

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
287-2-1**

Première édition
First edition
1994-12

**Câbles électriques –
Calcul du courant admissible –
Partie 2:
Résistance thermique –
Section 1: Calcul de la résistance thermique**

**Electric cables –
Calculation of the current rating –
Part 2:
Thermal resistance –
Section 1: Calculation of thermal resistance**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 287-2-1: 1994

Validité de la présente publication

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

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles auprès du Bureau Central de la CEI.

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

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement

Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 50: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI), qui se présente sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande. Voir également le dictionnaire multilingue de la CEI.

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

Symboles graphiques et littéraux

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

- la CEI 27: *Symboles littéraux à utiliser en électro-technique*;
- la CEI 417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*;
- la CEI 617: *Symboles graphiques pour schémas*;

et pour les appareils électromédicaux,

- la CEI 878: *Symboles graphiques pour équipements électriques en pratique médicale*.

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 27, de la CEI 417, de la CEI 617 et/ou de la CEI 878, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

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

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

Validity of this publication

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

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available from the IEC Central Office.

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

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
Published yearly
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates

Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC 50: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field. Full details of the IEV will be supplied on request. See also the IEC Multilingual Dictionary.

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

Graphical and letter symbols

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

- IEC 27: *Letter symbols to be used in electrical technology*;
- IEC 417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets*;
- IEC 617: *Graphical symbols for diagrams*;

and for medical electrical equipment,

- IEC 878: *Graphical symbols for electromedical equipment in medical practice*.

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 27, IEC 417, IEC 617 and/or IEC 878, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

IEC publications prepared by the same technical committee

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

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
287-2-1**

Première édition
First edition
1994-12

**Câbles électriques –
Calcul du courant admissible –
Partie 2:
Résistance thermique –
Section 1: Calcul de la résistance thermique**

**Electric cables –
Calculation of the current rating –
Part 2:
Thermal resistance –
Section 1: Calculation of thermal resistance**

© CEI 1994 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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

V

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	6
Articles	
1 Généralités	8
1.1 Domaine d'application	8
1.2 Symboles	8
2 Calcul des résistances thermiques	14
2.1 Résistances thermiques des constituants des câbles, T_1 , T_2 et T_3	14
2.1.1 Résistance thermique entre âme et gaine T_1	14
2.1.2 Résistance thermique entre gaine et armure T_2	20
2.1.3 Résistance thermique du revêtement externe T_3	22
2.1.4 Cas des câbles en tuyau	22
2.2 Résistance thermique extérieure T_4	24
2.2.1 Câbles posés à l'air libre	24
2.2.2 Un seul câble enterré	26
2.2.3 Groupe de câbles enterrés (non jointifs)	26
2.2.4 Groupe de câbles enterrés (jointifs) uniformément chargés	32
2.2.5 Tuyaux enterrés	34
2.2.6 Câbles en caniveaux enterrés	34
2.2.7 Câbles en fourreaux ou en tuyaux	36
3 Calcul numérique des quantités indiquées sous forme de graphique	40
3.1 Généralités	40
3.1.1 Facteur géométrique G pour les câbles bipolaires à ceinture à âmes circulaires (figure 2)	40
3.1.2 Facteur géométrique G pour les câbles tripolaires à ceinture à âmes circulaires (figure 3)	42
3.1.3 Résistance thermique des câbles tripolaires métallisés à ceinture à âmes circulaires rapportée à celle des câbles correspondants non métallisés (figure 4)	44
3.1.4 Résistance thermique des câbles tripolaires métallisés à âmes sectoriales rapportée à celle des câbles analogues non métallisés (figure 5)	44
3.1.5 Facteur géométrique $\bar{G}$ pour la résistance thermique des bourrages et revêtements des câbles triplombs ou sous gaines d'aluminium individuelles (figure 6)	46
3.2 Calcul graphique de $\Delta\theta_s$ (figure 8)	46
Tableaux	50
Figures	56

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
INTRODUCTION	7
Clause	
1 General	9
1.1 Scope	9
1.2 Symbols	9
2 Calculation of thermal resistances	15
2.1 Thermal resistances of the constituent parts of a cable, T_1 , T_2 and T_3	15
2.1.1 Thermal resistance between one conductor and sheath T_1	15
2.1.2 Thermal resistance between sheath and armour T_2	21
2.1.3 Thermal resistance of outer covering (serving) T_3	23
2.1.4 Pipe-type cables	23
2.2 External thermal resistance T_4	25
2.2.1 Cables laid in free air	25
2.2.2 Single isolated buried cable	27
2.2.3 Groups of buried cables (not touching)	27
2.2.4 Groups of buried cables (touching) equally loaded	33
2.2.5 Buried pipes	35
2.2.6 Cables in buried troughs	35
2.2.7 Cables in ducts or pipes	37
3 Digital calculation of quantities given graphically	41
3.1 General	41
3.1.1 Geometric factor G for two-core belted cables with circular conductors (figure 2)	41
3.1.2 Geometric factor G for three-core belted cables with circular conductors (figure 3)	43
3.1.3 Thermal resistance of three-core screened cables with circular conductors compared to that of a corresponding unscreened cable (figure 4)	45
3.1.4 Thermal resistance of three-core screened cables with sector-shaped conductors compared to that of a corresponding unscreened cable (figure 5)	45
3.1.5 Curve for $\bar{G}$ for obtaining the thermal resistance of the filling material between the sheaths and armour of SL and SA type cables (figure 6)	47
3.2 Calculation of $\Delta\theta_s$ by means of a diagram (figure 8)	47
Tables	51
Figures	56

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CÂBLES ÉLECTRIQUES – CALCUL DU COURANT ADMISSIBLE – Partie 2: Résistance thermique – Section 1: Calcul de la résistance thermique

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par les comités d'études 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.
- 3) Ces décisions constituent des recommandations internationales publiées sous forme de normes, de rapports techniques ou de guides et agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

La Norme internationale CEI 287-2-1 a été établie par le sous-comité 20A: Câbles de haute tension, du comité d'études 20 de la CEI: Câbles électriques.

Cette première édition de la CEI 287-2-1 annule et remplace la section trois ainsi que les annexes C et D de la deuxième édition de la CEI 287 parue en 1982, sans changement technique.

La CEI 287-1-1 remplace les sections un et deux de la deuxième édition de la CEI 287; la CEI 287-3-1 remplace les annexes A et B de la deuxième édition de la CEI 287.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapport de vote
20A(BC)75	20A(BC)81

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ELECTRIC CABLES –
CALCULATION OF THE CURRENT RATING –
Part 2: Thermal resistance –
Section 1: Calculation of thermal resistance**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international cooperation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, 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.
- 3) They have the form of recommendations for international use published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.

International Standard IEC 287-2-1 has been prepared by sub-committee 20A: High-voltage cables, of IEC technical committee 20: Electric cables.

This first edition of 287-2-1 cancels and replaces section three, and annexes C and D of the second edition of IEC 287 published in 1982, without technical changes.

IEC 287-1-1 replaces sections one and two of the second edition of IEC 287; IEC 287-3-1 replaces annexes A and B of the second edition of IEC 287.

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

Six Months' Rule	Report on voting
20A(CO)75	20A(CO)81

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

INTRODUCTION

La CEI 287 a été divisée en trois parties et diverses sections de manière à faciliter les révisions et les adjonctions.

Chaque partie est divisée en sections qui sont publiées en tant que normes séparées.

Partie 1: Equations de l'intensité du courant admissible (facteur de charge 100 %) et calcul des pertes

Partie 2: Résistance thermique

Partie 3: Sections concernant les conditions de fonctionnement

La présente section de la CEI 287-2 contient des méthodes de calcul de la résistance thermique interne des câbles, et de la résistance thermique externe des câbles posés à l'air libre, des câbles enterrés et des canaux.

Les formules de cette norme 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 celles 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 oeuvre, 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 dans la Partie 3, Section 1.

On trouvera un choix d'informations nécessaires pour sélectionner le type de câble approprié dans la Partie 3, Section 1.

INTRODUCTION

IEC 287 has been divided into three parts and sections so that revisions of, and additions to, the document can be carried out more conveniently.

Each part is divided into sections which are published as separate standards.

Part 1: Formulae of ratings and power losses

Part 2: Formulae for thermal resistance

Part 3: Sections on operating conditions

This section of IEC 287-2 contains methods for calculating the internal thermal resistance of cables and the external thermal resistance for cables laid in free air, ducts and buried.

The formulae in this standard 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 Part 3, Section 1.

A suggested list of the information required to select the appropriate type of cable is given in Part 3, Section 1.

CÂBLES ÉLECTRIQUES – CALCUL DU COURANT ADMISSIBLE –

Partie 2: Résistance thermique –

Section 1: Calcul de la résistance thermique

1 Généralités

1.1 Domaine d'application

La présente section de la CEI 287 s'applique uniquement au 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, avec ou sans assèchement partiel du sol, 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 de l'âme en supposant que les conditions du milieu ambiant restent inchangées.

Cette section fournit des formules pour la résistance thermique.

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).

1.2 Symboles

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

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 2.2.1)	m
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
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

ELECTRIC CABLES – CALCULATION OF THE CURRENT RATING – Part 2: Thermal resistance – Section 1: Calculation of thermal resistance

1 General

1.1 Scope

This section of IEC 287 is solely applicable to the conditions of steady-state operation of cables at all alternating voltages, and direct voltages up to 5 kV, buried directly in the ground, in ducts, in troughs or in steel pipes, both with and without partial drying-out of the soil, 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.

This section provides formulae for thermal resistance.

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).

1.2 Symbols

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

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 2.2.1)	m
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}	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	constante (voir 2.2.1.1)	
F_1	coefficient pour les câbles à ceinture défini en 2.1.1.2.2	
F_2	coefficient pour les câbles à ceinture défini en 2.1.1.2.5	
G	facteur géométrique pour câbles à ceinture	
$\bar{G}$	facteur géométrique des câbles triplombs	
H	intensité des radiations solaires (voir 2.2.1.2)	W/m ²
K	facteur d'écran pour la résistance thermique des câbles métallisés	
K_A	coefficient (voir 2.2.1)	
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
N	nombre de câbles chargés dans un bloc de fourreaux (voir 2.2.7.3)	
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	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 du fourreau (ou tuyau)	K.m/W
U V	constantes utilisées en 2.2.7.1	
W_d	pertes diélectriques par unité de longueur et par phase	W/m
W_k	pertes dissipées par le câble k	W/m
W_{TOT}	puissances totales dissipées dans un caniveau par unité de longueur	W/m
Y	constante utilisée en 2.2.7.1	
Z	constante utilisée en 2.2.1.1	
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_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 sectorale	mm
g	coefficient utilisé en 2.2.1.1	
h	coefficient de dissipation de chaleur	W/m ² K ^{5/4}
$\ln$	logarithme naturel (logarithme en base e)	
n	nombre d'âmes dans un câble	

E	constant used in 2.2.1.1	
F_1	coefficient for belted cables defined in 2.1.1.2.2	
F_2	coefficient for belted cables defined in 2.1.1.2.5	
G	geometric factor for belted cables	
$\bar{G}$	geometric factor for SL and SA type cables	
H	intensity of solar radiation (see 2.2.1.2)	W/m ²
K	screening factor for the thermal resistance of screened cables	
K_A	coefficient used in 2.2.1	
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
N	number of loaded cables in a duct bank (see 2.2.7.3)	
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 V	constants used in 2.2.7.1	
W_d	dielectric losses per unit length per phase	W/m
W_k	losses dissipated by cable k	W/m
W_{TOT}	total power dissipated in the trough per unit length	W/m
Y	coefficient used in 2.2.7.1	
Z	coefficient used in 2.2.1.1	
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_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
g	coefficient used in 2.2.1.1	
h	heat dissipation coefficient	W/m ² K ^{5/4}
$\ln$	natural logarithm (logarithm to base e)	
n	number of conductors in a cable	

p	partie du périmètre du caniveau qui participe à la dissipation de chaleur (voir 2.2.6.2)	m
r_1	rayon du cercle circonscrit aux deux ou trois âmes sectoriales dans un câble bipolaire ou tripolaire	mm
s_1	distance entre axes de deux câbles adjacents dans une nappe horizontale de trois câbles non jointifs	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	mm
u	$\frac{2L}{D_e}$ en 2.2.2	
u	$\frac{L_G}{r_b}$ en 2.2.7.3	
x, y	côtés d'un bloc de fourreaux ($y > x$) (voir 2.2.7.3)	mm
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	K
$\Delta\theta_{duct}$	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_1, λ_2	rapport utilisé 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'_{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	
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_T	résistivité thermique du matériau	K.m/W
σ	coefficient d'absorption des rayons solaires par la surface du câble	

p	the part of the perimeter of the cable trough which is effective for heat dissipation (see 2.2.6.2)	m
r_1	circumscribing radius of two or three-sector shaped conductors	mm
s_1	axial separation of two adjacent cables in a horizontal group of three, not touching	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	mm
u	$\frac{2L}{D_e}$ in 2.2.2	
u	$\frac{L_G}{r_b}$ in 2.2.7.3	
x, y	sides of duct bank ($y > x$) (see 2.2.7.3)	mm
θ_m	mean temperature of medium between a cable and duct or pipe	°C
$\Delta\theta$	permissible temperature rise of conductor above 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	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_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'_{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	
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_T	thermal resistivity of material	K.m/W
σ	absorption coefficient of solar radiation for the cable surface	

2 Calcul des résistances thermiques

2.1 Résistances thermiques des constituants des câbles, T_1 , T_2 et T_3

Cet article donne les formules pour le calcul des résistances thermiques linéiques des différentes parties de câbles, T_1 , T_2 et T_3 (voir 1.4 de la partie 1). Les résistivités thermiques des matériaux utilisés comme isolants et revêtements sont donnés dans le tableau 1.

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

2.1.1 Résistance thermique entre âme et gaine T_1

2.1.1.1 Câbles unipolaires

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

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

où

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

d_c est le diamètre de l'âme (mm)

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

NOTE – Pour les gaines ondulées, t_1 est mesurée d'après le diamètre intérieur moyen de la gaine qui est donnée par:

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

2.1.1.2 Câbles à ceinture

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

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

où

G est le facteur géométrique

NOTE – Pour les gaines ondulées, t_1 est mesurée d'après le diamètre intérieur moyen de la gaine qui est donnée par:

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

2.1.1.2.1 Câbles bipolaires à ceinture et âmes circulaires

Le facteur géométrique G est donné par la figure 2.

2 Calculation of thermal resistances

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

This clause gives the formulae for calculating the thermal resistances per unit length of the different parts of the cable T_1 , T_2 and T_3 (see 1.4 of part 1). The thermal resistivities of materials used for insulation and for protective coverings are given in table 1.

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

2.1.1 Thermal resistance between one conductor and sheath T_1

2.1.1.1 Single-core cables

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

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

where

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

d_c is the diameter of conductor (mm)

t_1 is the thickness of insulation between conductor and sheath (mm)

NOTE – For corrugated sheaths, t_1 is based on the mean internal diameter of the sheath which is given by:

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

2.1.1.2 Belted cables

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

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

where

G is the geometric factor

NOTE – For corrugated sheaths, t_1 is based on the mean internal diameter of the sheath which is given by:

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

2.1.1.2.1 Two-core belted cables with circular conductors

The geometric factor G given in figure 2.

2.1.1.2.2 Câbles bipolaires à ceinture et âmes sectoriales

Le facteur géométrique G est donné par:

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

où

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

d_a est le diamètre extérieur de la ceinture isolante (mm)

r_1 est le rayon du cercle circonscrit aux âmes (mm)

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

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

2.1.1.2.3 Câbles tripolaires à ceinture et âmes circulaires

Le facteur géométrique G est donné par la figure 3.

2.1.1.2.4 Câbles tripolaires à ceinture et âmes ovales

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

où

d_{cm} est le grand diamètre de l'âme ovale (mm)

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

2.1.1.2.5 Câbles tripolaires à ceinture et âmes sectoriales

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

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

où

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

d_a est le diamètre extérieur de la ceinture isolante (mm)

r_1 est le rayon du cercle circonscrit aux âmes (mm)

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

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

2.1.1.2.2 Two-core belted cables with sector-shaped conductors

The geometric factor G is given by:

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

where

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

d_a is the external diameter of the belt insulation (mm)

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

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

t is the insulation thickness between conductors (mm)

2.1.1.2.3 Three-core belted cables with circular conductors

The geometric factor G is given in figure 3.

2.1.1.2.4 Three-core belted cables with oval conductors

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

where

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

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

2.1.1.2.5 Three-core belted cables with sector-shaped conductors

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

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

where

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

d_a is the external diameter of the belt insulation (mm)

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

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

t is the insulation thickness between conductors (mm)

2.1.1.3 Câbles tripolaires métallisés

2.1.1.3.1 Câbles métallisés à âmes circulaires

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

On a donc:
$$T_1 = K \frac{\rho_T}{2\pi} G$$

2.1.1.3.2 Câbles métallisés à âmes ovales

Le câble sera considéré comme un câble à âme circulaire ayant un diamètre équivalent $d_c = \sqrt{d_{cm} \cdot d_{cm}}$.

2.1.1.3.3 Câbles métallisés à âmes sectoriales

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

2.1.1.4 Câbles à huile fluide

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

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

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

où

d_c est le diamètre de l'âme (mm)

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

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

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

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

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

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

où

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

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

2.1.1.3 Three-core cables, metal tape screened type

2.1.1.3.1 Screened cables with circular conductors

Cables of this type may be first considered as belted cables for which $\frac{t_i}{t}$ is 0,5. Then, in order to take account of the thermal conductivity of the metallic screens, the result shall be multiplied by a factor K , called the screening factor, which is given in figure 4 for different values of $\frac{t_i}{d_c}$ and different cable specifications.

Thus:

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

2.1.1.3.2 Screened cables with oval-shaped conductors

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

2.1.1.3.3 Screened cables with sector-shaped conductors

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

2.1.1.4 Oil-filled cables

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

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

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

where

d_c is the conductor diameter (mm)

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

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

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

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

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

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

where

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

NOTE – This formula is independent of the metals used for the screens and for the oil ducts.

2.1.1.4.3 Câbles tripolaires à âmes circulaires, à écrans sur isolant en ruban métallique, sans bourrages et canaux d'huile, ayant un ruban en tissu de cuivre textile liant les conducteurs et une gaine ondulée en aluminium

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

$$T_1 = \frac{475}{D_c^{1,74}} \left[\frac{t_g}{D_c} \right]^{0,62} + \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(\frac{D_c - 2 \delta_1}{d_c} \right)$$

où

$$t_g = 0,5 \left(\left[\frac{D_{it} + D_{ic}}{2} \right] - 2,16 D_c \right)$$

D_c est le diamètre d'un conducteur au-dessus des rubans métalliques de l'écran (mm)

t_g est l'interstice nominal moyen entre les rubans métalliques de l'écran sur isolant et le diamètre intérieur moyen de la gaine (mm)

δ_1 est l'épaisseur du ruban métallique de l'écran sur isolant (mm)

NOTE - La formule ne dépend pas du métal utilisé pour les rubans de l'écran.

2.1.1.5 Câbles triplombs et sous gaines d'aluminium individuelles

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

2.1.2 Résistance thermique entre gaine et armure T_2

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

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

$$T_2 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln \left[1 + \frac{2 t_2}{D_s} \right]$$

où

t_2 est l'épaisseur du revêtement sous armure (mm)

D_s est le diamètre extérieur de la gaine (mm)

2.1.2.2 Câbles triplombs ou sous gaine d'aluminium individuelle

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

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

où

$\bar{G}$ est le facteur géométrique donné par la figure 6.

2.1.1.4.3 Three-core cables with circular conductors, metal tape core screens, without fillers and oil ducts, having a copper woven fabric tape binding the cores together and a corrugated aluminium sheath

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

$$T_1 = \frac{475}{D_c^{1,74}} \left[\frac{t_g}{D_c} \right]^{0,62} + \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(\frac{D_c - 2 \delta_1}{d_c} \right)$$

where

$$t_g = 0,5 \left(\left[\frac{D_{it} + D_{ic}}{2} \right] - 2,16 D_c \right)$$

D_c is the diameter of a core over its metallic screen tapes (mm)

t_g is the average nominal clearance between the core metallic screen tapes and the average inside diameter of the sheath (mm)

δ_1 is the thickness of metallic tape core screen (mm)

NOTE – The formula is independent of the metal used for the screen tapes.

2.1.1.5 SL and SA type cables

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

2.1.2 Thermal resistance between sheath and armour T_2

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

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

$$T_2 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln \left[1 + \frac{2 t_2}{D_s} \right]$$

where

t_2 is the thickness of the bedding (mm)

D_s is the external diameter of the sheath (mm)

2.1.2.2 SL and SA type cables

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

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

where

$\bar{G}$ is the geometric factor given in figure 6.

2.1.3 Résistance thermique du revêtement externe T_3

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

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

où

t_3 est l'épaisseur du revêtement externe (mm)

D'_a est le diamètre extérieur de l'armure (mm)

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

Pour les gaines ondulées:

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

2.1.4 Cas des câbles en tuyau

Pour ces câbles, nous avons:

a) La résistance thermique T_1 de l'isolant de chaque conducteur entre âme et écran. Celle-ci est calculée par la méthode indiquée en 2.1.1 relatif aux câbles unipolaires.

b) La résistance thermique T_2 comprend deux parties:

1) La résistance de chaque revêtement placé sur écran ou sur gaine de chaque conducteur. La valeur à introduire dans l'équation de 1.4 de la partie 1, pour cette partie de T_2 , est la valeur relative à l'ensemble du câble, c'est-à-dire que la valeur d'un câble tripolaire est le tiers de la valeur d'un conducteur seul.

La valeur par conducteur est calculée par la méthode donnée en 2.1.2 pour le revêtement des câbles unipolaires. Dans le cas de conducteurs ovales, on prend le diamètre équivalent (moyenne géométrique), $\sqrt{d_M \cdot d_m}$.

2) La résistance thermique du gaz ou de l'huile comprise entre la surface extérieure du conducteur et le tuyau. Cette résistance est calculée de la même façon que la partie T_4 correspondant à l'espace compris entre un câble et la surface du fourreau dans lequel il serait posé (voir 2.2.7.1).

La valeur calculée doit se rapporter à l'ensemble du câble et être ajoutée à la valeur trouvée plus haut en 1) pour former la résistance T_2 qui sera introduite dans l'équation du courant admissible de 1.4 de la partie 1.

c) La résistance thermique T_3 de tout type de revêtement extérieur au tuyau sera déterminée comme indiqué en 2.1.3. La résistance thermique du tuyau métallique lui-même est négligeable.

2.1.3 Thermal resistance of outer covering (serving) T_3

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

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

where

t_3 is the thickness of serving (mm)

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

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

For corrugated sheaths:

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

2.1.4 Pipe-type cables

For these three-core cables, we have:

a) The thermal resistance T_1 of the insulation of each core between the conductor and the screen. This is calculated by the method set out in 2.1.1 for single-core cables.

b) The thermal resistance T_2 as made up of two parts:

1) The thermal resistance of any serving over the screen or sheath of each core. The value to be substituted for part of T_2 in the rating equation of 1.4 of part 1 is the value per cable, i.e. the value for a three-core cable is one-third the value of a single core.

The value per core is calculated by the method given in 2.1.2 for the bedding of single-core cables. For oval cores, the geometric mean of the major and minor diameters $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ shall be used in place of the diameter for a circular core assembly.

2) The thermal resistance of the gas or oil between the surface of the cores and the pipe. This resistance is calculated in the same way as that part of T_4 which is between a cable and the internal surface of a duct, as given in 2.2.7.1.

The value calculated will be per cable and should be added to the quantity calculated in 1) above, before substituting for T_2 in the rating equation of 1.4 of part 1.

c) The thermal resistance T_3 of any external covering on the pipe is dealt with as in 2.1.3. The thermal resistance of the metallic pipe itself is negligible.

2.2 Résistance thermique extérieure T_4

2.2.1 Câbles posés à l'air libre

2.2.1.1 Câbles protégés du rayonnement solaire direct

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

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

où

$$h = \frac{Z}{(D_e^*)^9} + E$$

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

NOTE - Dans tout le paragraphe 2.2.1 D_e^* est en mètres.

h est le coefficient de dissipation de chaleur obtenu soit à partir de la formule ci-dessus utilisant les valeurs appropriées des constantes Z , E et g données au tableau 2, soit à partir des courbes des figures 7a, 7b et 7c, données pour plus de commodité ($W/m^2 (K)^{5/4}$)

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

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

Pour les câbles en caniveaux non remplis, se reporter en 2.2.6.

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

Une méthode itérative simple de calcul $(\Delta\theta_s)^{1/4}$ est donnée ci-dessous. Une autre méthode graphique est donnée en 3.2.

Calculer

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

puis:

$$(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} = \left[\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d}{1 + K_A (\Delta\theta_s)_n^{1/4}} \right]^{0,25}$$

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

où

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

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

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

2.2 External thermal resistance T_4

2.2.1 Cables laid in free air

2.2.1.1 Cables protected from direct solar radiation

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

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

where

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

D_e^* is the external diameter of cable (m)

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

NOTE – Throughout subclause 2.2.1 D_e^* is in metres.

h is the heat dissipation coefficient obtained either from the above formula using the appropriate values of constants Z , E and g given in table 2, or from the curves in figures 7a, 7b and 7c, which are reproduced for convenience ($W/m^2 (K)^{5/4}$)

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

$\Delta\theta_s$ is the excess of cable surface temperature above ambient temperature (see herein-after for method of calculation) (K)

For cables in unfilled troughs, see 2.2.6.

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

A simple iterative method of calculating $(\Delta\theta_s)^{1/4}$ is given below. The alternative graphical method is described in 3.2.

Calculate

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

then:

$$(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} = \left[\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d}{1 + K_A (\Delta\theta_s)_n^{1/4}} \right]^{0.25}$$

Set the initial value of $(\Delta\theta_s)^{1/4} = 2$ and reiterate until $(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} - (\Delta\theta_s)_n^{1/4} \leq 0,001$

where

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

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

$\Delta\theta$ is the permissible conductor temperature rise above ambient temperature

2.2.1.2 Câbles soumis au rayonnement solaire direct

2.2.1.2.1 Résistivité thermique extérieure T_4^*

Lorsque les câbles sont soumis au rayonnement solaire direct, T_4^* est calculé par la méthode de 2.2.1.1, mais dans la méthode itérative $(\Delta\theta_s)^{1/4}$ est calculé en utilisant la formule suivante:

$$(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} = \left[\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d + \Delta\theta_{ds}}{1 + K_A (\Delta\theta_s)_n^{1/4}} \right]^{0,25}$$

où

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

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

où

σ est le coefficient d'absorption des rayons solaires par la surface du câble (voir tableau 3)

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

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

La méthode graphique correspondante est donnée en figure 8.

2.2.2 Un seul câble enterré

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

où

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

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

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

D_e est le diamètre extérieur du câble (mm)
pour les gaines ondulées $D_e = D_{oc} + 2 t_3$

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

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

2.2.3 Groupe de câbles enterrés (non jointifs)

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

2.2.1.2 Cables directly exposed to solar radiation

2.2.1.2.1 External thermal resistance T_4^*

Where cables are directly exposed to solar radiation, T_4^* is calculated by the method of 2.2.1.1 except that in the iterative method $(\Delta\theta_s)^{1/4}$ is calculated using the following formula:

$$(\Delta\theta_s)^{1/4}_{n+1} = \left[\frac{\Delta\theta + \Delta\theta_d + \Delta\theta_{ds}}{1 + K_A (\Delta\theta_s)^{1/4}_n} \right]^{0.25}$$

where

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

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

where

σ is the absorption coefficient of solar radiation for the cable surface (see table 3)

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

D_e^* is the external diameter of cable (m)
for corrugated sheaths $D_e^* = (D_{oc} + 2 t_3) \cdot 10^{-3}$ (m)

The alternative graphical method is included with figure 8.

2.2.2 Single isolated buried cable

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

where

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

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

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

D_e is the external diameter of the cable (mm)

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

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

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

2.2.3 Groups of buried cables (not touching)

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

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

2.2.3.1 Câbles inégalement chargés

La méthode suggérée, pour un groupe de câbles inégalement chargés et de construction différente, consiste à calculer l'élévation de température, à la surface d'un des câbles, due aux autres câbles du groupe, et à retrancher cette valeur de celle de $\Delta\theta$ utilisée dans l'équation de 1.4 de la partie 1. Il faut donc estimer auparavant la puissance linéique dissipée par chaque câble, quitte à corriger ultérieurement ces valeurs si nécessaire.

Ainsi, pour le câble de rang p dont on veut déterminer la charge admissible, l'échauffement $\Delta\theta_p$ (au-dessus de la température ambiante) dû à la puissance dissipée par les $(q - 1)$ autres câbles de groupe sera:

$$\Delta\theta_p = \Delta\theta_{1p} + \Delta\theta_{2p} + \dots + \Delta\theta_{kp} + \dots + \Delta\theta_{qp}$$

(le terme $\Delta\theta_{pp}$ étant exclu de la sommation)

où

$\Delta\theta_{kp}$ est l'échauffement à la surface du câble produit par la puissance linéique W_k dissipée par le câble k , c'est-à-dire:

$$\Delta\theta_{kp} = \frac{1}{2\pi} p_T W_k \ln \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right)$$

Les distances d_{pk} et d'_{pk} sont mesurées du centre du câble p^{th} au centre du câble k et au centre du câble symétrique de k par rapport à la surface du sol (voir figure 1).

La valeur de $\Delta\theta$ figurant dans l'équation du courant admissible de 1.4 de la partie 1 minorée de la quantité $\Delta\theta_p$ et la charge dans le câble p^{th} est calculée avec la valeur T_4 correspondant au câble p supposé seul.

Le calcul est effectué pour tous les câbles du groupe et recommencé quand c'est nécessaire pour éviter un échauffement excessif de l'un quelconque des autres câbles.

2.2.3.2 Câbles identiques également chargés

Le deuxième cas est celui d'un groupe de câbles identiques et également chargés pour lesquels le courant admissible sera déterminé par le câble le plus chaud. Il est en général possible, d'après la configuration de l'installation, de déterminer ce câble et de ne faire le calcul que pour celui-ci. En cas de difficulté, on peut avoir à faire le calcul pour un autre câble du groupe. La méthode de calcul consiste à utiliser une valeur modifiée de T_4 tenant compte de l'échauffement mutuel des câbles du groupe et à ne plus modifier la valeur de $\Delta\theta$ dans l'équation de 1.4 de la partie 1.

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

2.2.3.1 Unequally loaded cables

The method suggested for groups of unequally loaded dissimilar cables is to calculate the temperature rise at the surface of the cable under consideration caused by the other cables of the group, and to subtract this rise from the value of $\Delta\theta$ used in the equation for the rated current in 1.4 of part 1. An estimate of the power dissipated per unit length of each cable must be made beforehand, and this can be subsequently amended as a result of the calculation where this becomes necessary.

Thus, the temperature rise $\Delta\theta_p$ above ambient at the surface of the p^{th} cable, whose rating is being determined, caused by the power dissipated by the other $(q - 1)$ cables in the group, is given by:

$$\Delta\theta_p = \Delta\theta_{1p} + \Delta\theta_{2p} + \dots \Delta\theta_{kp} + \dots \Delta\theta_{qp}$$

(the term $\Delta\theta_{pp}$ is excluded from the summation)

where

$\Delta\theta_{kp}$ is the temperature rise at the surface of the cable produced by the power W_k watt per unit length dissipated in cable k :

$$\Delta\theta_{kp} = \frac{1}{2\pi} \rho_T W_k \ln \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right)$$

The distances d_{pk} and d'_{pk} are measured from the centre of the p^{th} cable to the centre of cable k , and to the centre of the reflection of cable k in the ground-air surface respectively (see figure 1).

The value of $\Delta\theta$ in the equation for the rated current in 1.4 of part 1 is then reduced by the amount $\Delta\theta_p$ and the rating of the p^{th} cable is determined using a value T_4 corresponding to an isolated cable at position p .

This calculation is performed for all cables in the group and is repeated where necessary to avoid the possibility of overheating any cable.

2.2.3.2 Equally loaded identical cables

The second type of grouping is where the rating of a number of equally loaded identical cables is determined by the rating of the hottest cable. It is usually possible to decide from the configuration of the installation which cable will be the hottest, and to calculate the rating for this one. In cases of difficulty, a further calculation for another cable may be necessary. The method is to calculate a modified value of T_4 which takes into account the mutual heating of the group and to leave unaltered the value of $\Delta\theta$ used in the rating equation of 1.4 of part 1.

La valeur modifiée de la résistance thermique extérieure T_4 pour le câble de rang p est donnée par:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln \left\{ \left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right) \left[\left(\frac{d'_{p1}}{d_{p1}} \right) \left(\frac{d'_{p2}}{d_{p2}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pq}}{d_{pq}} \right) \right] \right\}$$

Il y a $(q - 1)$ termes, le terme $\frac{d'_{pp}}{d_{pp}}$ étant exclus.

Les distances d_{pk} , etc., sont les mêmes que celles indiquées dans la figure 1 pour la première méthode.

L'expression simplifiée $2u$ peut être utilisée à la place de $u + \sqrt{u^2 - 1}$ si les conditions nécessaires sont remplies (voir 2.2.2).

Pour des configurations de câbles simples, cette formule peut être considérablement simplifiée. Les exemples suivants ont été obtenus en utilisant le principe de superposition.

2.2.3.2.1 Deux câbles non jointifs ayant des pertes égales, posés en nappe horizontale:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \left\{ \ln (u + \sqrt{u^2 - 1}) + \frac{1}{2} \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\}$$

où

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

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

D_e est le diamètre extérieur du câble (mm)

s_1 est la distance entre axes de deux câbles voisins (mm)

Lorsque la valeur de u dépasse 10, le terme $(u + \sqrt{u^2 - 1})$ peut être remplacé par $(2u)$.

2.2.3.2.2 Trois câbles ayant approximativement des pertes égales, posés en nappe horizontale à distance égale:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \left\{ \ln (u + \sqrt{u^2 - 1}) + \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\}$$

La valeur T_4 est celle correspondant au câble central du groupe et celle à introduire directement dans les équations de 1.4.1 de la partie 1.

2.2.3.2.3 Trois câbles ayant des pertes inégales dans les gaines, posés en nappe horizontale à distance égale:

Lorsque les pertes dans les gaines de câbles unipolaires posés en nappe horizontale sont importantes et quand les gaines ne sont pas transposées et/ou que les gaines sont court-circuitées au niveau de chacune des jonctions, l'inégalité des pertes influence les résistances thermiques extérieures du câble le plus chaud. Dans ces cas, la valeur de T_4

The modified value of the external thermal resistance T_4 of the p^{th} cable is given by:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln \left\{ \left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right) \left[\left(\frac{d'_{p1}}{d_{p1}} \right) \left(\frac{d'_{p2}}{d_{p2}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pq}}{d_{pq}} \right) \right] \right\}$$

There are $(q - 1)$ terms, with the term $\frac{d'_{pp}}{d_{pp}}$ excluded.

The distances d_{pk} , etc., are the same as those shown in figure 1, for the first method.

The simpler version $2u$ may be used instead of $u + \sqrt{u^2 - 1}$ if suitable (see 2.2.2).

For simple configurations of cables, this formula may be simplified considerably. The following examples were obtained by the use of superposition.

2.2.3.2.1 Two cables having equal losses, laid in a horizontal plane, spaced apart:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \left\{ \ln (u + \sqrt{u^2 - 1}) + \frac{1}{2} \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\}$$

where

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

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

D_e is the external diameter of one cable (mm)

s_1 is the axial separation between two adjacent cables (mm)

When the value of u exceeds 10, the term $(u + \sqrt{u^2 - 1})$ may be replaced by $(2u)$.

2.2.3.2.2 Three cables having approximately equal losses, laid in a horizontal plane; equally spaced apart:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \left\{ \ln (u + \sqrt{u^2 - 1}) + \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\}$$

The value T_4 is that of the centre cable of the group and is used directly in the equation of 1.4.1 of part 1.

2.2.3.2.3 Three cables having unequal sheath losses, laid in a horizontal plane; equally spaced apart:

When the losses in the sheaths of single-core cables laid in a horizontal plane are appreciable, and the sheaths are laid without transposition and/or the sheaths are bonded at all joints, their inequality affects the external thermal resistances of the hottest cable. In such cases the value of T_4 to be used in the numerator of the rating equation in 1.4.1 of part 1

à utiliser dans le numérateur de l'équation du calcul du courant de 1.4.1 de la partie 1 est celle qui est donnée en 2.2.3.2.2 mais une valeur modifiée de T_4 doit être utilisée dans le dénominateur. Elle est donnée par:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \left(\ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) + \left[\frac{1 + 0,5(\lambda'_{11} + \lambda'_{12})}{1 + \lambda'_{1m}} \right] \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right)$$

Cela suppose que le câble central est le câble le plus chaud. La valeur de λ_1 à utiliser dans l'équation de 1.4.1 de la partie 1 est celle qui correspond au câble central,

où

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

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

D_e est le diamètre extérieur du câble (mm)

s_1 est la distance entre axes de deux câbles voisins (mm)

λ'_{11} est le facteur de perte de la gaine pour un câble extérieur du groupe

λ'_{12} est le facteur de perte de la gaine pour l'autre câble extérieur du groupe

λ'_{1m} est le facteur de perte de la gaine pour le câble central du groupe

Lorsque la valeur de u dépasse 10, le terme $(u + \sqrt{u^2 - 1})$ peut être remplacé par $(2u)$.

2.2.4 Groupes de câbles enterrés (jointifs) uniformément chargés

2.2.4.1 Deux câbles unipolaires posés en nappe

$$T_4 = \frac{\rho_T}{\pi} (\ln(2u) - 0,451)$$

pour $u \geq 5$

2.2.4.2 Trois câbles unipolaires posés en nappe

$$T_4 = \rho_T (0,475 \ln(2u) - 0,346)$$

pour $u \geq 5$

2.2.4.3 Trois câbles unipolaires posés en trèfle

Pour cette configuration, L est mesurée à partir du centre du groupe en trèfle et D_e est le diamètre d'un câble. T_4 est la résistance thermique extérieure de l'un quelconque des câbles, que le triangle formé par les câbles ait son sommet dirigé vers le haut ou vers le bas.

Pour les gaines ondulées, $D_e = D_{oc} + 2 t_3$.

2.2.4.3.1 Câbles à gaines métalliques

$$T_4 = \frac{1,5}{\pi} \rho_T [\ln(2u) - 0,630]$$

Dans ce cas, la résistance thermique du revêtement sur la gaine ou les fils d'armure, T_3 , calculée en 2.1.3 doit être multipliée par 1,6.

is as given in 2.2.3.2.2, but a modified value of T_4 must be used in the denominator, and is given by:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \left(\ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) + \left[\frac{1 + 0,5 (\lambda'_{11} + \lambda'_{12})}{1 + \lambda'_{lm}} \right] \ln \left[1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right)$$

This assumes that the centre cable is the hottest cable. The value of λ_1 to be used in the rating equation of 1.4.1 of part 1 is that for the centre cable,

where

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

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

D_e is the external diameter of one cable (mm)

s_1 is the axial separation between two adjacent cables (mm)

λ'_{11} is the sheath loss factor for an outer cable of the group

λ'_{12} is the sheath loss factor for the other outer cable of the group

λ'_{lm} is the sheath loss factor for the middle cable of the group

When the value of u exceeds 10, the term $(u + \sqrt{u^2 - 1})$ may be replaced by $(2u)$.

2.2.4 Groups of buried cables (touching) equally loaded

2.2.4.1 Two single-core cables, flat formation

$$T_4 = \frac{\rho_T}{\pi} \left(\ln(2u) - 0,451 \right)$$

for $u \geq 5$

2.2.4.2 Three single-core cables, flat formation

$$T_4 = \rho_T (0,475 \ln(2u) - 0,346)$$

for $u \geq 5$

2.2.4.3 Three single-core cables, trefoil formation

For this configuration, L is measured to the centre of the trefoil group and D_e is the diameter of one cable. T_4 is the external thermal resistance of any one of the cables and the configuration may be with the apex either at the top or at the bottom of the group.

For corrugated sheaths, $D_e = D_{oc} + 2 t_3$.

2.2.4.3.1 Metallic sheathed cables

$$T_4 = \frac{1,5}{\pi} \rho_T [\ln(2u) - 0,630]$$

In this case, the thermal resistance of the serving over the sheath or armour, T_3 , as calculated by the method of 2.1.3 shall be multiplied by a factor of 1,6.

2.2.4.3.2 Câbles recouverts partiellement d'un revêtement métallique (armure posée hélicoïdalement ou fils d'écran couvrant 20 % à 50 % de la circonférence du câble)

Cette formule correspond à un écran en fils de cuivre de 0,7 mm de diamètre posés à pas long (15 fois le diamètre sous l'écran) dont la section droite totale est comprise entre 15 mm² et 35 mm².

$$T_4 = \frac{1,5}{\pi} \rho_T [\ln(2u) - 0,630]$$

Dans ce cas, la résistance thermique de l'enveloppe isolante T_1 , calculée en 2.1.1.1 et la résistance thermique du revêtement externe T_3 , calculée en 2.1.3 doivent être multipliées par les facteurs suivants:

- T_1 : par 1,07 pour les câbles jusqu'à 35 kV
 par 1,16 pour les câbles de 35 kV à 110 kV
 T_3 : par 1,6.

NOTE – Ce sujet est à l'étude.

2.2.4.3.3 Câbles à gaines non métalliques

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T [\ln(2u) + 2 \ln(u)]$$

NOTE – Ce sujet est à l'étude.

2.2.5 Tuyaux enterrés

La résistance thermique externe des conduites enterrées utilisées pour les câbles en tuyaux est calculée comme pour les câbles ordinaires, en utilisant la formule de 2.2.2. Dans ce cas, la profondeur de pose L est mesurée à partir du centre du tuyau et D_e est le diamètre extérieur du tuyau, y compris le revêtement anticorrosion.

2.2.6 Câbles en caniveaux enterrés

2.2.6.1 Caniveaux enterrés remplis de sable

Lorsque les câbles sont posés dans des caniveaux remplis de sable, complètement enterrés ou affleurant la surface du sol, le sable risque de se dessécher et de rester sec pendant de longues périodes. La résistance thermique externe du câble peut être alors très élevée et le câble peut atteindre des températures élevées, ce qui n'est pas souhaitable. Il est conseillé de calculer le courant du câble en utilisant une valeur de 2,5 K.m/W pour la résistivité thermique du sable de remplissage, à moins qu'on utilise un matériau de remplissage spécial dont la résistivité à l'état sec est connue.

2.2.4.3.2 *Part-metallic covered cables (where helically laid armour or screen wires cover from 20 % to 50 % of the cable circumference)*

This formula is based on long lay (15 times the diameter under the wire screen) 0,7 mm diameter individual copper wires having a total cross-sectional area of between 15 mm² and 35 mm².

$$T_4 = \frac{1,5}{\pi} \rho_T [\ln (2u) - 0,630]$$

In this case, the thermal resistance of the insulation T_1 , as calculated by the method of 2.1.1.1 and the thermal resistance of the serving T_3 , as calculated by the method 2.1.3 shall be multiplied by the following factors:

T_1 : by 1,07 for cables up to 35 kV

by 1,16 for cables from 35 kV to 110 kV

T_3 : by 1,6.

NOTE – This subject is under consideration.

2.2.4.3.3 *Non-metallic sheathed cables*

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T [\ln (2u) + 2 \ln (u)]$$

NOTE – This subject is under consideration.

2.2.5 *Buried pipes*

The external thermal resistance of buried pipes used for pipe-type cables is calculated as for ordinary cables, using the formula in 2.2.2. In this case, the depth of laying L is measured to the centre of the pipe and D_e is the external diameter of the pipe, including anti-corrosion covering.

2.2.6 *Cables in buried troughs*

2.2.6.1 *Buried troughs filled with sand*

Where cables are installed in sand-filled troughs, either completely buried or with the cover flush with the ground surface, there is danger that the sand will dry out and remain dry for long periods. The cable external thermal resistance may then be very high and the cable may reach undesirably high temperatures. It is advisable to calculate the cable rating using a value of 2,5 K.m/W for the thermal resistivity of the sand filling unless a specially selected filling has been used for which the dry resistivity is known.

2.2.6.2 Caniveaux de tous types non remplis dont le sommet affleure la surface du sol et exposés à l'air libre

On utilise une formule empirique donnant l'échauffement de l'air du caniveau au-dessus de l'ambiante:

$$\Delta\theta_{tr} = \frac{W_{TOT}}{3p}$$

où

W_{TOT} est la puissance totale dissipée dans le caniveau par mètre de longueur (W/m)

p est la partie du périmètre du caniveau qui participe à la dissipation de chaleur (m)

NOTE – La validité de cette formule est à l'étude.

On ne va donc pas introduire dans la valeur de p les parties du périmètre exposées aux rayons solaires. Le calcul de l'échauffement du câble particulier du caniveau est identique à celui d'un câble à l'air libre (voir 2.2.1), mais la température ambiante doit être augmentée de $\Delta\theta_{tr}$.

2.2.7 Câbles en fourreaux ou en tuyaux

La résistance thermique extérieure d'un câble posé en fourreau comprend trois parties:

- La résistance thermique de l'intervalle d'air entre la surface du câble et la surface intérieure du fourreau T'_4 .
- La résistance thermique du matériau constituant le fourreau T''_4 . La résistance thermique d'un tuyau métallique est négligeable.
- La résistance thermique entre la surface extérieure du fourreau et le milieu ambiant T'''_4 .

La valeur de T_4 qui doit figurer dans l'équation donnant l'intensité admissible (voir 1.4 de la partie 1) est la somme de ces trois termes:

$$T_4 = T'_4 + T''_4 + T'''_4$$

NOTE – Les câbles en fourreaux, qui ont été complètement remplis d'un matériau pompé ayant une résistivité thermique égale ou inférieure à celle du sol environnant soit à l'état sec, soit effectivement étanche de manière que le matériau de remplissage conserve son humidité, peuvent être traités comme des câbles directement enterrés.

2.2.7.1 Résistance thermique entre câble et fourreau (ou tuyau) T'_4

Pour les câbles d'un diamètre compris entre 25 mm et 100 mm posés en fourreaux, la formule indiquée ci-après doit être utilisée. On doit également l'utiliser pour le calcul de la résistance thermique de l'espace compris entre les conducteurs et la surface du tuyau d'un câble en tuyau (voir 2.1.4 b), quand le diamètre équivalent des trois phases dans le tuyau est compris entre 75 mm et 125 mm. Le diamètre équivalent est défini plus loin:

$$T'_4 = \frac{U}{1 + 0,1 (V + Y\theta_m) D_e}$$

où

$\left. \begin{matrix} U \\ V \\ Y \end{matrix} \right\}$ sont les constantes dépendant des installations dont les valeurs sont données dans le tableau 4.

2.2.6.2 Unfilled troughs of any type, with the top flush with the soil surface and exposed to free air

An empirical formula is used which gives the temperature rise of the air in the trough above the air ambient as:

$$\Delta\theta_{tr} = \frac{W_{TOT}}{3p}$$

where

W_{TOT} is the total power dissipated in the trough per metre length (W/m)

p is that part of the trough perimeter which is effective for heat dissipation (m)

NOTE – The validity of this formula is at present under investigation.

Any portion of the perimeter, which is exposed to sunlight, is therefore not included in the value of p . The rating of a particular cable in the trough is then calculated as for a cable in free air (see 2.2.1), but the ambient temperature shall be increased by $\Delta\theta_{tr}$.

2.2.7 Cables in ducts or pipes

The external thermal resistance of a cable in a duct consists of three parts:

- The thermal resistance of the air space between the cable surface and duct internal surface T'_4 .
- The thermal resistance of the duct itself, T''_4 . The thermal resistance of a metal pipe is negligible.
- The external thermal resistance of the duct T'''_4 .

The value of T_4 to be substituted in the equation for the permissible current rating in 1.4 of part 1 will be the sum of the individual parts, i.e.:

$$T_4 = T'_4 + T''_4 + T'''_4$$

NOTE – Cables in ducts which have been completely filled with a pumpable material having a thermal resistivity not exceeding that of the surrounding soil, either in the dry state or when sealed to preserve the moisture content of the filling material, may be treated as directly buried cables.

2.2.7.1 Thermal resistance between cable and duct (or pipe) T'_4

For the cable diameters in the range 25 mm to 100 mm the following formula shall be used for ducted cable. It shall also be used for the thermal resistance of the space between cores and pipe surface of a pipe-type cable (see 2.1.4 b), when the equivalent diameter of the three cores in the pipe is within the range 75 mm to 125 mm. The equivalent diameter is defined below:

$$T'_4 = \frac{U}{1 + 0,1 (V + Y\theta_m) D_e}$$

where

$\left. \begin{matrix} U \\ V \\ Y \end{matrix} \right\}$ are constants, depending on the installations the values of which are given in table 4.

D_e est le diamètre extérieur du câble (mm)

Lorsque la formule est appliquée aux câbles en tuyaux (voir 2.1.4 b), D_e est le diamètre équivalent du groupe de conducteurs, soit:

- deux conducteurs: $D_e = 1,65 \times \text{diamètre extérieur d'un conducteur}$ (mm)
- trois conducteurs: $D_e = 2,15 \times \text{diamètre extérieur d'un conducteur}$ (mm)
- quatre conducteurs: $D_e = 2,50 \times \text{diamètre extérieur d'un conducteur}$ (mm)

θ_m est la température moyenne du milieu remplissant l'espace compris entre le câble et le conduit. Une valeur présumée est choisie au départ et le calcul repris avec une valeur modifiée si nécessaire (°C)

2.2.7.2 Résistance thermique du fourreau (ou tuyau) T_4''

La résistance thermique (T_4'') du fourreau est:

$$T_4'' = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln \left(\frac{D_o}{D_d} \right)$$

où

D_o est le diamètre extérieur du fourreau (mm)

D_d est le diamètre intérieur du fourreau (mm)

ρ_T est la résistivité thermique du matériau constituant le fourreau (K.m/W)

La valeur de ρ_T peut être considérée comme nulle pour les fourreaux métalliques, pour les autres matériaux, voir le tableau 1

2.2.7.3 Résistance thermique extérieure au fourreau (ou tuyau) T_4'''

Elle doit être calculée pour un seul fourreau non noyé dans le béton, de la même façon que pour les câbles, à l'aide des formules appropriées de 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3 ou 2.2.4, le rayon extérieur du câble étant remplacé par le rayon extérieur du fourreau ou tuyau, y compris le revêtement extérieur anti-corrosion éventuel. Si les fourreaux sont noyés dans le béton, on admettra, pour le calcul de la résistance thermique, que le milieu qui entoure les fourreaux est homogène et que sa résistivité thermique est égale à celle du béton. Une correction est alors ajoutée algébriquement pour tenir compte de la différence éventuelle entre la résistivité thermique du béton et celle du sol, pour la partie du circuit thermique extérieure au bloc de fourreaux.

La correction de résistance thermique est donnée par:

$$\frac{N}{2\pi} (\rho_e - \rho_c) \ln (u + \sqrt{u^2 - 1})$$

où

N est le nombre de câbles chargés dans le bloc de fourreaux

ρ_e est la résistivité thermique du sol entourant le bloc de fourreaux (K.m/W)

ρ_c est la résistivité thermique du béton (K.m/W)

$$u = \frac{L_G}{r_b}$$

L_G est la profondeur de pose, au centre du bloc de fourreaux (mm)

D_e is the external diameter of the cable (mm)

When the formula is used for pipe-type cables (see 2.1.4 b), D_e becomes the equivalent diameter of the group of cores as follows:

- two cores: $D_e = 1,65 \times \text{core outside diameter (mm)}$
- three cores: $D_e = 2,15 \times \text{core outside diameter (mm)}$
- four cores: $D_e = 2,50 \times \text{core outside diameter (mm)}$

θ_m is the mean temperature of the medium filling the space between cable and duct. An assumed value has to be used initially and the calculation repeated with a modified value if necessary (°C)

2.2.7.2 Thermal resistance of the duct (or pipe) itself T_4''

The thermal resistance (T_4'') across the wall of a duct shall be calculated from:

$$T_4'' = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln \left(\frac{D_o}{D_d} \right)$$

where

D_o is the outside diameter of the duct (mm)

D_d is the inside diameter of the duct (mm)

ρ_T is the thermal resistivity of duct material (K.m/W)

The value of ρ_T can be taken as zero for metal ducts, for other materials, see table 1.

2.2.7.3 External thermal resistance of the duct (or pipe) T_4'''

This shall be determined for single-way duct(s) not embedded in concrete in the same way as for cable, using the appropriate formulae from 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3 or 2.2.4, and the external radius of the duct or pipe including any protective covering thereon, replacing the external radius of the cable. When the ducts are embedded in concrete, the calculation of the thermal resistance outside the ducts is first of all made assuming a uniform medium outside the ducts having a thermal resistivity equal to the concrete. A correction is then added algebraically to take account of the difference, if any, between the thermal resistivities of concrete and soil for that part of the thermal circuit exterior to the duct bank.

The correction to the thermal resistance is given by:

$$\frac{N}{2\pi} (\rho_e - \rho_c) \ln (u + \sqrt{u^2 - 1})$$

where

N is the number of loaded cables in the duct bank

ρ_e is the thermal resistivity of earth around bank (K.m/W)

ρ_c is the thermal resistivity of concrete (K.m/W)

$$u = \frac{L_G}{r_b}$$

L_G is the depth of laying to centre of duct bank (mm)

r_b est la rayon équivalent au bloc de béton (mm)
donné par:

$$\ln r_b = \frac{1}{2} \frac{x}{y} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \frac{x}{2}$$

Les quantités x et y sont respectivement la plus faible et la plus grande des dimensions du bloc de fourreaux, indépendamment de sa position, en millimètres.

Cette formule n'est applicable que lorsque $\frac{y}{x}$ est inférieur à 3.

3 Calcul numérique des quantités indiquées sous forme de graphiques

3.1 Généralités

Cet article donne les formules et méthodes appropriées au calcul numérique des quantités indiquées aux figures de 2 à 6 et la procédure pour calculer $\Delta\theta_s$ au moyen de la figure 8. La méthode utilisée est une méthode par approximation avec équations algébriques, suivie d'une interpolation quadratique ou linéaire le cas échéant. Le pourcentage d'erreur maximal avant l'interpolation est indiqué dans chaque cas.

3.1.1 Facteur géométrique G pour les câbles bipolaires à ceinture à âmes circulaires (figure 2)

Soit $X = t_1/d_c$

$Y = (2t_1/t) - 1$

et $G = MG_s$

où

$$M = \text{formule Mie} = \ln \left[\frac{1 - \alpha\beta + [(1 - \alpha^2)(1 - \beta^2)]^{0,5}}{\alpha - \beta} \right]$$

$$\alpha = \frac{1}{\left[1 + \frac{X}{1 + X/(1 + Y)} \right]^2}$$

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\frac{X}{1 + Y} - \frac{1}{2}}{\frac{X}{1 + Y} + \frac{3}{2}}$$

$G_s = G_s(X, Y)$, c'est-à-dire est une fonction de X et Y .

Calculer les trois quantités $G_s(X, 0)$, $G_s(X, 0,5)$ et $G_s(X, 1)$

où

$$G_s(X, 0) = 1,060\,19 - 0,067\,1778\,X + 0,017\,9521\,X^2$$

$$G_s(X, 0,5) = 1,067\,98 - 0,065\,1648\,X + 0,015\,8125\,X^2$$

$$G_s(X, 1) = 1,067\,00 - 0,055\,7156\,X + 0,012\,3212\,X^2$$

r_b is the equivalent radius of concrete bank (mm)
given by:

$$\ln r_b = \frac{1}{2} \frac{x}{y} \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \ln \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) + \ln \frac{x}{2}$$

The quantities x and y are the shorter and longer sides, respectively, of the duct bank section irrespective of its position, in millimetres.

This formula is only valid for ratios of $\frac{y}{x}$ less than 3.

3 Digital calculation of quantities given graphically

3.1 General

This clause gives formulae and methods suitable for digital calculation for those quantities given in figures 2 to 6 and the procedure for calculating $\Delta\theta_s$ by means of figure 8. The method used is approximation by algebraic expressions, followed by quadratic or linear interpolation where necessary. The maximum percentage error prior to interpolation is given for each case.

3.1.1 Geometric factor G for two-core belted cables with circular conductors (figure 2)

Denote $X = t_1/d_c$

$$Y = (2t_1/t) - 1$$

Then: $G = MG_s$

Where:

$$M = \text{Mie formula} = \ln \left[\frac{1 - \alpha\beta + [(1 - \alpha^2)(1 - \beta^2)]^{0.5}}{\alpha - \beta} \right]$$

$$\alpha = \frac{1}{\left[1 + \frac{X}{1 + X/(1 + Y)} \right]^2}$$

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\frac{X}{1 + Y} - \frac{1}{2}}{\frac{X}{1 + Y} + \frac{3}{2}}$$

$G_s = G_s(X, Y)$, i.e., is a function of both X and Y .

Calculate the three quantities $G_s(X, 0)$, $G_s(X, 0.5)$ and $G_s(X, 1)$

where:

$$G_s(X, 0) = 1,060\,19 - 0,067\,1778\,X + 0,017\,9521\,X^2$$

$$G_s(X, 0.5) = 1,067\,98 - 0,065\,1648\,X + 0,015\,8125\,X^2$$

$$G_s(X, 1) = 1,067\,00 - 0,055\,7156\,X + 0,012\,3212\,X^2$$

$G_s(X, Y)$ peut être obtenu par interpolation quadratique en utilisant la formule suivante:

$$G_s(X, Y) = G_s(X, 0) + Y [-3 G_s(X, 0) + 4 G_s(X, 0,5) - G_s(X, 1)] + Y^2 [2 G_s(X, 0) - 4 G_s(X, 0,5) + 2 G_s(X, 1)]$$

Le pourcentage d'erreur maximal dans le calcul de $G_s(X, 0)$, $G_s(X, 0,5)$ et $G_s(X, 1)$ est inférieur à 0,5 % par rapport aux valeurs graphiques correspondantes.

3.1.2 Facteur géométrique G pour les câbles tripolaires à ceinture à âmes circulaires (figure 3)

Soit $X = t_1/d_c$

$Y = (2t_1/t) - 1$

et $G = MG_s$

où

$$M = \text{formule Mie} = \ln \left[\frac{1 - \alpha\beta + [(1 - \alpha^2)(1 - \beta^2)]^{0,5}}{\alpha - \beta} \right]$$

$$\alpha = \frac{1}{\left[1 + \frac{2X}{1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{2X}{1+Y} \right)} \right]^3}$$

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{2X}{1+Y} \right) - 3}{\frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{2X}{1+Y} \right) + 3}$$

$G_s = G_s(X, Y)$, c'est-à-dire est une fonction de X et Y .

Calculer les trois quantités $G_s(X, 0)$, $G_s(X, 0,5)$ et $G_s(X, 1)$

où

$$G_s(X, 0) = 1,094\,14 - 0,094\,4045 X + 0,023\,4464 X^2$$

$$G_s(X, 0,5) = 1,096\,05 - 0,080\,1857 X + 0,017\,6917 X^2$$

$$G_s(X, 1) = 1,098\,31 - 0,072\,0631 X + 0,014\,5909 X^2$$

et obtenir $G_s(X, Y)$ par interpolation quadratique entre les trois valeurs calculées.

Cela peut s'effectuer en substituant $G_s(X, 0)$, $G_s(X, 0,5)$ et $G_s(X, 1)$ dans la formule suivante:

$$G_s(X, Y) = G_s(X, 0) + Y [-3 G_s(X, 0) + 4 G_s(X, 0,5) - G_s(X, 1)] + Y^2 [2 G_s(X, 0) - 4 G_s(X, 0,5) + 2 G_s(X, 1)]$$

Le pourcentage d'erreur maximal dans le calcul de $G_s(X, 0)$, $G_s(X, 0,5)$ et $G_s(X, 1)$ est inférieur à 0,5 % par rapport aux valeurs graphiques correspondantes.

$G_s(X, Y)$ may be obtained by quadratic interpolation using the following formula:

$$G_s(X, Y) = G_s(X, 0) + Y [-3 G_s(X, 0) + 4 G_s(X, 0,5) - G_s(X, 1)] \\ + Y^2 [2 G_s(X, 0) - 4 G_s(X, 0,5) + 2 G_s(X, 1)]$$

The maximum percentage error in the calculation of $G_s(X, 0)$, $G_s(X, 0,5)$ and $G_s(X, 1)$ is less than 0,5 % compared with corresponding graphical values.

3.1.2 Geometric factor G for three-core belted cables with circular conductors (figure 3)

Denote $X = t_1/d_c$

$$Y = (2t_1/t) - 1$$

and $G = MG_s$

where

$$M = \text{Mie formula} = \ln \left[\frac{1 - \alpha\beta + [(1 - \alpha^2)(1 - \beta^2)]^{0,5}}{\alpha - \beta} \right]$$

$$\alpha = \frac{1}{\left[1 + \frac{2X}{1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{2X}{1+Y} \right)} \right]^3}$$

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{2X}{1+Y} \right) - 3}{\frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{2X}{1+Y} \right) + 3}$$

$G_s = G_s(X, Y)$, i.e., is a function of both X and Y .

Calculate the three quantities $G_s(X, 0)$, $G_s(X, 0,5)$ and $G_s(X, 1)$

where

$$G_s(X, 0) = 1,094\,14 - 0,094\,4045 X + 0,023\,4464 X^2$$

$$G_s(X, 0,5) = 1,096\,05 - 0,080\,1857 X + 0,017\,6917 X^2$$

$$G_s(X, 1) = 1,098\,31 - 0,072\,0631 X + 0,014\,5909 X^2$$

and obtain $G_s(X, Y)$ by quadratic interpolation between the three calculated values.

This may be done by substituting $G_s(X, 0)$, $G_s(X, 0,5)$ and $G_s(X, 1)$ in the following formula:

$$G_s(X, Y) = G_s(X, 0) + Y [-3 G_s(X, 0) + 4 G_s(X, 0,5) - G_s(X, 1)] \\ + Y^2 [2 G_s(X, 0) - 4 G_s(X, 0,5) + 2 G_s(X, 1)]$$

The maximum percentage error in the calculation of $G_s(X, 0)$, $G_s(X, 0,5)$ and $G_s(X, 1)$ is less than 0,5 % compared with corresponding graphical values.

3.1.3 *Résistance thermique des câbles tripolaires métallisés à ceinture à âmes circulaires rapportée à celle des câbles correspondants non métallisés (figure 4)*

$$\text{Soit } X = (\delta_1 \rho_T) / (d_c \rho_m)$$

$$Y = t_1 / d_c$$

Le facteur de métallisation K est une fonction de X et Y . Calculer les trois quantités $K(X, 0,2)$, $K(X, 0,6)$ et $K(X, 1)$ avec les formules suivantes selon que $0 < X \leq 6$ ou $6 < X \leq 25$.

$$0 < X \leq 6 \quad K(X, 0,2) = 0,998\,095 - 0,123\,369\,X + 0,020\,2620\,X^2 - 0,001\,416\,67\,X^3$$

$$K(X, 0,6) = 0,999\,452 - 0,089\,6589\,X + 0,012\,0239\,X^2 - 0,000\,722\,228\,X^3$$

$$K(X, 1) = 0,997\,976 - 0,052\,8571\,X + 0,003\,452\,38\,X^2$$

$$6 < X \leq 25 \quad K(X, 0,2) = 0,824\,160 - 0,028\,8721\,X + 0,000\,928\,511\,X^2 - 0,000\,013\,7121\,X^3$$

$$K(X, 0,6) = 0,853\,348 - 0,024\,6874\,X + 0,000\,966\,967\,X^2 - 0,000\,015\,9967\,X^3$$

$$K(X, 1) = 0,883\,287 - 0,015\,3782\,X + 0,000\,260\,292\,X^2$$

$K(X, Y)$ est ensuite obtenu par interpolation quadratique entre les trois valeurs calculées. Cela peut s'effectuer par substitution dans la formule suivante:

$$K(X, Y) = K(X, 0,2) + Z \left[-3 K(X, 0,2) + 4 K(X, 0,6) - K(X, 1) \right] + Z^2 \left[2 K(X, 0,2) - 4 K(X, 0,6) + 2 K(X, 1) \right]$$

$$\text{où } Z = 1,25\,Y - 0,25$$

Le pourcentage d'erreur maximal dans le calcul du facteur de correction sectoral est inférieur à 0,5 % par rapport aux valeurs graphiques indiquées.

3.1.4 *Résistance thermique des câbles tripolaires métallisés à âmes sectoriales rapportée à celle des câbles analogues non métallisés (figure 5)*

$$\text{Soit } X = (\delta_1 \rho_T) / (d_x \rho_m)$$

$$Y = t_1 / d_x$$

Le facteur de métallisation K est une fonction de X et Y . Calculer les trois quantités $K(X, 0,2)$, $K(X, 0,6)$ et $K(X, 1)$ avec les formules suivantes selon que $0 < X \leq 3$, $3 < X \leq 6$, ou $6 < X \leq 25$.

$$0 < X \leq 3 \quad K(X, 0,2) = 1,001\,69 - 0,0945\,X + 0,007\,523\,81\,X^2$$

$$K(X, 0,6) = 1,001\,71 - 0,076\,9286\,X + 0,005\,357\,14\,X^2$$

$$K(X, 1) = K(X, 0,6)$$

$$3 < X \leq 6 \quad K(X, 0,2) \text{ et } K(X, 0,6) \text{ sont donnés par la même formule que pour } 0 < X \leq 3$$

$$K(X, 1) = 1,001\,17 - 0,075\,2143\,X + 0,005\,333\,34\,X^2$$

3.1.3 Thermal resistance of three-core screened cables with circular conductors compared to that of a corresponding unscreened cable (figure 4)

$$\text{Denote } X = (\delta_1 \rho_T) / (d_c \rho_m)$$

$$Y = t_1 / d_c$$

The screening factor K is a function of both X and Y . Calculate the three quantities $K(X, 0,2)$, $K(X, 0,6)$ and $K(X, 1)$ from the following formulae according to whether $0 < X \leq 6$ or $6 < X \leq 25$.

$$0 < X \leq 6 \quad K(X, 0,2) = 0,998\,095 - 0,123\,369 X + 0,020\,2620 X^2 - 0,001\,416\,67 X^3$$

$$K(X, 0,6) = 0,999\,452 - 0,089\,6589 X + 0,012\,0239 X^2 - 0,000\,722\,228 X^3$$

$$K(X, 1) = 0,997\,976 - 0,052\,8571 X + 0,003\,452\,38 X^2$$

$$0 < X \leq 25 \quad K(X, 0,2) = 0,824\,160 - 0,028\,8721 X + 0,000\,928\,511 X^2 - 0,000\,013\,7121 X^3$$

$$K(X, 0,6) = 0,853\,348 - 0,024\,6874 X + 0,000\,966\,967 X^2 - 0,000\,015\,9967 X^3$$

$$K(X, 1) = 0,883\,287 - 0,015\,3782 X + 0,000\,260\,292 X^2$$

$K(X, Y)$ is then obtained by quadratic interpolation between the three calculated values. This may be done by substitution in the following formula:

$$K(X, Y) = K(X, 0,2) + Z [-3 K(X, 0,2) + 4 K(X, 0,6) - K(X, 1)] + Z^2 [2 K(X, 0,2) - 4 K(X, 0,6) + 2 K(X, 1)]$$

$$\text{where } Z = 1,25 Y - 0,25$$

The maximum percentage error in the calculation of the sector correction factor is less than 0,5 % compared with graphical values.

3.1.4 Thermal resistance of three-core screened cables with sector-shaped conductors compared to that of a corresponding unscreened cable (figure 5)

$$\text{Denote } X = (\delta_1 \rho_T) / (d_x \rho_m)$$

$$Y = t_1 / d_x$$

The screening factor K is a function of both X and Y . Calculate the three quantities $K(X, 0,2)$, $K(X, 0,6)$ and $K(X, 1)$ from the following formulae according to whether $0 < X \leq 3$, $3 < X \leq 6$, or $6 < X \leq 25$.

$$0 < X \leq 3 \quad \begin{aligned} K(X, 0,2) &= 1,001\,69 - 0,0945 X + 0,007\,523\,81 X^2 \\ K(X, 0,6) &= 1,001\,71 - 0,076\,9286 X + 0,005\,357\,14 X^2 \\ K(X, 1) &= K(X, 0,6) \end{aligned}$$

$$3 < X \leq 6 \quad \begin{aligned} K(X, 0,2) \text{ and } K(X, 0,6) &\text{ are given by the same formula as for } 0 < X \leq 3 \\ K(X, 1) &= 1,001\,17 - 0,075\,2143 X + 0,005\,333\,34 X^2 \end{aligned}$$

$$6 < X \leq 25 \quad K(X, 0,2) = 0,811\,646 - 0,023\,8413\,X \\ + 0,000\,994\,933\,X^2 - 0,000\,015\,5152\,X^3$$

$$K(X, 0,6) = 0,833\,598 - 0,022\,31\,55\,X \\ + 0,000\,978\,956\,X^2 - 0,000\,015\,8311\,X^3$$

$$K(X, 1) = 0,842\,875 - 0,022\,7255\,X \\ + 0,001\,058\,25\,X^2 - 0,000\,017\,7427\,X^3$$

Lorsque $0 < X \leq 3$ et $0,2 < Y \leq 0,6$, $K(X, Y)$ est obtenu par interpolation linéaire entre $K(X, 0,2)$ et $K(X, 0,6)$ comme suit:

$$K(X, Y) = K(X, 0,2) + 2,5 (Y - 0,2) [K(X, 0,6) - K(X, 0,2)]$$

Lorsque $3 < X < 25$, $K(X, Y)$ est alors obtenu par interpolation quadratique entre les trois valeurs calculées. La formule correspondante est la suivante:

$$K(X, Y) = K(X, 0,2) + Z [-3 K(X, 0,2) + 4 K(X, 0,6) - K(X, 1)] \\ + Z^2 [2 K(X, 0,2) - 4 K(X, 0,6) + 2 K(X, 1)]$$

$$\text{où } Z = 1,25 Y - 0,25$$

Le pourcentage d'erreur maximal dans le facteur de correction sectoral est inférieur à 1 % par rapport aux valeurs graphiques.

3.1.5 Facteur géométrique $\bar{G}$ pour la résistance thermique des bourrages et revêtements des câbles triplombs ou sous gaines d'aluminium individuelles (figure 6)

Indiquer X = épaisseur du matériau entre gaines et armure exprimée en fraction du diamètre extérieur de la gaine.

La courbe inférieure est donnée par:

$$0 < X \leq 0,03 \quad \bar{G} = 2\pi (0,000\,202\,380 + 2,032\,14\,X - 21,6667\,X^2) \\ 0,03 < X \leq 0,15 \quad \bar{G} = 2\pi (0,012\,6529 + 1,101\,X - 4,561\,04\,X^2 + 11,5093\,X^3)$$

Le pourcentage d'erreur maximal dans le calcul de $\bar{G}$ est inférieur à 1 %.

La courbe supérieure est donnée par:

$$0 < X \leq 0,03 \quad \bar{G} = 2\pi (0,000\,226\,19 + 2,114\,29\,X - 20,4762\,X^2) \\ 0,03 < X \leq 0,15 \quad \bar{G} = 2\pi (0,014\,2108 + 1,175\,33\,X - 4,497\,37\,X^2 + 10,6352\,X^3)$$

Le pourcentage d'erreur maximal dans le calcul de $\bar{G}$ est inférieur à 1 %.

3.2 Calcul graphique de $\Delta\theta_s$ (figure 8)

On procède alors ainsi:

a) On calcule la valeur de K_A en utilisant la formule:

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

$$6 < X \leq 25 \quad K(X, 0,2) = 0,811\,646 - 0,023\,8413\,X \\ + 0,000\,994\,933\,X^2 - 0,000\,015\,5152\,X^3$$

$$K(X, 0,6) = 0,833\,598 - 0,022\,31\,55\,X \\ + 0,000\,978\,956\,X^2 - 0,000\,015\,8311\,X^3$$

$$K(X, 1) = 0,842\,875 - 0,022\,7255\,X \\ + 0,001\,058\,25\,X^2 - 0,000\,017\,7427\,X^3$$

For $0 < X \leq 3$ and $0,2 < Y \leq 0,6$, $K(X, Y)$ is obtained by linear interpolation between $K(X, 0,2)$ and $K(X, 0,6)$ as follows:

$$K(X, Y) = K(X, 0,2) + 2,5(Y - 0,2)[K(X, 0,6) - K(X, 0,2)]$$

For $3 < X < 25$, $K(X, Y)$ is obtained by quadratic interpolation between the three calculated values. The relevant formula is:

$$K(X, Y) = K(X, 0,2) + Z[-3K(X, 0,2) + 4K(X, 0,6) - K(X, 1)] \\ + Z^2[2K(X, 0,2) - 4K(X, 0,6) + 2K(X, 1)]$$

$$\text{where } Z = 1,25Y - 0,25$$

The maximum percentage error in the calculation of the sector correction factor is less than 1 % compared with graphical values.

3.1.5 Curve for $\bar{G}$ for obtaining the thermal resistance of the filling material between the sheaths and armour of SL and SA type cables (figure 6)

Denote X = thickness of material between sheaths and armour expressed as a fraction of the outer diameter of the sheath.

The lower curve is given by:

$$0 < X \leq 0,03 \quad \bar{G} = 2\pi(0,000\,202\,380 + 2,032\,14\,X - 21,6667\,X^2) \\ 0,03 < X \leq 0,15 \quad \bar{G} = 2\pi(0,012\,6529 + 1,101\,X - 4,561\,04\,X^2 + 11,5093\,X^3)$$

The maximum percentage error in the calculation of $\bar{G}$ is less than 1 %.

The upper curve is given below:

$$0 < X \leq 0,03 \quad \bar{G} = 2\pi(0,000\,226\,19 + 2,114\,29\,X - 20,4762\,X^2) \\ 0,03 < X \leq 0,15 \quad \bar{G} = 2\pi(0,014\,2108 + 1,175\,33\,X - 4,497\,37\,X^2 + 10,6352\,X^3)$$

The maximum percentage error in the calculation of $\bar{G}$ is less than 1 %.

3.2 Calculation of $\Delta\theta_s$ by means of a diagram (figure 8)

The procedure is as follows:

a) Calculate the value of K_A using the formula:

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

b) On trace sur la figure 8 la droite ayant l'ordonnée calculée ci-dessus et on repère son intersection avec la courbe:

$$\Delta\theta + \Delta\theta_d + \Delta\theta_{ds} = \text{constante de valeur convenable}$$

c) L'abscisse correspondant au point d'intersection a pour valeur:

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

1) *Câbles protégés des rayons solaires*

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

Si les pertes diélectriques sont négligées, $\Delta\theta_d = 0$
 $\Delta\theta_{ds} = 0$

2) *Câbles soumis au rayonnement solaire*

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

Si les pertes diélectriques sont négligées, $\Delta\theta_d = 0$

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

- b) Locate the line on figure 8 with the value of a) above as ordinate, and then locate the point on this line for the appropriate value of:

$$\Delta\theta + \Delta\theta_d + \Delta\theta_{ds} = \text{constant}$$

- c) Read off the abscissa of this point to obtain:

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

1) *Cables protected from solar radiation*

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

If the dielectric losses are neglected, $\Delta\theta_d = 0$
 $\Delta\theta_{ds} = 0$

2) *Cables subjected to solar radiation*

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

If the dielectric losses are neglected, $\Delta\theta_d = 0$

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

Tableau 1 – Résistivité thermique des matériaux

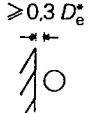
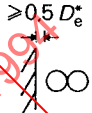
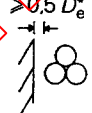
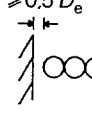
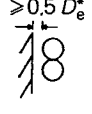
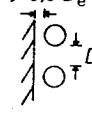
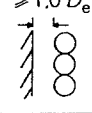
Matériau	Résistivité thermique (ρ_T) K.m/W
<i>Matériaux d'isolation*</i>	
Papier dans les câbles de type «solid»	6,0
Papier dans les câbles à huile fluide	5,0
Papier dans les câbles à pression externe de gaz	5,5
Papier dans les câbles à pression interne de gaz:	
a) préimprégné	5,5
b) imprégné à masse	6,0
PE	3,5
XLPE	3,5
Polychlorure de vinyle:	
câbles jusqu'à 3 kV inclus	5,0
câbles de plus de 3 kV	6,0
EPR:	
câbles jusqu'à 3 kV inclus	3,5
câbles de plus de 3 kV	5,0
Caoutchouc butyle	5,0
Caoutchouc	5,0
<i>Matériaux de revêtement</i>	
Jute composé et matériaux fibreux	6,0
Protection «rubber-sandwich»	6,0
Polychloroprène	5,5
PVC:	
câbles jusqu'à 35 kV inclus	5,0
câbles de plus de 35 kV	6,0
PVC/bitume sur gaines d'aluminium ondulées	6,0
PE	3,5
<i>Matériaux pour installation en fourreaux</i>	
Béton	1,0
Fibre	4,8
Amiante	2,0
Argile cuite	1,2
PVC	6,0
PE	3,5
* Pour les calculs des intensités admissibles, on estime que les écrans semi-conducteurs ont les mêmes propriétés thermiques que les matériaux diélectriques sur lesquels ils sont appliqués. Lorsque des matériaux plastiques ou élastomériques sont utilisés comme revêtements de protection, les résistivités thermiques seront les mêmes que celles indiquées dans le tableau pour la catégorie «matériaux d'isolation».	

Table 1 – Thermal resistivities of materials

Material	Thermal resistivity (ρ_T) K.m/W
<i>Insulating materials*</i>	
Paper insulation in solid type cables	6,0
Paper insulation in oil-filled cables	5,0
Paper insulation in cables with external gas pressure	5,5
Paper insulation in cables with internal gas pressure:	
a) pre-impregnated	5,5
b) mass-impregnated	6,0
PE	3,5
XLPE	3,5
Polyvinyl chloride:	
up to and including 3 kV cables	5,0
greater than 3 kV cables	6,0
EPR:	
up to and including 3 kV cables	3,5
greater than 3 kV cables	5,0
Butyl rubber	5,0
Rubber	5,0
<i>Protective coverings</i>	
Compounded jute and fibrous materials	6,0
Rubber sandwich protection	6,0
Polychloroprene	5,5
PVC:	
up to and including 35 kV cables	5,0
greater than 35 kV cables	6,0
PVC/bitumen on corrugated aluminium sheaths	6,0
PE	3,5
<i>Materials for duct installations</i>	
Concrete	1,0
Fibre	4,8
Asbestos	2,0
Earthenware	1,2
PVC	6,0
PE	3,5
* For the purposes of current rating calculations, the semi-conducting screening materials are assumed to have the same thermal properties as the adjacent dielectric materials. Where plastics or elastomeric materials are used for protective coverings, the thermal resistivities shall be taken to be the same as those for the insulating grades of the materials given in this table.	

Tableau 2 – Valeurs des constantes Z , E et g pour les surfaces noires des câbles à l'air libre

2 a) – Installation sur des consoles non continues, supports ou brides, D_e^* inférieur à 0,15 m

N°	Installation	Z	E	g	Mode
1	Un seul câble ¹⁾	0,21	3,94	0,60	
2	Deux câbles jointifs horizontaux	0,29	2,35	0,50	
3	Trois câbles posés en trèfle	0,96	1,25	0,20	
4	Trois câbles jointifs horizontaux	0,62	1,95	0,25	
5	Deux câbles jointifs, verticaux	1,42	0,86	0,25	
6	Deux câbles espacés de D_e^* , verticaux	0,75	2,80	0,30	
7	Trois câbles jointifs, verticaux	1,61	0,42	0,20	
8	Trois câbles espacés de D_e^* , verticaux	1,31	2,00	0,20	
¹⁾ Les valeurs données pour «un seul câble» s'appliquent aussi à tous les câbles d'un groupe lorsqu'ils sont séparés horizontalement par un intervalle d'au moins 0,75 fois le diamètre extérieur du câble.					

2 b) – Attachés directement à une paroi verticale (D_e^* inférieur à 0,08 m)

9	Un seul câble	1,69	0,63	0,25	
10	Trois câbles posés en trèfle	0,94	0,79	0,20	