \delta^*$
<i>Cables insulated with impregnated paper</i>		
Solid type, fully-impregnated, pre-impregnated or mass-impregnated non-draining	4	0.01
Oil-filled, low-pressure (i)	3.3	0.004**
Oil-filled, high-pressure	3.5	0.0045**
Oil-pressure pipe-type (ii)	3.7	0.0045
External gas-pressure (iii)	3.5	0.0040
Internal gas-pressure (iv)	3.4	0.0045
<i>Cables with other kinds of insulation (v)</i>		
Butyl rubber	4	0.050
EPR	3	0.040
P.V.C.	8	0.1
PE	2.3	0.0010
XLPE	2.5	0.008

* Safe values at maximum permissible temperature, applicable to the highest voltages normally specified for each type of cable.

** The different values are mainly related to the characteristics of the paper used, and not to the pressure. The value of $\tan \delta$ suggested above applies only for voltages up to and including 275 kV.

(i) See IEC Publication 141-1: Tests on Oil-filled and Gas-pressure Cables and their Accessories, Part 1: Oil-filled, Paper-insulated, Metal-sheathed Cables and Accessories for Alternating Voltages up to and including 400 kV.

(ii) See IEC Publication 141-4: Tests on Oil-filled and Gas-pressure Cables and their Accessories, Part 4: Oil-impregnated paper-insulated high pressure oil-filled pipe-type cables and accessories for alternating voltages up to and including 400 kV.

(iii) See IEC Publication 141-3: Tests on Oil-filled and Gas-pressure Cables and their Accessories, Part 3: External Gas-pressure, (Gas Compression) Cables and Accessories for Alternating Voltages up to 275 kV.

(iv) See IEC Publication 141-2: Tests on Oil-filled and Gas-pressure Cables and their Accessories, Part 2: Internal Gas-pressure Cables and Accessories for Alternating Voltages up to 275 kV.

(v) See IEC Publication 502: Extruded Solid Dielectric Insulated Power Cables for Rated Voltages from 1 kV up to 30 kV.

Note. — The dielectric loss should be taken into account for values of U_0 equal to or greater than the following:

Type of cable	U_0 (kV)
Cables insulated with impregnated paper	30
<i>Cables with other kinds of insulation</i>	
Butyl rubber	15
EPR	15
P.V.C.	6
PE	110
XLPE	45

TABLEAU IV
Résistivité thermique des matériaux

Matériau	Résistivité thermique (θ_T) (K.m/W)
<i>Matériaux d'isolation*</i>	
Papier dans les câbles de type «solid»	6,0
Papier dans les câbles à huile fluide	5,0
Papier dans les câbles à pression externe de gaz	5,5
Papier dans les câbles à pression interne de gaz:	
a) préimprégné	6,5
b) imprégné à masse	6,0
PE	3,5
XLPE	3,5
Polychlorure de vinyle:	
câbles jusqu'à 3 kV inclus	5,0
câbles de plus de 3 kV	6,0
EPR:	
câbles jusqu'à 3 kV inclus	5,5
câbles de plus de 3 kV	6,0
Caoutchouc butyle	5,0
Caoutchouc	5,0
<i>Matériaux de revêtement:</i>	
Jute composé et matériaux fibreux	6,0
Protection «rubber-sandwich»	6,0
Polychloroprène	5,5
P.V.C.:	
câbles jusqu'à 35 kV inclus	5,0
câbles de plus de 35 kV	6,0
P.V.C./bitume sur gaines d'aluminium ondulées	6,0
PE	3,5
<i>Matériaux pour installation en fourreaux:</i>	
Béton	1,0
Fibre	4,8
Amiante	2,0
Argile cuite	1,2
P.V.C.	7,0
PE	3,5

* Pour les calculs des intensités admissibles, on estime que les écrans semiconducteurs ont les mêmes propriétés thermiques que les matériaux diélectriques sur lesquels ils sont appliqués.

Lorsque des matériaux plastiques ou élastomériques sont utilisés comme revêtements de protection, les résistivités thermiques seront les mêmes que celles indiquées dans le tableau pour la catégorie «matériaux d'isolation».

TABLE IV
Thermal resistivities of materials

Material	Thermal resistivity (θ_T) (K.m/W)
<i>Insulating materials*</i>	
Paper insulation in solid type cables	6.0
Paper insulation in oil-filled cables	5.0
Paper insulation in cables with external gas pressure	5.5
Paper insulation in cables with internal gas pressure:	
a) pre-impregnated	6.5
b) mass-impregnated	6.0
PE	3.5
XLPE	3.5
Polyvinyl chloride:	
up to and including 3 kV cables	5.0
greater than 3 kV cables	6.0
EPR:	
up to and including 3 kV cables	3.5
greater than 3 kV cables	5.0
Butyl rubber	5.0
Rubber	5.0
<i>Protective coverings:</i>	
Compounded jute and fibrous materials	6.0
Rubber sandwich protection	6.0
Polychloroprene	5.5
P.V.C.:	
up to and including 35 kV cables	5.0
greater than 35 kV cables	6.0
P.V.C./bitumen on corrugated aluminium sheaths	6.0
PE	3.5
<i>Materials for duct installations</i>	
Concrete	1.0
Fibre	4.8
Asbestos	2.0
Earthenware	1.2
P.V.C.	7.0
PE	3.5

* For the purposes of current rating calculations, the semi-conducting screening materials are assumed to have the same thermal properties as the adjacent dielectric materials.

Where plastics or elastomeric materials are used for protective coverings, the thermal resistivities shall be taken to be the same as those for the insulating grades of the materials given in this table.

TABLEAU V

Valeurs des constantes Z , E et g pour les surfaces noires des câbles à l'air libre(A) A l'air libre, installés sur des consoles non continues, supports ou brides, D_e^* inférieur à 0,15 m

N°	Installation	Z	E	g	Mode
1	Un seul câble [†]	0,21	3,94	0,60	$\geq 0,3 D_e^*$
2	Deux câbles jointifs horizontaux	0,29	2,35	0,50	$\geq 0,5 D_e^*$
3	Trois câbles posés en trèfle	0,96	1,25	0,20	$\geq 0,5 D_e^*$
4	Trois câbles jointifs horizontaux	0,62	1,95	0,25	$\geq 0,5 D_e^*$
5	Deux câbles jointifs, verticaux	1,42	0,86	0,25	$\geq 0,5 D_e^*$
6	Deux câbles espacés de D_e^* , verticaux	0,75	2,80	0,30	$\geq 0,5 D_e^*$
7	Trois câbles jointifs, verticaux	1,61	0,42	0,20	$\geq 1,0 D_e^*$
8	Trois câbles espacés de D_e^* , verticaux	1,31	2,00	0,20	$\geq 0,5 D_e^*$

[†] Les valeurs données pour «un seul câble» s'appliquent aussi à tous les câbles d'un groupe lorsqu'ils sont séparés horizontalement par un intervalle d'au moins 0,75 fois le diamètre extérieur du câble.

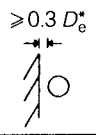
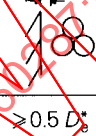
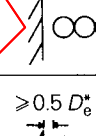
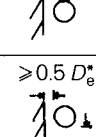
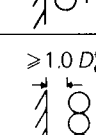
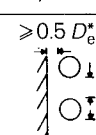
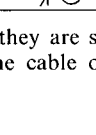
(B) Attachés directement à une paroi verticale (D_e^* inférieur à 0,08 m)

9	Un seul câble	1,69	0,63	0,25	
10	Trois câbles posés en trèfle	0,94	0,79	0,20	

TABLE V

Values for constants Z , E and g for black surfaces of cables in free air

(A) In free air, installed on non-continuous brackets, ladder supports or cleats, D_e^* not greater than 0.15 m.

No.	Installation	Z	E	g	Mode
1	Single cable [†]	0.21	3.94	0.60	
2	Two cables touching, horizontal	0.29	2.35	0.50	
3	Three cables in trefoil	0.96	1.25	0.20	
4	Three cables touching, horizontal	0.62	1.95	0.25	
5	Two cables touching vertical	1.42	0.86	0.25	
6	Two cables, spaced D_e^* , vertical	0.75	2.80	0.30	
7	Three cables touching, vertical	1.61	0.42	0.20	
8	Three cables, spaced D_e^* , vertical	1.31	2.00	0.20	

[†] Values for a "single cable" also apply to each cable of a group when they are spaced horizontally with a clearance between cables of at least 0.75 times the cable overall diameter.

(B) Clipped direct to a vertical wall (D_e^* not greater than 0.08 m)

9	Single cable	1.69	0.63	0.25	
10	Three cables in trefoil	0.94	0.79	0.20	

TABLEAU VI

*Coefficient d'absorption des
rayons solaires pour les
surfaces de câble suivantes*

Matériaux	σ
Bitume/jute	0,8
Polychloroprène	0,8
P.V.C.	0,6
PE	0,4
Plomb	0,6

TABLEAU VII

Valeurs des constantes U, V et Y

Conditions d'installation	U	V	Y
En conduit métallique	5,2	1,4	0,011
En fourreau de fibre dans l'air	5,2	0,83	0,006
En fourreau de fibre dans le béton	5,2	0,91	0,010
En fourreau d'amiante-ciment			
dans l'air	5,2	1,2	0,006
dans le béton	5,2	1,1	0,011
Câble à gaz en tuyau	0,95	0,46	0,0021
Câble à huile en tuyau	0,26	0,0	0,0026
Fourreaux en matière plastique		A l'étude	
Fourreaux en terre cuite	1,87	0,28	0,0036

TABLE VI

*Absorption coefficient of
solar radiation for cable
surfaces*

Material	σ
Bitumen/jute serving	0.8
Polychloroprene	0.8
P.V.C.	0.6
PE	0.4
Lead	0.6

TABLE VII

Values of constants U, V and Y

Installation condition	U	V	Y
In metallic conduit	5.2	1.4	0.011
In fibre duct in air	5.2	0.83	0.006
In fibre duct in concrete	5.2	0.91	0.010
In asbestos cement:			
duct in air	5.2	1.2	0.006
duct in concrete	5.2	1.1	0.011
Gas pressure cable in pipe	0.95	0.46	0.0021
Oil pressure pipe-type cable	0.26	0.0	0.0026
Plastic ducts	Under consideration		
Earthenware ducts	1.87	0.28	0.0036

ANNEXE A

VALEURS DES TEMPÉRATURES AMBIANTES DE RÉFÉRENCE ET RÉSISTIVITÉS THERMIQUES DES SOLS DANS DIVERS PAYS

A1. Conditions de fonctionnement type

Afin d'utiliser les formules données dans les différentes sections du document principal, les valeurs numériques des grandeurs physiques devront être choisies en fonction des conditions de fonctionnement.

Il n'est évidemment possible de comparer les résultats de deux calculs de courant de régime que si les hypothèses faites et les valeurs numériques des paramètres sont connues.

En particulier, les grandeurs relatives aux conditions de fonctionnement des câbles sont susceptibles de varier considérablement d'un pays à un autre. Une enquête a été effectuée à ce sujet et un certain nombre de pays ont envoyé une réponse.

L'article A3 et ses paragraphes résument les conditions de fonctionnement utilisées dans divers pays. L'attention est attirée sur le fait que les renseignements contenus dans l'article A3 sont proposés seulement comme un modèle pour les installations de câbles lorsque les données fournies par l'utilisateur sont incomplètes. Il faut se garder de tirer des conclusions erronées à partir de la comparaison des valeurs de divers pays. Il est à rappeler que les valeurs adoptées dans un pays particulier sont fonction d'un grand nombre de facteurs qui peuvent ne pas avoir la même importance dans les autres pays.

Les valeurs relatives aux conditions de fonctionnement sont données à l'article A3 pour les pays suivants:

Allemagne	Japon
Australie	Norvège
Autriche	Pays-Bas
Canada	Pologne
Etats-Unis d'Amérique	Royaume-Uni
Finlande	Suède
France	Suisse
Italie	

A2. Règle lorsque les valeurs ne sont pas fournies dans les tables nationales

Il est conseillé d'adopter les données suivantes lorsqu'il n'y a pas de valeurs indiquées dans les tables nationales pour la température ambiante de référence et la résistivité thermique du sol.

A2.1 Températures ambiantes au niveau de la mer

Climat	Températures ambiantes de l'air		Températures ambiantes du sol à 1 m de profondeur	
	Min. (°C)	Max. (°C)	Min. (°C)	Max. (°C)
Tropical	25	55	25	40
Subtropical	10	40	15	30
Tempéré	0	25	10	20

APPENDIX A

REFERENCE AMBIENT TEMPERATURES AND THERMAL RESISTIVITIES OF SOIL IN VARIOUS COUNTRIES

A1. Standard operating conditions

In order to use the formulae given in the different sections of the main document, numerical values for the physical quantities should be chosen relating to the operating conditions.

It is obviously possible to compare the results of two calculations of current rating only when the assumptions made and the numerical values of the parameters are known.

In particular, the quantities related to the operating conditions of cables are liable to vary considerably from one country to another. An enquiry into this subject has been carried out and a number of countries have replied.

Clause A3 and its sub-clauses summarize the operating conditions used in various countries. Attention is drawn to the fact that the information in Clause A3 is intended only as a guide for cable installation designers when data provided by a user is incomplete. Care must be taken not to draw unjustified conclusions from comparisons of values for different countries. It should be remembered that the values adopted in any particular country are governed by many factors some of which might not be of equal importance in other countries.

Values relating to the operating conditions are given in Clause A3 for the following countries:

Australia	Netherlands
Austria	Norway
Canada	Poland
Finland	Sweden
France	Switzerland
Germany	United Kingdom
Italy	United States of America
Japan	

A2. Procedure when values are not provided in national tables

It is recommended that when there is no value laid down in the national tables for the reference ambient temperature and thermal resistivity of the soil, the following values should be adopted.

A2.1 Ambient temperatures at sea level

Climate	Ambient air temperatures		Ambient ground temperatures at a depth of 1 m	
	Min. (°C)	Max. (°C)	Min. (°C)	Max. (°C)
Tropical	25	55	25	40
Sub-tropical	10	40	15	30
Temperate	0	25	10	20

Les intensités admissibles seront calculées pour les températures maximales données et, à la demande, pour les températures minimales (régime d'hiver). Les températures ambiantes maximales et minimales correspondent respectivement aux régimes d'été et d'hiver, ou de saison sèche et de saison pluvieuse.

Lorsque les renseignements au sujet de la profondeur de pose ne sont pas donnés, la profondeur courante à prendre est de 1 m.

A2.2 Résistivité thermique du sol

Résistivité thermique (K.m/W)	Etat du sol	Conditions atmosphériques
0,7	Très humide	Constamment humide
1,0	Humide	Pluviosité régulière
2,0	Sec	Pluies peu fréquentes
3,0	Très sec	Peu ou pas de pluies

A3. Valeurs relatives aux conditions de fonctionnement dans divers pays

A3.1 Australie

1) Situations types

Résistivité thermique du sol 1,2 K.m/W
Température ambiante du sol 25°C été
18°C hiver

2) Profondeur de pose

Profondeur de la surface du sol au centre du câble ou au centre du trèfle du groupe de câbles.

Câbles basse tension 500 mm sous trottoirs
750 mm sous chaussées
Câbles de 11 kV 800 mm sous trottoirs
800 mm sous chaussées
Câbles de 33 kV et au-dessus 1 000 mm sous trottoirs
1 000 mm sous chaussées

3) Température ambiante de l'air

Valeur maximale 40°C été
30°C hiver

A3.2 Autriche

1) Caractéristiques thermiques du sol

a) Résistivité thermique:

jusqu'à 30 kV, valeur moyenne 0,7 K.m/W
30 kV, valeur moyenne 1,0 K.m/W
(max. 1,2; min. 0,7 K.m/W)

It is essential that current ratings should be valid for the maximum temperatures given. The lower values are for winter ratings if required. The values correspond with the temperature limits of winter and summer, alternatively rainy and dry seasons.

When no information about the depth of laying is given, the standard depth is to be taken as 1 m.

A2.2 Thermal resistivity of soil

Thermal resistivity (K.m/W)	Soil conditions	Weather conditions
0.7	Very moist	Continuously moist
1.0	Moist	Regular rainfall
2.0	Dry	Seldom rains
3.0	Very dry	Little or no rain

A3. Values relating to the operating conditions in various countries

A3.1 Australia

1) Standard conditions

Soil thermal resistivity 1.2 K.m/W
 Soil ambient temperature 25°C summer
 18°C winter

2) Depth of laying

Measured from the ground surface to the centre of the cable, or to the centre of a trefoil group.

L.V. cables	500 mm under footways 750 mm under roadways
11 kV cables	800 mm under footways 800 mm under roadways
33 kV cables and higher voltages	1 000 mm under footways 1 000 mm under roadways

3) Air ambient temperature

Maximum value 40°C summer
 30°C winter

A3.2 Austria

1) Thermal characteristics of the soil

a) Thermal resistivity:

up to 30 kV, average value	0.7 K.m/W
30 kV, average value	1.0 K.m/W
	(max. 1.2; min 0.7 K.m/W)

b) Température:

valeur maximale	20 °C
valeur minimale	0 °C

2) Profondeur de pose des câbles enterrés

Tous les câbles jusqu'à 1 kV	700 mm
Tous les câbles jusqu'à 10 kV	800 mm
Câbles isolés au papier de 10 kV	1 000 mm
Câbles à huile fluide jusqu'à 220 kV	1 200 mm

3) Température ambiante de l'air

Valeur moyenne	20 °C (max. 40 °C; min. -20 °C)
----------------	---------------------------------

A3.3 Canada

Bien qu'il n'y ait pas de valeurs canadiennes nationales reconnues de résistivité thermique du sol, de température et de profondeur de pose, les chiffres donnés ci-dessous sont caractéristiques.

1) Caractéristiques thermiques du sol pour les câbles directement enterrés ou en fourreaux

a) Résistivité thermique:

valeur maximale	1,2 K.m/W
valeur minimale	0,6 K.m/W
valeur moyenne	0,9 K.m/W

b) Température:

valeur maximale	20 °C
valeur minimale	-5 °C
valeur moyenne	non utilisée comme base de projet

Résistivité thermique du sol

Lorsqu'on ne dispose pas de mesures directes, il est généralement admis de prendre une résistivité thermique de 0,9 K.m/W. Cependant, dans les cas où une détérioration progressive des caractéristiques thermiques de l'environnement au cours des années est prévisible, et dans les cas où les conditions climatiques peuvent occasionner un accroissement sensible des variations saisonnières, il est recommandé de déterminer la capacité de transport à partir d'une résistivité thermique de 1,2 K.m/W.

Ne pas se référer aux plus faibles valeurs de résistivité, pendant l'hiver, pour établir les bases d'un projet de réseau de quelque importance.

2) Profondeur de pose*

	Directement enterrés	En fourreaux
a) Câbles isolés au papier à matière stabilisée et non migrante, pour des tensions jusqu'à 69 kV	1 100 mm	1 100 mm

* C'est en réalité une «couverture minimale» qui est exigée et qui, dans le cas de faisceaux de fourreaux, correspond à la couverture du faisceau.

b) Temperature:

maximum value	20°C
minimum value	0°C

2) *Depth of laying for buried cables*

All cables up to 1 kV	700 mm
All cables up to 10 kV	800 mm
Paper-insulated cables 10 kV	1 000 mm
Oil-filled cables up to 220 kV	1 200 mm

3) *Air ambient temperature*

Average value 20°C (max. 40°C; min. -20°C)

A3.3 *Canada*

While there are no recognized Canadian national values of soil thermal resistivity and temperature, and depth of laying, the values shown below are typical:

1) *Thermal characteristics of the soil for cables directly buried or in ducts*

a) Thermal resistivity:

maximum value	1.2 K.m/W
minimum value	0.6 K.m/W
average value	0.9 K.m/W

b) Temperature:

maximum value	20°C
minimum value	-5°C
average value	not used as a design basis

Soil thermal resistivity

Where direct measurements are not available, it is usual to assume a thermal resistivity of 0.9 K.m/W. However, in cases where it is foreseen that there may be a progressive deterioration of the thermal characteristics of the environment over a period of years, and in cases where the climatic conditions may give rise to significant seasonal variations, it is recommended that the current-carrying capacity be based on a thermal resistivity of 1.2 K.m/W.

Reference is not made to lower values of resistivity, during winter, as a basis for system design to any significant extent.

2) *Depth of laying**

	Direct burial	In ducts
a) Paper insulated, solid and non-draining cables for voltages up to 69 kV	1 100 mm	1 100 mm

* This is in reality a "minimum cover" requirement and in the case of duct banks corresponds to the duct bank cover.

b) Isolation solide (butyle, caoutchouc d'éthylène propylène, p.v.c., polyéthylène, polyéthylène réticulé, etc.), câbles pour tensions jusqu'à 46 kV	900 mm	900 mm
c) Câbles à huile fluide pour tensions jusqu'à 345 kV	1 100 mm	1 100 mm
d) Câbles en tuyau (à pression de gaz ou d'huile) pour tensions jusqu'à 345 kV	1 100 mm	

3) Température ambiante de l'air

Valeur maximale	40°C
Valeur minimale	-40°C
Valeur moyenne	non utilisée comme base de projet

A3.4 Finlande

1) Caractéristiques thermiques du sol

a) Résistivité thermique:

valeur moyenne utilisée pour le calcul du courant admissible	1,0 K.m/W
et pour les câbles sous-marins où le sol est complètement saturé d'eau	0,4 K.m/W

b) Températures:

valeur maximale	15°C
valeur minimale	0°C
(valeur moyenne 5°C à 10°C, maximum exceptionnel 20°C)	

2) Profondeur de pose pour câbles directement enterrés ou en fourreaux

Tous les câbles jusqu'à 36 kV	700 mm
Tous les câbles jusqu'à 52 kV	1 000 mm
Tous les câbles jusqu'à 123 kV	1 300 mm
Tous les câbles jusqu'à 245 kV	1 500 mm

La profondeur réelle dépend des conditions locales.

3) Température ambiante de l'air

Valeur de référence pour le calcul du courant admissible	25°C
Valeur maximale	35°C
Valeur minimale	-20°C

A3.5 France

1) Caractéristiques thermiques du sol

- a) Résistivité thermique en été: 1,2 K.m/W, en hiver: 0,85 K.m/W (pour les liaisons importantes à 225 et 400 kV des mesures directes sont effectuées et, si nécessaire, un remblai artificiel est utilisé afin d'obtenir la résistance thermique prévue).

b) Solid insulation (butyl, ethylene propylene rubber, p.v.c., polyethylene, cross-linked polyethylene, etc.) cables for voltages up to 46 kV	900 mm	900 mm
c) Oil-filled cables for voltages up to 345 kV	1 100 mm	1 100 mm
d) Pipe-type (gas or oil pressure) cables for voltages up to 345 kV	1 100 mm	

3) Air ambient temperature

Maximum value	40°C
Minimum value	-40°C
Average value	not used as a design basis

A3.4 Finland

1) Thermal characteristics of soil

a) Thermal resistivity:

the average value to be used for rating calculations and for submarine cables where the soil is completely saturated with water	1.0 K.m/W
	0.4 K.m/W

b) Temperatures:

maximum value	15°C
minimum value	0°C
(average value 5°C to 10°C, exceptional maximum 20°C)	

2) Depth of laying for cables directly buried or in ducts

All cables up to 36 kV	700 mm
All cables up to 52 kV	1 000 mm
All cables up to 123 kV	1 300 mm
All cables up to 245 kV	1 500 mm

The actual depth depends on local conditions.

3) Air ambient temperature

Reference value	
for rating calculations	25°C
Maximum value	35°C
Minimum value	-20°C

A3.5 France

1) Thermal characteristics of soil

- a) Thermal resistivity in summer: 1.2 K.m/W, in winter: 0.85 K.m/W (for main connections at 225 and 400 kV direct measurements are carried out, and an artificial backfill is used if necessary in order to obtain the rated thermal resistivity).

b) Température

- Câbles 20 kV:

en été	20 °C
en hiver	10 °C
- Câbles 63, 225 et 400 kV:

en été	20 °C
en hiver	10 °C

Dans les régions méditerranéennes on ajoute 5 °C supplémentaires aux valeurs proposées.

2) Profondeur de pose

- Câbles du réseau de distribution 20 kV:
1 400 mm à Paris,
800 mm à 1 400 mm en général dans les autres cas.
- Câbles du réseau de transport 63, 225 et 400 kV:
1 300 mm en caniveaux ou en fourreaux,
700 mm dans les postes,

entre la surface du sol et l'axe des câbles pour la pose en nappe et le centre du trèfle pour la pose en trèfle.

(Ces valeurs peuvent varier suivant les règlements locaux.)

3) Température ambiante de l'air

Valeurs de référence pour effectuer les calculs relatifs aux câbles en galerie:

- en été 30 °C
- en hiver 20 °C

A3.6 Allemagne

Les valeurs indiquées sont prises, en tant que valeurs courantes, comme paramètres pour les calculs de courant admissible à moins que les conditions de résistivité thermique du sol, de température et de profondeur de pose ne soit précisées.

1) Caractéristiques thermiques du sol

a) Résistivité thermique:

valeur moyenne 1,0 K.m/W

pour les calculs considérant une zone sèche au voisinage
du câble - pour la zone sèche

2,5 K.m/W

b) Température:

valeur maximale	20 °C
valeur minimale	0 °C
valeur moyenne	10 °C

b) Temperature

- 20 kV cables	in summer	20 °C
	in winter	10 °C
- 63, 225 and 400 kV cables:	in summer	20 °C
	in winter	10 °C

In Mediterranean regions, an extra 5 °C is added to the proposed values.

2) *Depth of laying*

- 20 kV distribution network cables:
1 400 mm in Paris,
800 mm to 1 400 mm generally in the provinces.
- 63, 225 and 400 kV transportation network cables:
1 300 mm in trenches or in ducts,
700 mm in sub-stations.

The above figures representing the distance between the ground surface and the axis of the cable in the case of flat-laid cables and between the ground surface and the centre of the trefoil in the case of cables laid in trefoil formation.

(These values may vary according to local regulations.)

3) *Air ambient temperature*

Reference values for calculations relating to cables laid in cable trays:

- in summer 30 °C
- in winter 20 °C

A3.6 *Germany*

The indicated values are taken as a basis as standard values for current rating calculations unless there are any requirements specified for the thermal resistivity of the soil, the temperature and the depth of laying.

1) *Thermal characteristics of the soil*

a) Thermal resistivity:

average value 1.0 K.m/W

for calculations considering a dry zone near
the cable - for the dry zone

2.5 K.m/W

b) Temperature:

maximum value	20 °C
minimum value	0 °C
average value	10 °C

2) *Profondeur de pose des câbles enterrés*

Pour les câbles ≥ 60 kV min. 1 200 mm
 Pour les câbles < 60 kV 700 mm*

3) *Température ambiante de l'air*

Valeur maximale 30°C
 Valeur minimale -20°C
 Valeur moyenne 10°C

A3.7 *Italie*1) *Caractéristiques thermiques du sol*a) *Résistivité thermique:*

valeur maximale 1,0 K.m/W

Si les caractéristiques thermiques du sol sont trop faibles, un remblai convenable est utilisé et la référence est prise à une valeur de résistivité thermique intermédiaire entre celle du remblai et celle du sol environnant.

b) *Température:*

valeur maximale (utilisée dans les calculs) 20°C
 valeur minimale 5°C

2) *Profondeur de pose pour les câbles directement enterrés*

Cette profondeur est la valeur maximale adoptée sans spécification contraire.

Jusqu'à 12 kV 800 mm
 Jusqu'à 17,5 kV 1 000 mm
 Jusqu'à 24 kV 1 200 mm
 Jusqu'à 36 kV 1 500 mm
 Jusqu'à 72 kV 1 800 mm
 Jusqu'à 220 kV 2 200 mm

3) *Température ambiante de l'air*

Valeur maximale (utilisée dans les calculs) 30°C
 Valeur minimale 0°C
 Variation journalière maximale 20°C

En été, la température maximale peut, quelquefois pendant quelques heures par jour, être supérieure de 5°C (et même plus dans des cas particuliers) à la valeur maximale mentionnée ci-dessus. Une telle situation est considérée comme acceptable, compte tenu de sa courte durée.

A3.8 *Japon*1) *Caractéristiques thermiques du sol*a) *Résistivité thermique:*

valeur moyenne 1,0 K.m/W
 (un fabricant utilise 1,2, 0,8 et 0,4 K.m/W respectivement pour sol sec, normal et humide)

* Bien qu'étant calculés pour 700 mm, les câbles de 20 kV à 30 kV sont souvent posés de 900 mm à 1000 mm de profondeur.

2) *Depth of laying for buried cables*

For cables ≥ 60 kV	min. 1 200 mm
For cables < 60 kV	700 mm*

3) *Air ambient temperature*

Maximum value	30°C
Minimum value	-20°C
Average value	10°C

A3.7 *Italy*1) *Thermal characteristics of the soil*

a) Thermal resistivity:

maximum value	1.0 K.m/W
---------------	-----------

If the thermal characteristics of the soil are found to be poor, a suitable backfill is used and reference is made to a thermal resistivity intermediate between that of the backfill and that of the surrounding soil.

b) Temperature:

maximum value (to be used in calculations)	20°C
minimum value	5°C

2) *Depth of laying for directly buried cables*

This depth is the maximum adopted unless otherwise specified.

Up to 12 kV	800 mm
Up to 17.5 kV	1 000 mm
Up to 24 kV	1 200 mm
Up to 36 kV	1 500 mm
Up to 72 kV	1 800 mm
Up to 220 kV	2 200 mm

3) *Air ambient temperature*

Maximum value (to be used in calculations)	30°C
Minimum value	0°C
Maximum daily excursion	20°C

In summer, the maximum temperature may sometimes, for a few hours daily, be higher by 5°C (and in special cases even more) than the above-mentioned maximum value. Such an occurrence is considered to be acceptable due to its short duration.

A3.8 *Japan*1) *Thermal characteristics of the soil*

a) Thermal resistivity:

average value	1.0 K.m/W
(one manufacturer uses 1.2, 0.8 and 0.4 K.m/W for dry, normal and wet soil respectively)	

*In spite of being calculated for 700 mm, often cables at 20 kV to 30 kV are laid at 900 mm to 1 000 mm depth.

b) Température:

valeur maximale	25°C l'été 15°C l'hiver
valeur minimale	10°C

2) *Profondeur de pose des câbles directement enterrés ou en fourreaux*

a) Directement enterrés:

papier et isolation solide jusqu'à 33 kV	1 200 mm
câbles à huile fluide et en tuyaux	1 500 mm

b) En fourreaux:

en dessous de 66 kV	1 200 mm
66 kV et au-dessus	1 500 mm

3) *Température ambiante de l'air*

Valeur maximale	40°C l'été 30°C l'hiver
-----------------	----------------------------

A3.9 Pays-Bas

1) *Caractéristiques thermiques du sol*

a) Résistivité thermique:

niveau d'eau du sous-sol près des câbles	0,5 K.m/W
partie est du pays	0,8 K.m/W

b) Température:

valeur maximale	20°C
valeur minimale	5°C
valeur moyenne	15°C

2) *Profondeur de pose des câbles directement enterrés*

Câbles jusqu'à 10 kV	700 mm
Câbles au-dessus de 10 kV	1 000 mm

3) *Température ambiante de l'air*

Valeur maximale	30°C
Valeur minimale	-5°C
Valeur moyenne	20°C

A3.10 Norvège

1) *Caractéristiques thermiques du sol*

a) Résistivité thermique:

valeur moyenne utilisée dans les calculs	1,0 K.m/W
--	-----------

b) Temperature:

maximum value	25°C summer 15°C winter
minimum value	10°C

2) *Depth of laying for cables directly buried or in ducts*

a) Direct burial:

paper and solid insulation up to 33 kV	1 200 mm
oil-filled and pipe cables	1 500 mm

b) In ducts:

less than 66 kV	1 200 mm
66 kV and over	1 500 mm

3) *Air ambient temperature*

Maximum value	40°C summer 30°C winter
---------------	----------------------------

A3.9 *Netherlands*1) *Thermal characteristics of the soil*

a) Thermal resistivity:

sub-soil water level near to cables	0.5 K.m/W
eastern part of the country	0.8 K.m/W

b) Temperature:

maximum value	20°C
minimum value	5°C
average value	15°C

2) *Depth of laying for directly buried cables*

Cables up to 10 kV	700 mm
Cables above 10 kV	1 000 mm

3) *Air ambient temperature*

Maximum value	30°C
Minimum value	-5°C
Average value	20°C

A3.10 *Norway*1) *Thermal characteristics of the soil*

a) Thermal resistivity:

average value to be used in calculations	1.0 K.m/W
--	-----------

b) Température: °C

	Maximale	Minimale
Sud de la Norvège	17	0
Centre de la Norvège	15	0
Nord de la Norvège	13	-5

2) Profondeur de pose, minimale

1 kV	500 mm
au-dessus de 1 kV	700 mm

3) Température ambiante de l'air

Valeur maximale (utilisée dans les calculs) 25 °C

A3.11 Pologne

1) Caractéristiques thermiques du sol

a) Résistivité thermique:

valeur moyenne utilisée dans les calculs 0,8 K.m/W

b) Température:

valeur moyenne utilisée dans les calculs 15 °C

valeur minimale 5 °C

2) Profondeur de pose des câbles directement enterrés

Câbles isolés au papier et câbles du type massif	
jusqu'à 1 kV	700 mm
jusqu'à 15 kV	800 mm

Câbles isolés au papier aux tensions supérieures à 15 kV	1 000 mm
--	----------

Câbles à huile fluide jusqu'à 110 kV	1 000 mm
--------------------------------------	----------

3) Température ambiante de l'air

Valeur moyenne utilisée dans les calculs 25 °C

A3.12 Suède

1) Caractéristiques thermiques du sol

a) Résistivité thermique:

valeur moyenne utilisée dans les calculs 1,0 K.m/W

(0,4 K.m/W lorsque le sol est complètement saturé d'eau et pour les câbles sous-marins lorsque les fonds sont couverts de sable).

Dans les autres cas, on peut trouver des valeurs aussi élevées que 1,0 K.m/W. Pour les câbles importants, des mesures de la résistivité et des vérifications du sol dans le fond de la mer sont recommandées. Lorsque aucune donnée n'est connue, on utilise la valeur de 0,6 K.m/W.

b) Temperatures: °C

	Maximum	Minimum
Southern Norway	17	0
Central Norway	15	0
Northern Norway	13	-5

2) *Depth of laying, minimum*

1 kV	500 mm
above 1 kV	700 mm

3) *Air ambient temperature*

Maximum value (to be used in calculations) 25°C

A3.11 *Poland*1) *Thermal characteristics of the soil*

a) Thermal resistivity:

average value to be used in calculations 0.8 K.m/W

b) Temperature:

average value to be used in calculations 15°C
 minimum value 5°C

2) *Depth of laying for directly buried cables*

Paper-insulated and solid type cables

up to 1 kV	700 mm
up to 15 kV	800 mm

Paper-insulated cables at voltages
 higher than 15 kV

1 000 mm

Oil-filled cables
 up to 110 kV

1 000 mm

3) *Air ambient temperature*

Average value to be used in calculations 25°C

A3.12 *Sweden*1) *Thermal characteristics of the soil*

a) Thermal resistivity:

average value to be used in calculations 1.0 K.m/W

(0.4 K.m/W where the soil is completely saturated with water and for sub-marine cables where the bottom is covered with sand).

In other cases, values as high as 1.0 K.m/W may be found. For important cables, a measurement of the resistivity and soil conditions on the sea bottom is recommended. Where nothing is known, a value of 0.6 K.m/W is used.

b) Température:

valeur maximale 15°C
valeur minimale 0°C

(pour une grande partie de l'année entre 5°C et 10°C).

2) *Profondeur de pose des câbles directement enterrés et des courtes traversées de rue en fourreaux*

Tous les câbles jusqu'à 24 kV	700 mm
Câbles isolés au papier jusqu'à 52 kV	700 mm
Câbles à huile fluide jusqu'à 420 kV	1 000–1 500 mm*

A3.13 Suisse

1) *Caractéristiques thermiques du sol*

a) Résistivité thermique:

valeur normale utilisée dans les calculs 1,0 K.m/W (1,3 K.m/W en cas de sol rocheux)

b) Température:

valeur maximale utilisée dans les calculs 20°C
valeurs minimales -10°C en général
-15°C en montagne

Note. — Une condition supplémentaire en cas de charge permanente est 50°C de température maximale du sol près du câble (en vue d'éviter l'assèchement du sol).

2) *Profondeur de pose*

Normalement 1 000 mm

3) *Température ambiante de l'air*

Valeur maximale utilisée dans les calculs 25°C (30°C dans certains endroits du pays)
Valeur minimale -25°C

A3.14 Royaume-Uni

1) *Situations types*

Résistivité thermique du sol 1,2 K.m/W
Température ambiante du sol 15°C

2) *Profondeur de pose*

a) Pour les câbles de 1 kV – profondeur de la surface du sol au centre du câble, au centre du fourreau ou au centre du trèfle du groupe de câbles ou de fourreaux

500 mm

* La profondeur dépend des conditions locales. Elle n'est jamais inférieure à 1 000 mm.

b) Temperature:

maximum value	15°C
minimum value	0°C

(for main part of the year between 5°C and 10°C).

2) *Depth of laying for directly buried cables and for short road crossings by means of ducts*

All cables up to 24 kV	700 mm
Paper-insulated cables up to 52 kV	700 mm
Oil-filled cables up to 420 kV	1 000–1 500 mm*

A3.13 *Switzerland*1) *Thermal characteristics of the soil*

a) Thermal resistivity:

normal value to be used in calculations 1.0 K.m/W (1.3 K.m/W in case of rocky soil)

b) Temperature:

maximum value to be used in calculations 20°C
 minimum values -10°C in general
 -15°C in mountains

Note. — An additional condition in case of permanent load is 50°C maximum temperature of the soil near the cable (in order to avoid soil drying).

2) *Depth of laying*

Normally 1 000 mm

3) *Air ambient temperature*

Maximum value to be used in calculations 25°C (30°C in some spots of the country)
 Minimum values -25°C

A3.14 *United Kingdom*1) *Standard conditions*

Soil thermal resistivity 1.2 K.m/W
 Ground ambient temperature 15°C

2) *Depth of burial*

a) For 1 kV cables – depth from ground surface to centre of cable, to centre of duct or to centre of trefoil group of cables or ducts 500 mm

* The depth depends on local conditions. Less than 1 000 mm is not used.

- b) Pour les câbles de 3,3 kV à 33 kV (sans pression appliquée) – profondeur de la surface du sol au centre du câble, au centre du fourreau ou au centre du trèfle du groupe de câbles ou de fourreaux 800 mm
- c) Pour les câbles de 33 kV sous pression – profondeur de la surface du sol à la partie supérieure de la surface du câble ou du fourreau ou du groupe de câbles ou de fourreaux 900 mm

3) *Température ambiante de l'air*

A l'extérieur*	25 °C
Dans les bâtiments	30 °C

A3.15 *Etats-Unis d'Amérique*

1) *Caractéristiques thermiques du sol*

a) Résistivité thermique:

valeur moyenne utilisée dans les calculs
lorsque aucun renseignement n'est fourni

0,9 K.m/W

b) Température

20 °C

2) *Profondeur de pose des câbles enterrés*

900 mm

3) *Température ambiante de l'air*

Valeur des projets

40 °C

(échauffement solaire inclus, les valeurs maximales s'étendent entre 40 °C et 50 °C).

* Cette température est aussi prise comme situation type dans les tableaux de régime des câbles pour l'utilisation dans certaines dispositions telles que les câbles dans les sous-sols des postes d'alimentation et autres installations industrielles.

- b) For 3.3 kV to 33 kV cables (unless pressure assisted) – depth from ground surface to centre of cable, to centre of duct or to centre of trefoil ground of cables or ducts 800 mm
- c) For 33 kV pressure assisted cables – depth from ground surface to uppermost surface of cable or duct or of group of cables or ducts 900 mm

3) *Air ambient temperature*

Out of doors*	25 °C
In buildings	30 °C

A3.15 *United States of America*

1) *Thermal characteristics of the soil*

a) thermal resistivity:

average value to be used in calculations
when no information is available

0.9 K.m/W

b) Temperature

20 °C

2) *Depth of laying for buried cables*

900 mm

3) *Air ambient temperature*

Design value

40 °C

(including solar heating the maximum values range between 40 °C and 50 °C).

* This temperature is also assumed as a standard condition in tabulating ratings of cable for use in certain indoor situations such as cable basements in power stations and other industrial plants.