

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 Varembe

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

Withdrawing

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

Withdrawing

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.

Withdrawn

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.

Withdrawn

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	} = coefficients (voir paragraphe 7.2)	
B_2		
C	= capacité par phase	F/m
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	} = coefficients used in Sub-clause 7.2	
B_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	$W/m^2K^{5/4}$
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 ² K ^{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:

$\omega = 2\pi f$ (1/s)

C = capacité par unité de longueur (F/m)

U_0 = tension par rapport à la terre (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:

ε = permittivité relative de l'isolant

D_i = diamètre extérieur de l'isolant, à l'exclusion de l'écran (mm)

d_c = diamètre de l'âme y compris l'écran, s'il existe (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:

$\omega = 2\pi f$ (1/s)

C = capacitance per unit length (F/m)

U_o = voltage to earth (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:

ϵ = relative permittivity of the insulation

D_i = external diameter of the insulation (excluding screen) (mm)

d_c = diameter of conductor, including screen, if any (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)

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

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:

$$\lambda'_{l1} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{\frac{3}{4} P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4} Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3} (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)} \right]$$

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

$$\lambda'_{l2} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{\frac{3}{4} P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4} Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3} (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)} \right]$$

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

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

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)

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

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

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

$\lambda_1'' = 0$, 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:

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

et

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

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)

ω = $2\pi f$

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 $100 \mu\Omega/\text{m}$:

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

- 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 :

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

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:

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