

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

(affiliée à l'Organisation Internationale de Normalisation — ISO)

RECOMMANDATION DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC RECOMMENDATION

Publication 287

Première édition — First edition

1969

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

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



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembe
Genève, Suisse

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60287:1969

Withdrawn

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

(affiliée à l'Organisation Internationale de Normalisation — ISO)

RECOMMANDATION DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC RECOMMENDATION

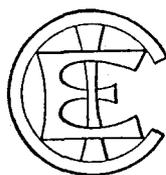
Publication 287

Première édition — First edition

1969

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

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



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

1, rue de Varembe

Genève, Suisse

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
INTRODUCTION	6
Articles	
SECTION UN – GÉNÉRALITÉS	
1. Domaine d'application	6
2. Symboles	8
3. Evaluation de l'intensité de courant alternatif admissible dans les câbles	12
SECTION DEUX – CALCUL DES PERTES	
4. Résistance en courant alternatif du conducteur, R	14
4.1 Résistance en courant continu du conducteur, R'	14
4.2 Facteur d'effet de peau y_s	14
4.3 Facteur d'effet de proximité y_p	14
4.4 Effets de peau et de proximité dans le cas de câbles en tuyau	16
5. Pertes diélectriques W_d	16
5.1 Capacité C	18
6. Pertes dans les gaines λ_1	20
6.1 Câbles unipolaires disposés en trèfle avec gaines court-circuitées aux deux extrémités	20
6.2 Câbles unipolaires disposés en nappe, régulièrement transposés, dont les gaines sont court-circuitées aux deux extrémités	22
6.3 Câbles unipolaires disposés en nappe, non transposés, dont les gaines sont court-circuitées aux deux extrémités	22
6.4 Variation de la distance entre câbles unipolaires avec gaines court-circuitées aux deux extrémités	24
6.5 Influence des gros conducteurs segmentés	24
6.6 Câbles unipolaires avec gaines réunies en un seul point ou transposées	26
6.7 Câbles tripolaires sous gaine commune	26
6.8 Câbles tripolaires armés de feuillards d'acier	28
6.9 Câbles multiplombs armés	28
6.10 Pertes dans les écrans et les gaines de câbles en tuyau d'acier	30
7. Pertes dans les armures et les frettages λ_2	30
7.1 Emploi des formules	30
7.2 Armure ou frettage non magnétique	32
7.3 Armure ou frettage magnétique	32
7.4 Pertes dans les tuyaux d'acier	34
SECTION TROIS – CALCUL DES RÉSISTANCES THERMIQUES	
8. Résistances thermiques des constituants des câbles T_1 , T_2 et T_3	36
8.1 Résistance thermique entre conducteur et gaine T_1	38
8.2 Calcul de la résistance thermique T_2	40
8.3 Calcul de la résistance thermique T_3	42
8.4 Cas des câbles en tuyaux	42
9. Résistivité thermique extérieure T_4	42
9.1 Câbles posés à l'air libre	42
9.2 Un seul câble enterré	44
9.3 Groupe de câbles enterrés (non jointifs)	46
9.4 Câbles enterrés posés en trèfle (jointifs)	48
9.5 Tuyaux enterrés	48
9.6 Câbles en caniveaux enterrés	48
9.7 Câbles en fourreaux ou en tuyaux	50
9.8 Résistance thermique entre câble et fourreau T'_4	50
9.9 Résistance thermique du fourreau T''_4	52
9.10 Résistance thermique extérieure au fourreau (ou tuyau) (câble enterré), T'''_4	52
ANNEXE – Valeurs de référence des températures ambiantes, résistivités thermiques des sols et température maximale admissible au conducteur dans divers pays	54
FIGURES	55

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
INTRODUCTION	7
Clause	
SECTION ONE – GENERAL	
1. Scope	7
2. Symbols	9
3. Permissible a.c. current ratings of cables	13
SECTION TWO – CALCULATION OF LOSSES	
4. A. C. resistance of conductor, R	15
4.1 D. C. resistance of conductor, R'	15
4.2 Skin effect factor y_s	15
4.3 Proximity effect factor y_p	15
4.4 Skin and proximity effects in pipe-type cables	17
5. Dielectric losses W_d	17
5.1 Capacitance C	19
6. Sheath loss factor λ_1	21
6.1 Single-core cables in trefoil formation, sheaths bonded at both ends	21
6.2 Single-core cables in flat formation, with regular transposition, sheaths bonded at both ends	23
6.3 Single-core cables in flat formation, without transposition, sheaths bonded at both ends	23
6.4 Variation in spacing of single-core cables with sheaths bonded at both ends	25
6.5 Effect of large segmental type conductors	25
6.6 Single-core cables, with sheath bonded at a single bond or cross-bonded	27
6.7 Three-core cables with common sheath	29
6.8 Three-core cables with steel tape armour	29
6.9 Cables with each core in a separate lead sheath (S. L. type) and armoured	29
6.10 Pipe-type cables	31
7. Armour and reinforcement losses λ_2	31
7.1 Use of formulae	31
7.2 Non-magnetic armour or reinforcement	33
7.3 Magnetic armour or reinforcement	33
7.4 Losses in steel pipes	35
SECTION THREE – CALCULATION OF THERMAL RESISTANCES	
8. Thermal resistance of the constituent parts of a cable T_1, T_2 and T_3	37
8.1 Thermal resistance between one conductor and sheath T_1	39
8.2 Calculation of thermal resistance, T_2	41
8.3 Calculation of thermal resistance, T_3	43
8.4 Pipe-type cables	43
9. External thermal resistance T_4	43
9.1 Cables laid in free air	43
9.2 Single isolated buried cables	45
9.3 Group of buried cables (not touching)	47
9.4 Buried cables in trefoil (touching)	49
9.5 Buried pipes	49
9.6 Cables in buried throughs	49
9.7 Cables in ducts or pipes	51
9.8 Thermal resistance between cable and duct T'_4	51
9.9 Thermal resistance of the duct itself T''_4	53
9.10 External resistance of the duct (or pipe) T'''_4	53
APPENDIX – Reference ambient temperatures, thermal resistivities of soils and maximum permissible conductor temperature in various countries	54
FIGURES	55

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager cette unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux ne possédant pas encore de règles nationales, lorsqu'ils préparent ces règles, prennent comme base fondamentale de ces règles les recommandations de la CEI dans la mesure où les conditions nationales le permettent.
- 4) On reconnaît qu'il est désirable que l'accord international sur ces questions soit suivi d'un effort pour harmoniser les règles nationales de normalisation avec ces recommandations dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Les Comités nationaux s'engagent à user de leur influence dans ce but.

PRÉFACE

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

Le premier projet était basé sur un rapport de la Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (C.I.G.R.E.) et fut discuté lors de la réunion tenue à Londres en 1965. A la suite de cette réunion, un nouveau projet fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en avril 1967.

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

Australie	Japon
Autriche	Norvège
Belgique	Pays-Bas
Canada	Royaume-Uni
Corée (République de)	Suède
Danemark	Suisse
Etats-Unis d'Amérique	Turquie
Finlande	Union des Républiques Socialistes Soviétiques
France	Yougoslavie
Italie	

Cette recommandation est incomplète. Les détails à insérer dans l'annexe et relatifs aux températures ambiantes et aux températures autorisées des conducteurs ainsi qu'aux résistivités thermiques des sols dans différents pays sont encore à l'étude, ainsi que d'autres additions et modifications, qui sont nécessaires pour inclure les dernières connaissances sur ce sujet. Un complément sera publié par la suite.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

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

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote this international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees having as yet no national rules, when preparing such rules, should use the IEC recommendations as the fundamental basis for these rules in so far as national conditions will permit.
- 4) The desirability is recognized of extending international agreement on these matters through an endeavour to harmonize national standardization rules with these recommendations in so far as national conditions will permit. The National Committees pledge their influence towards that end.

PREFACE

This Recommendation has been prepared by Sub-Committee 20A, High-Voltage Cables, of IEC Technical Committee No. 20, Electric Cables.

The first draft was based on a report of the International Conference on Large Electric Systems (C.I.G.R.E.) and was discussed at a meeting held in London in 1965. As a result of this meeting, a new draft was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in April 1967.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia	Netherlands
Austria	Norway
Belgium	Sweden
Canada	Switzerland
Denmark	Turkey
Finland	Union of Soviet Socialist Republics
France	United Kingdom
Italy	United States of America
Japan	Yugoslavia
Korea (Republic of)	

This Recommendation is incomplete. Details of ambient and permissible conductor temperatures and thermal resistivities of soils in various countries, to be inserted in the Appendix, are still under consideration, together with various other additions and alterations, which are necessary to include the latest knowledge on this subject. A supplement will be published later.

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

INTRODUCTION

Cette recommandation est basée sur l'annexe 1 du rapport C.I.G.R.E. N° 233 de 1964 (Rapport sur les travaux du Comité d'Etudes N° 2 de la C.I.G.R.E. – Câbles à H.T.). Elle a été préparée en vue de recommander une méthode complète de calcul de la capacité de transport des câbles d'énergie selon le critère thermique, indépendamment des considérations relatives à la charge économique.

En fait, bien que les calculs de capacité de transport aient été faits jusqu'à maintenant dans les différents pays suivant les mêmes méthodes générales, il y avait cependant des différences entre certaines des formules utilisées. La méthode de calcul ci-après, qui est soumise à l'accord international, repose sur des informations déjà publiées et sur un choix de formules alliant au mieux la rigueur théorique et la facilité d'application.

Ces formules contiennent des paramètres variant avec la spécification du câble et les matériaux utilisés, et dont les valeurs appropriées sont données dans les tableaux. Certains sont agréés internationalement, comme par exemple les résistances thermiques et la constante diélectrique des matériaux. Dans certains cas, les valeurs indiquées ne sont pas caractéristiques de la qualité des câbles neufs, mais de celle de câbles ayant déjà subi une longue période d'utilisation; l'emploi de ces valeurs doit assurer la reproductibilité des calculs de courant admissible.

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, de la résistance thermique du sol et de la température maximale du conducteur, 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, cela peut entraîner 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 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 des 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; ces renseignements seront compris dans cette recommandation sous forme d'annexe.

SECTION UN – GÉNÉRALITÉS

1. Domaine d'application

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

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

INTRODUCTION

This Recommendation is based on Appendix 1 of C.I.G.R.E. Report No. 233, 1964 (Report on the work of C.I.G.R.E. Study Committee No. 2 on High-voltage Cables). It has been prepared with a view to recommending a complete method of calculation of the current rating of power cables on the basis of the thermal criterion, independent of considerations of economic loading.

In fact, while the calculations of current rating have so far been made in the various countries in accordance with the same general methods, there were differences between some of the formulae used. The following method of calculation, put forward for international agreement, is based on information previously published and is a selection from the formulae put forward, those being selected which best combined compliance with theory and ease of application.

These formulae contain quantities which vary with cable design and materials used and appropriate values are given in the tables; these are either internationally agreed, for example, electrical resistivities and resistance temperature coefficients or those which are generally accepted in practice, for example, thermal resistivities and permittivities of materials. In some cases, the values given are not characteristic of the quality of new cables, but are considered to be representative even after a long period of use, and should be used in order to ensure that uniform calculations of the current ratings can be made.

Quantities related to the operating conditions of cables are liable to vary considerably from one country to another. For instance, with respect to ambient temperature, soil thermal resistivity, and maximum conductor temperature, 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; this information will be included in this Recommendation in the form of an Appendix.

SECTION ONE – GENERAL

1. Scope

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

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 se rapportant à la marge de sécurité en service (par exemple température maximale du conducteur).

2. Symboles

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

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

A	= volume de l'armure ou du frettage par centimètre de câble	cm ³ /cm
C	= capacité par phase	μF/cm
D_a	= diamètre intérieur de l'armure	cm
D_a'	= diamètre extérieur de l'armure	cm
D_d	= diamètre intérieur du fourreau	cm
D_e	= diamètre extérieur du câble ou diamètre équivalent d'un groupe de conducteurs isolés pour un câble en tuyau	cm
D_i	= diamètre sur isolant	cm
D_o	= diamètre extérieur du fourreau	cm
D_s	= diamètre extérieur de la gaine métallique	cm
E_o	= tension efficace entre conducteur et écran ou gaine	V
G	= facteur géométrique pour câbles à ceintures	
\bar{G}	= facteur géométrique des câbles triplombs ou sous gaine d'aluminium individuelle	
I	= intensité du courant dans un conducteur	A
K	= facteur d'écran pour les câbles métallisés	
K_{au}	= résistivité thermique du ruban de métal formant le canal d'huile	deg C cm/W
L	= profondeur de pose mesurée au centre du câble	cm
L_G	= distance de la surface du sol au centre du bloc de fourreaux	cm
R	= résistance électrique en courant alternatif du conducteur à sa température maximale de service	ohm/cm
R_A	= résistance de l'armure	ohm/cm
R_g	= résistance de la gaine	ohm/cm
R'	= résistance électrique en courant continu du conducteur à la température maximale de fonctionnement	ohm/cm
R_o	= résistance électrique du conducteur en courant continu à 20 °C	ohm/cm
S	= section droite du conducteur	cm ²
T_1	= résistance thermique par phase entre conducteur et gaine métallique ou écran	deg C cm/W
T_2	= résistance thermique entre gaine métallique ou écran et armure	deg C cm/W
T_3	= résistance thermique du revêtement externe	deg C cm/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)	deg C cm/W
T_{au}	= résistance thermique des canaux d'huile	deg C cm/W
T_{il}	= résistance thermique des bourrages et de l'écran entre diélectrique et gaine	deg C cm/W
W	= pertes dissipées par unité de longueur	W/cm
W_d	= pertes diélectriques par unité de longueur et par phase	W/cm
W_k	= pertes dissipées par le câble k	W/cm
X	= réactance de la gaine quand les câbles sont disposés en trèfle	ohm/cm
X_1	= réactance de la gaine quand les câbles sont disposés en nappe	ohm/cm

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

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

2. Symbols

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

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

A	= volume per centimetre of cable, of the armour or reinforcement	cm ³ /cm
C	= capacitance per core	μF/cm
D_a	= internal diameter of armour	cm
$D_{a'}$	= external diameter of armour	cm
D_d	= internal diameter of duct	cm
D_e	= external diameter of cable, or equivalent diameter of a group of cores in pipe-type cable	cm
D_i	= diameter over insulation	cm
D_o	= outside diameter of duct	cm
D_s	= external diameter of metal sheath	cm
E_o	= voltage between conductor and screen or sheath	V
G	= geometric factor for belted cables	
\bar{G}	= geometric factor for S.L. and S.A. type cables	
I	= current in one conductor (r.m.s. value)	A
K	= screening factor for screened cables	
K_{du}	= thermal resistivity of the metal tape forming the oil duct	deg C cm/W
L	= depth of laying, to cable axis	cm
L_G	= distance from the soil surface to the centre of a duct block	cm
R	= alternating current resistance of conductor at its maximum operating temperature	ohm/cm
R_A	= resistance of armour	ohm/cm
R_S	= resistance of sheath	ohm/cm
R'	= d.c. resistance of conductor at maximum operating temperature	ohm/cm
R_o	= d.c. resistance of conductor at 20 °C	ohm/cm
S	= conductor cross-section	cm ²
T_1	= thermal resistance per core between conductor and sheath	deg C cm/W
T_2	= thermal resistance between sheath and armour	deg C cm/W
T_3	= thermal resistance of external serving	deg C cm/W
T_4	= thermal resistance of surrounding medium (ratio of cable surface temperature-rise above ambient to the losses per unit length)	deg C cm/W
T_{du}	= thermal resistance of the oil ducts	deg C cm/W
T_{fi}	= thermal resistance of the filling material and screen between dielectric and sheath	deg C cm/W
W	= losses dissipated per unit length	W/cm
W_d	= dielectric losses per unit length per phase	W/cm
W_k	= losses dissipated by cable k	W/cm
X	= reactance of sheath when cables are in trefoil	ohm/cm
X_1	= reactance of sheath when cables are in flat formation	ohm/cm

X_m	= réactance mutuelle entre la gaine d'un câble et les conducteurs des deux autres lorsque les câbles sont posés en nappe	ohm/cm
a	= largeur du ruban métallique formant le canal d'huile dans les câbles à huile fluide	cm
b	= distance entre spires successives du ruban métallique formant le canal d'huile dans les câbles à huile fluide	cm
c	= distance entre les axes des conducteurs et l'axe du câble (= $0,55 r_1 + 0,29 t$ pour les conducteurs sectoriaux)	cm
d	= diamètre moyen de la gaine	cm
d_A	= diamètre moyen de l'armure	cm
d_b	= diamètre extérieur de la ceinture isolante	cm
d_c	= diamètre extérieur du conducteur	cm
d_c'	= diamètre extérieur du conducteur massif rond, ayant le même canal central qu'un conducteur creux	cm
d_d	= diamètre interne du tuyau	cm
d_i	= diamètre intérieur d'un conducteur creux	cm
d_M	= plus grand diamètre d'écran ou de gaine d'un conducteur ovale	cm
d_m	= plus petit diamètre d'écran ou de gaine d'un conducteur ovale	cm
d_x	= diamètre du conducteur circulaire câblé ayant la même section que le conducteur sectorial	cm
e	= épaisseur du ruban métallique constituant le canal d'huile dans les câbles à huile fluide	cm
f	= fréquence	Hz
h	= coefficient de dissipation de chaleur	$W/cm^2 (deg C)^{5/4}$
k	= facteur utilisé pour le calcul des pertes par hystérésis dans les armures ou frettages	
k_p	= facteur utilisé dans le calcul de x_p (effet de proximité)	
k_s	= facteur utilisé dans le calcul de x_s (effet de peau)	
k_t	= facteur correctif relatif aux effets de peau et de proximité dans les câbles en tuyau	
n	= nombre de conducteurs d'un câble	
r_e	= rayon extérieur du câble	cm
r_1	= rayon du cercle circonscrit aux trois conducteurs sectoriaux dans un câble tripolaire	cm
r_l	= dans le paragraphe 8.1.4, rayon extérieur de chaque écran jointif dans un câble tripolaire à huile fluide	cm
s	= distance entre axes de conducteurs	cm
s_1	= distance entre axes de deux câbles adjacents dans une nappe horizontale de trois câbles non jointifs	cm
t	= épaisseur d'isolant entre conducteurs	cm
t_1	= épaisseur d'isolant entre conducteur et gaine	cm
$u = \frac{L}{r_e}$	= dans le paragraphe 9.2	
$u = \frac{L_G}{k_b}$	= dans le paragraphe 9.10	
x_p	= argument de la fonction de Bessel, utilisé dans le calcul de l'effet de proximité	
x_s	= argument de la fonction de Bessel, utilisé dans le calcul de l'effet de peau	
x, y	= côtés d'un bloc de fourreaux ($y > x$)	cm
y_p	= facteur d'effet de proximité	} article 4
y_s	= facteur d'effet de peau	
α_{20}	= coefficient de variation de la résistance électrique avec la température à 20 °C, par deg C	
δ	= épaisseur équivalente de l'armure ou du frettage	cm
δ_1	= épaisseur de l'écran métallique des câbles métallisés	cm
$tg \delta$ ($\tan \delta$)	= facteur de pertes de l'isolant	
ϵ	= permittivité relative de l'isolant	
λ_1, λ_2	= rapport des pertes dans les gaines métalliques (1) et armures (2) aux pertes totales des conducteurs (ou pertes dans une gaine ou armure aux pertes dans un conducteur)	
λ_1'	= rapport des pertes dans une gaine produites par les courants de circulation dans la gaine aux pertes dans un conducteur	
λ_1''	= rapport des pertes dans une gaine produites par les courants de Foucault aux pertes dans un conducteur	
μ	= perméabilité magnétique relative du matériau constituant l'armure	
ρ	= résistivité du conducteur à 20 °C	ohm. cm
ρ_e	= résistivité thermique du sol entourant un bloc de fourreaux	deg C cm/W

X_m	= mutual reactance between the sheath of one cable and the conductors of the other two when cables are in flat formation	ohm/cm
a	= width of metal tape forming the oil duct in oil-filled cables	cm
b	= gap between successive turns of metal tape forming the oil duct in oil-filled cables	cm
c	= distance between the axes of conductors and the axis of the cable (= $0.55 r_1 + 0.29 t$ for sector-shaped conductors)	cm
d	= mean diameter of sheath	cm
d_A	= mean diameter of armour	cm
d_a	= external diameter of belt insulation	cm
d_c	= external diameter of conductor	cm
d_c'	= external diameter of equivalent round solid conductor, having the same central duct as a hollow conductor	cm
d_d	= internal diameter of pipe	cm
d_i	= internal diameter of hollow conductor	cm
d_M	= major diameter of screen or sheath of an oval conductor	cm
d_m	= minor diameter of screen or sheath of an oval conductor	cm
d_x	= diameter of circular stranded conductor having the same cross-sectional area as the shaped one	cm
e	= thickness of metal tape forming the oil duct in oil-filled cables	cm
f	= system frequency	Hz
h	= heat dissipation coefficient	W/cm ² (deg C) ^{5/4}
k	= factor used in the calculation of hysteresis losses in armour or reinforcement	
k_p	= factor used in calculating x_p (proximity effect)	
k_s	= factor used in calculating x_s (skin effect)	
k_t	= correction factor for skin and proximity effects of pipe-type cables	
n	= number of conductors in a cable	
r_e	= external radius of cable	cm
r_1	= circumscribing radius of three-sector shaped conductors in a 3-core cable	cm
r_1	= in Sub-clause 8.1.4, external radius of each touching screen in oil-filled cables	cm
s	= axial separation of conductors	cm
s_1	= axial separation of two adjacent cables in a horizontal group of three, not touching	cm
t	= insulation thickness between conductors	cm
t_1	= insulation thickness between conductors and sheath	cm
$u = \frac{L}{r_e}$	= in Sub-clause 9.2	
$u = \frac{L_G}{r_b}$	= in Sub-clause 9.10	
x_p	= argument of a Bessel function used to calculate proximity effect	
x_s	= argument of a Bessel function used to calculate skin effect	
x, y	= sides of a duct block ($y > x$)	cm
y_p	= proximity effect factor	} Clause 4
y_s	= skin effect factor	
α_{20}	= temperature coefficient of electrical resistivity at 20 °C, per deg C	
δ	= equivalent thickness of armour or reinforcement	cm
δ_1	= thickness of metallic screens on screened type cables	cm
$\tan \delta$ (tg δ)	= loss factor of insulation	
ϵ	= relative permittivity of insulation	
λ_1, λ_2	= ratio of the losses in metallic sheaths and armour respectively to the total conductor losses. (or losses in one sheath or armour to the losses on one conductor)	
λ_1'	= ratio of the losses in one sheath caused by circulating currents in the sheath to the losses in one conductor	
λ_1''	= ratio of the losses in one sheath caused by eddy currents to the losses in one conductor	
μ	= relative magnetic permeability of armour material	
ρ	= conductor resistivity at 20 °C	ohm. cm
ρ_e	= thermal resistivity of earth surrounding a duct bank	deg C cm/W

ϱ_c	= résistivité thermique du béton constituant le bloc de fourreaux	deg C cm/W
ϱ_m	= résistivité thermique des écrans métalliques dans les câbles multipolaires	deg C cm/W
ϱ_r	= résistivité thermique du matériau	deg C cm/W
θ	= température maximale de service au conducteur	°C
θ_m	= température moyenne du milieu entre câble et fourreau ou tuyau	°C
$\Delta\theta$	= élévation de température admissible au conducteur par rapport à la température ambiante	deg C
$\Delta\theta_{\text{duct}}$	= différence entre la température moyenne de l'air dans un fourreau et la température ambiante	deg C
$\Delta\theta_s$	= échauffement de la surface d'un câble posé dans l'air, au-dessus de la température ambiante	deg C
ω	= pulsation (fréquence angulaire $2\pi f$)	$1/s$

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

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

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

expression dans laquelle les paramètres ont la signification suivante :

I	= intensité du courant circulant dans un conducteur	A
$\Delta\theta$	= échauffement du conducteur au-dessus de la température ambiante, en degrés Celsius	deg C
R	= résistance en courant alternatif, par unité de longueur, du conducteur à sa température maximale	ohm/cm
W_d	= pertes diélectriques, par unité de longueur, de l'isolant entourant le conducteur	W/cm
T_1	= résistance thermique, par unité de longueur, entre un conducteur et la gaine	deg C cm/W
T_2	= résistance thermique, par unité de longueur, entre la gaine et l'armure	deg C cm/W
T_3	= résistance thermique, par unité de longueur, du revêtement extérieur du câble	deg C cm/W
T_4	= résistance thermique, par unité de longueur, entre la surface du câble et le milieu environnant, telle que déduite de l'article 9	deg C cm/W
n	= nombre de conducteurs chargés dans le câble (conducteurs de même section et transitant la même charge)	
λ_1	= rapport des pertes dans l'écran métallique aux pertes totales dans tous les conducteurs	
λ_2	= rapport des pertes dans l'armure aux pertes totales dans tous les conducteurs	

De la formule précédente, on déduit le courant admissible qui sera donné par l'expression :

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

La présente recommandation donne les méthodes d'évaluation des différentes quantités nécessaires au calcul de cette expression.

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

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

ρ_c	= thermal resistivity of concrete used for a duct bank	deg C cm/W
ρ_m	= thermal resistivity of metallic screens on multicore cables	deg C cm/W
ρ_T	= thermal resistivity of material	deg C cm/W
θ	= maximum operating temperature of conductor	°C
θ_m	= mean temperature of medium between a cable and duct or pipe	°C
$\Delta\theta$	= permissible temperature rise of conductor above the ambient	deg C
$\Delta\theta_{\text{duct}}$	= difference between the mean temperature of air in a duct and ambient temperature	deg C
$\Delta\theta_s$	= difference between the surface temperature of a cable in air and ambient temperature	deg C
ω	= angular frequency of system ($2\pi f$)	$1/s$

3. Permissible a.c. current rating of cables

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

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

where:

I	= current flowing in one conductor	A
$\Delta\theta$	= conductor temperature rise above the ambient temperature	deg C
R	= alternating current resistance per unit length of the conductor at maximum operating temperature	ohm/cm
W_d	= dielectric loss per unit length for the insulation surrounding the conductor	W/cm
T_1	= thermal resistance per unit length between one conductor and the sheath	deg C cm/W
T_2	= thermal resistance per unit length of the bedding between sheath and armour	deg C cm/W
T_3	= thermal resistance per unit length of the external serving of the cable	deg C cm/W
T_4	= thermal resistance per unit length between the cable surface and the surrounding medium, as derived from Clause 9	deg C cm/W
n	= number of load-carrying conductors in the cable (conductors of equal size and carrying the same load)	
λ_1	= ratio of losses in the metal sheath to total losses in all conductors	
λ_2	= ratio of losses in the armouring to total losses in all conductors	

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

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

This Recommendation gives methods for calculating the different quantities required for the evaluation of this expression, thus:

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

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

SECTION DEUX – CALCUL DES PERTES

4. Résistance en courant alternatif du conducteur, R

La résistance linéique du conducteur en courant alternatif et à la température maximale de service est donnée par la formule suivante, sauf dans le cas des câbles en tuyau (voir paragraphe 4.4):

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

où:

R = résistance en courant alternatif du conducteur à la température maximale de service, ohm/cm

R' = résistance en courant continu du conducteur à la température maximale de service, ohm/cm

y_s = facteur d'effet de peau

y_p = facteur d'effet de proximité

4.1 Résistance en courant continu du conducteur, R'

La résistance linéique du conducteur, en courant continu et à la température maximale de service θ , est donnée par:

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

où:

R_0 = résistance en courant continu du conducteur à 20 °C, ohm/cm

La valeur de R_0 doit être tirée directement de la Publication 228 de la CEI: Sections nominales et compositions des âmes des conducteurs et câbles isolés.

α_{20} = coefficient de variation à 20 °C de la résistivité en fonction de la température, par deg C à masse constante, soit:

0,003 93 pour le cuivre (Publication 28 de la CEI: Spécification internationale d'un cuivre-type recuit)

0,004 03 pour l'aluminium (Publication 111 de la CEI: Recommandation concernant la résistivité des fils en aluminium écroui dur industriel pour conducteurs électriques)

θ = température maximale de service, deg C. (Celle-ci est déterminée d'après le type d'isolant utilisé, voir annexe)

4.2 Facteur d'effet de peau y_s

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

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

$$x_s^2 = \frac{8 \pi f}{R'} 10^{-9} k_s$$

où:

f = fréquence du courant d'alimentation, Hz

Les valeurs de k_s sont données dans le tableau I.

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

4.3 Facteur d'effet de proximité y_p

Le facteur d'effet de proximité est donné par:

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

SECTION TWO – CALCULATION OF LOSSES

4. **A.C. resistance of conductor, R**

The a.c. resistance per unit length of the conductor at its maximum temperature is given by the following formula, except in the case of pipe-type cables (see Sub-clause 4.4):

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

where:

R = alternating current resistance of conductor at maximum operating temperature, ohm/cm

R' = d.c. resistance of conductor at maximum operating temperature, ohm/cm

y_s = the skin effect factor

y_p = the proximity effect factor

4.1 **D.C. resistance of conductor, R'**

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

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

where:

R_0 = d.c. resistance of the conductor at 20 °C, ohm/cm

The value of R_0 shall be derived directly from IEC Publication 228, Nominal Cross-sectional Areas and Composition of Conductors of Insulated Cables.

α_{20} = constant mass temperature coefficient at 20 °C per deg C and is:

0.003 93 for copper (IEC Publication 28, International Standard of Resistance for Copper)

0.004 03 for aluminium (IEC Publication 111, Recommendation for the Resistivity of Commercial Hard-drawn Aluminium Electrical Conductor Wire)

θ = maximum operating temperature, deg C. (This will be determined by the type of insulation to be used, see Appendix)

4.2 **Skin effect factor y_s**

The skin effect factor is given by:

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

where:

$$x_s^2 = \frac{8 \pi f}{R'} 10^{-9} k_s$$

f = supply frequency, Hz

Values for k_s are given in Table I.

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

4.3 **Proximity effect factor y_p**

The proximity effect factor is given by:

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

où:
$$x_p^2 = \frac{8 \pi f}{R'} 10^{-9} k_p$$

d_c = diamètre du conducteur, cm

s = distance entre axes des conducteurs, cm

Dans le cas des câbles multipôles à conducteurs sectoriaux, la valeur de y_p doit être multipliée par 2/3 pour obtenir le facteur d'effet de proximité.

$d_c = d_x$ = diamètre d'un conducteur circulaire câblé de même section, cm

$s = (d_x + t)$, cm

où:

t = épaisseur de l'isolant entre conducteurs, cm

Les valeurs de k_p sont données dans le tableau I.

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

4.4 Effets de peau et de proximité dans le cas de câbles en tuyau

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

$$R = R' [1 + 1,7 (y_s + y_p)]$$

TABLEAU I

Effets de peau et de proximité

Valeurs expérimentales des coefficients k_s et k_p pour des conducteurs en cuivre

(Les valeurs correspondantes pour les conducteurs en aluminium sont à l'étude.)

1	2	3	4
Type de conducteur	Sèche et imprégné ou non	k_s	k_p
Rond, câblé	Oui	1	0,8
Rond, câblé	Non	1	1
Rond, rétreint	Oui	1	0,8
Rond, rétreint	Non	1	1
Rond, segmenté *	Oui	0,435	0,37
Creux	Oui	**	0,8
Sectoral	Oui	1	0,8
Sectoral	Non	1	1

* Les valeurs données s'appliquent aux conducteurs ayant quatre segments (avec ou sans canal central) et aux sections jusqu'à 1 500 mm².

** La formule suivante doit être utilisée pour le calcul de k_s :

$$k_s = \frac{d_c' - d_1}{d_c' + d_1} \left(\frac{d_c' + 2 d_1}{d_c' + d_1} \right)^2$$

où:

d_1 est le diamètre intérieur du conducteur (canal central), cm

d_c' est le diamètre extérieur du conducteur plein équivalent ayant le même canal central, cm

5. Pertes diélectriques W_d

Les pertes diélectriques ne deviennent importantes que lorsque la tension par rapport à la terre dépasse 30 kV pour les câbles isolés au papier imprégné ou 6 kV pour les câbles isolés au p.c.v., qu'ils soient tripolaires métallisés ou unipolaires. Les tensions correspondantes pour le caoutchouc butyle et le polyéthylène sont à l'étude.

where: $x_p^2 = \frac{8 \pi f}{R'} 10^{-9} k_p$

d_e = diameter of conductor, cm

s = distance between conductor axes, cm

In the case of multicore cables with sector-shaped conductors, the value of y_p should be multiplied by 2/3 to obtain the proximity effect factor.

$d_e = d_x$ = diameter of a circular stranded conductor of the same cross-sectional area, cm

$s = (d_x + t)$, cm

where:

t = thickness of insulation between conductors, cm

Values for k_p are given in Table I.

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

4.4 Skin and proximity effects in pipe-type cables

For pipe-type cables, the skin and proximity effects shall be increased by a factor of 1.7. For these cables:

$$R = R' [1 + 1.7 (y_s + y_p)]$$

TABLE I
Skin and proximity effects

Experimental values for copper conductors currently available for the coefficients k_s and k_p

(The corresponding figures for aluminium conductors are under consideration.)

1	2	3	4
Type of conductor	Whether dried and impregnated or not	k_s	k_p
Round, stranded	Yes	1	0.8
Round, stranded	No	1	1
Round, compact	Yes	1	0.8
Round, compact	No	1	1
Round, segmental*	Yes	0.435	0.37
Hollow	Yes	**	0.8
Sector-shaped	Yes	1	0.8
Sector-shaped	No	1	1

* The values given apply to conductors having 4 segments (with or without central duct) and sectional areas up to 1 500 mm².

** The following formula should be used for k_s :

$$k_s = \frac{d_c' - d_i}{d_c' + d_i} \left(\frac{d_c' + 2 d_i}{d_c' + d_i} \right)^2$$

where:

d_i is the inside diameter of the conductor (central duct), cm

d_c' is the outside diameter of the equivalent solid conductor having the same central duct, cm

5. Dielectric losses W_d

The dielectric loss only becomes important when the voltage to earth exceeds 30 kV for paper-insulated or 6 kV for p.v.c.-insulated cables where 3-core screened or single-core cables are used. The corresponding voltages for butyl rubber and polyethylene are under consideration.

Les pertes diélectriques linéiques pour chaque phase sont données par :

$$W_d = \omega C E_0^2 \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-6} \text{ W/cm}$$

où :

$$\omega = 2 \pi f, \text{ } ^1/\text{s}$$

C = capacité par unité de longueur, $\mu\text{F/cm}$

E_0 = tension par rapport à la terre, V

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

5.1 Capacité C

La capacité pour des conducteurs cylindriques est donnée par :

$$C = \frac{0,0241 \varepsilon}{\log_{10} \left(\frac{D_1}{d_c} \right)} 10^{-5} \mu\text{F/cm}$$

où :

ε = permittivité relative de l'isolant

D_1 = diamètre extérieur de l'isolant, cm

d_c = diamètre du conducteur comprenant la présence d'un écran, s'il y a lieu, cm

La même formule peut être utilisée pour des conducteurs ovales en remplaçant D_1 et d_c par la moyenne géométrique des grand et petit diamètres sur isolant et sur conducteur.

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

TABLEAU II

Valeurs numériques de la permittivité relative et du facteur de pertes pour les isolants utilisés dans les câbles à haute tension et moyenne tension

1	2	3
Type de câble	ε	$\operatorname{tg} \delta$ *
<i>Câbles isolés au papier imprégné</i>		
Type «solid» à imprégnation totale, préimprégnés ou imprégnés de matière non migrante	4	0,01
A huile fluide, basse pression i)	3,3	0,004 **
A huile fluide, haute pression	3,5	0,0045 **
A pression d'huile, du type en tuyau	3,7	0,0045
A pression externe de gaz ii)	}	A l'étude
A pression interne de gaz iii)		
a) à imprégnation totale		
b) sans imprégnation totale		
<i>Câbles isolés avec d'autres matériaux</i>		
Caoutchouc (généralement caoutchouc butyle)	4,5	0,05
P.C.V.	8	0,1
Polyéthylène	2,3	0,0004

* Valeurs prudentes relatives au maximum de température admissible et applicables à la plus haute tension normalement spécifiée pour chaque type de câble.

** Les valeurs différentes sont plus le fait des caractéristiques du papier utilisé que de la pression.

- i) Voir la Publication 141-1 de la CEI: Essais des câbles à huile fluide, à pression de gaz et de leurs dispositifs accessoires, Première partie: Câbles au papier à huile fluide et à gaine métallique et accessoires pour des tensions inférieures ou égales à 275 kV.
- ii) Voir la Publication 141-2 de la CEI: Essais des câbles à huile fluide, à pression de gaz et de leurs dispositifs accessoires, Deuxième partie: Câbles à pression de gaz interne et accessoires pour des tensions alternatives inférieures ou égales à 275 kV.
- iii) Voir la Publication 141-3 de la CEI: Essais des câbles à huile fluide, à pression de gaz et de leurs dispositifs accessoires, Troisième partie: Câbles à pression de gaz externe (à compression de gaz) et accessoires pour des tensions alternatives inférieures ou égales à 275 kV.

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

$$W_d = \omega C E_o^2 \tan \delta \cdot 10^{-6} \text{ W/cm}$$

where:

$$\omega = 2 \pi f, \text{ } 1/s$$

C = capacitance per unit length, $\mu\text{F/cm}$

E_o = voltage to earth, V

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

5.1 Capacitance C

The capacitance for circular conductors is given by:

$$C = \frac{0.0241 \epsilon}{\log_{10} \left(\frac{D_1}{d_c} \right)} \cdot 10^{-5} \mu\text{F/cm}$$

where:

ϵ = relative permittivity of the insulation

D_1 = external diameter of the insulation, cm

d_c = diameter of conductor, including screen, if any, cm

The same formula can be used for oval conductors if the geometric mean of the appropriate major and minor diameters is substituted for D_1 and d_c .

Values of ϵ are given in Table II.

TABLE II
Values of relative permittivity and loss factors for the insulation of high-voltage and medium-voltage cables

1	2	3
Type of cable	ϵ	$\tan \delta^*$
<i>Cables insulated with impregnated paper</i>		
Solid type, fully-impregnated, pre-impregnated or mass-impregnated nondraining	4	0.01
Oil-filled, low-pressure i)	3.3	0.004 **
Oil-filled, high-pressure	3.5	0.0045 **
Oil-pressure pipe-type	3.7	0.0045
External gas-pressure ii)	Under consideration	
Internal gas-pressure iii)		
a) fully impregnated		
b) not fully impregnated		
<i>Cables with other kinds of insulation</i>		
Rubber (generally butyl rubber)	4.5	0.05
P.V.C.	8	0.1
Polyethylene	2.3	0.0004

* Safe values at maximum permissible temperature, applicable to the highest voltages normally specified for each type of cable.

** The different values are mainly related to the characteristics of the paper used, and not to the pressure.

i) See IEC Publication 141-1, Tests on Oil-filled and Gas-pressure Cables and their Accessories, Part 1: Oil-filled, Paper-insulated, Metal-sheathed Cables and Accessories for Alternating Voltages up to 275 kV.

ii) See IEC Publication 141-2, Tests on Oil-filled and Gas-pressure Cables and their Accessories, Part 2: Internal Gas-pressure Cables and Accessories for Alternating Voltages up to 275 kV.

iii) See IEC Publication 141-3, Tests on Oil-filled and Gas-pressure Cables and their Accessories, Part 3: External Gas-pressure, (Gas Compression) Cables and Accessories for Alternating Voltages up to 275 kV.

6. Pertes dans les gaines λ_1

Les pertes de gaine (λ_1) sont dues au passage de courants de circulation (λ_1') et aux courants de Foucault (λ_1''),

soit:

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1''$$

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

Pour les câbles unipolaires avec circuit de gaines fermé aux deux extrémités, seules les pertes dues aux courants de circulation sont prises en considération dans les paragraphes 6.1, 6.2 et 6.3.

Pour les câbles à gros conducteurs segmentés, le facteur de pertes doit être majoré pour tenir compte également des pertes dues aux courants de Foucault dans les gaines (voir paragraphe 6.5). Il y a également lieu de prendre une certaine marge de sécurité pour tenir compte d'une augmentation d'écartement en certains points de parcours (voir paragraphe 6.4).

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

Le tableau III donne les résistivités et coefficients de température du plomb et de l'acier, pour le calcul de la résistance de la gaine, R_s .

6.1 Câbles unipolaires disposés en trèfle avec gaines court-circuitées aux deux extrémités

Pour les câbles unipolaires disposés en triangle, avec gaines court-circuitées aux deux extrémités, le facteur de pertes est donné par:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2}$$

où:

R_s = résistance linéique de la gaine ou de l'écran, ohm/cm

X = réactance linéique de la gaine, ohm/cm

$$= 4,6 \omega \log_{10} \left(\frac{2s}{d} \right) 10^{-9} \text{ ohm/cm}$$

s = distance entre axes des conducteurs, cm

d = diamètre moyen de la gaine, lequel, dans le cas des conducteurs de forme ovale, est donné par $\sqrt{d_M \cdot d_m}$, où d_M et d_m sont respectivement les grand et petit diamètres, cm

ω = 2π x fréquence, $1/s$

λ_1'' = 0, c'est-à-dire que les pertes par courants de Foucault sont négligeables, sauf pour les câbles ayant de gros conducteurs segmentés pour lesquels λ_1'' est calculé par la méthode donnée au paragraphe 6.5

6. Sheath loss factor λ_1

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

thus:

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1''$$

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

For single-core cables with sheaths bonded at both ends, only the loss due to circulating currents in the sheaths is considered in Sub-clauses 6.1, 6.2 and 6.3.

For cables with large segmental conductors, the loss factor should be increased to take account of the loss due to eddy currents in the sheaths (see Sub-clause 6.5). An allowance has usually also to be made for increased spacing at certain points on the route (see Sub-clause 6.4).

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

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

6.1 *Single-core cables in trefoil formation, sheaths bonded at both ends*

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

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2}$$

where:

R_s = resistance per unit length of sheath or screen, ohm/cm

X = reactance per unit length of sheath, ohm/cm

$$= 4.6 \omega \log_{10} \left(\frac{2s}{d} \right) 10^{-9} \text{ ohm/cm}$$

s = distance between conductor axes, cm

d = mean diameter of the sheath which in the case of oval shaped cores is given by $\sqrt{d_M \cdot d_m}$, where d_M and d_m are the major and minor diameters respectively, cm

ω = 2π x frequency, $1/s$

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

6.2 *Câbles unipolaires disposés en nappe, régulièrement transposés, dont les gaines sont court-circuitées aux deux extrémités*

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

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_1}\right)^2}$$

où :

X_1 = réactance linéique de gaine, ohm/cm

$$= 4,6 \omega \log_{10} \left(\frac{2,52 s}{d} \right) 10^{-9} \text{ ohm/cm}$$

$\lambda_1'' = 0$, c'est-à-dire que les pertes par courants de Foucault sont négligeables, sauf pour des câbles ayant de gros conducteurs segmentés, pour lesquels λ_1'' est calculé par la méthode donnée dans le paragraphe 6.5

6.3 *Câbles unipolaires disposés en nappe, non transposés, dont les gaines sont court-circuitées aux deux extrémités*

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

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{\frac{3}{4} P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4} Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3} (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)} \right]$$

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

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{\frac{3}{4} P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4} Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3} (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)} \right]$$

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

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \left(\frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} \right)$$

Dans ces formules :

$$P = X + X_m$$

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

ou :

X = réactance linéique de la gaine, ou de l'écran, relative à la disposition en trèfle, ohm/cm

$$= 4,6 \omega \log_{10} \left(\frac{2 s}{d} \right) 10^{-9} \text{ ohm/cm}$$

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

$$= 4,6 \omega \log_{10} (2) 10^{-9} = 0,435 10^{-6} \text{ ohm/cm à 50 Hz}$$

$\lambda_1'' = 0$, c'est-à-dire que les pertes par courants de Foucault sont négligeables sauf pour des câbles ayant de gros conducteurs segmentés pour lesquels λ_1'' est calculé par la méthode indiquée au paragraphe 6.5

6.2 *Single-core cables in flat formation, with regular transposition, sheaths bonded at both ends*

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

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_1}\right)^2}$$

where:

X_1 = reactance per unit length of sheath, ohm/cm

$$= 4.6 \omega \log_{10} \left(\frac{2.52 s}{d} \right) 10^{-9} \text{ ohm/cm}$$

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

6.3 *Single-core cables in flat formation, without transposition, sheaths bonded at both ends*

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

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{\frac{3}{4} P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4} Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3} (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)} \right]$$

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

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{\frac{3}{4} P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{\frac{1}{4} Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3} (R_s^2 + P^2) (R_s^2 + Q^2)} \right]$$

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

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \left(\frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} \right)$$

In these formulae:

$$P = X + X_m$$

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

where:

X = reactance per unit length of sheath or screen for single-core cables in trefoil formation, ohm/cm

$$= 4.6 \omega \log_{10} \left(\frac{2 s}{d} \right) 10^{-9} \text{ ohm/cm}$$

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

$$= 4.6 \omega \log_{10} (2) 10^{-9} = 0.435 10^{-6} \text{ ohm/cm at 50 Hz}$$

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

6.4 Variation de la distance entre câbles unipolaires avec gaines court-circuitées aux deux extrémités

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

Il n'est pas toujours possible d'installer les câbles avec l'espacement optimal, et pour diverses raisons les câbles sont généralement beaucoup plus espacés en certains endroits qu'il n'est souhaitable et qu'il n'est réalisé sur le reste du parcours. Si les pertes dues aux courants de circulation dans l'enveloppe sont calculées sur la base de l'espacement souhaité, on obtient un résultat incorrect parce que les tensions induites dans les zones d'espacement plus grand sont plus élevées. Il est possible de calculer la tension induite et l'impédance séparément pour chaque partie du tracé comprise entre deux points de jonction des gaines. Ceci est fastidieux et comporte encore des approximations puisqu'il n'est pas souvent possible d'estimer à l'avance l'espacement effectif en ces points. Nous recommandons en conséquence, pour toutes les installations de câbles unipolaires dans lesquelles les gaines sont réunies directement en plus d'un point, d'augmenter forfaitairement de 25% le résultat du calcul des pertes dans les enveloppes pour tenir compte des singularités telles que les traversées de rues. Si on pense qu'un accroissement de 25% ne convient pas, on peut se mettre d'accord sur un autre pourcentage.

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

6.5 Influence des gros conducteurs segmentés

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

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

où:

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

et

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

6.4 Variation in spacing of single-core cables with sheaths bonded at both ends

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

It is not always possible to install cables with the optimum spacing, and for various reasons, cables are frequently spaced further apart at some places than the desired value which is used for the remainder of the route. If the loss due to circulating currents is calculated on the basis of the desired spacing, an incorrect result is obtained, because additional induced sheath voltages, occurring at the more widely spaced places, have been neglected. It is possible to calculate the induced voltage and impedance separately for each differently spaced portion of the route between two sheath bonding points. This calculation, however, may be very tedious and may still retain an element of approximation, since it is not often possible to estimate beforehand the actual spacing finally used at each place. It is, therefore, recommended, for all single-core cable installations in which simple bonding at more than one point is used, that the sheath loss factor be arbitrarily increased by 25% to take account of this feature. A different value may be used by agreement if it is considered that a 25% increase is not appropriate to a particular installation.

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

6.5 Effect of large segmental type conductors

Where the conductors are subject to a reduced proximity effect, as with large conductors of insulated segmental construction, the sheath loss factor λ_1'' , for Sub-clauses 6.1, 6.2 and 6.3 cannot be ignored, but shall be obtained by multiplying the value of λ_1'' , obtained from Sub-clause 6.6 for the same cable configuration, by the factor F , given by the formula:

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

where:

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

and

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

6.6 Câbles unipolaires avec gaines réunies en un seul point ou transposées

Pour des câbles unipolaires, à gaines réunies en un seul point ou transposées, le facteur de pertes est donné par :

$$\lambda_1'' = A_1 \frac{R_s}{R} \frac{\left(\frac{d}{2s}\right)^2}{\left(\frac{R_s 10^9}{\omega}\right)^2 + \frac{1}{5} \left(\frac{2s}{d}\right)} \left[1 + A_2 \left(\frac{d}{2s}\right)^2 \right]$$

où les coefficients A_1 et A_2 ont les valeurs suivantes :

	A_1	A_2
Câbles disposés en trèfle	3,0	0,417
Câbles disposés en nappe, le câble central étant équidistant des câbles extérieurs		
– pour les câbles extérieurs	1,5	0,27
– pour le câble central	6	0,083

Note. – Dans ce cas, les pertes sont dues aux courants de Foucault dans les gaines et ne sont pas affectées par la transposition. Si les câbles sont disposés en nappe et régulièrement transposés, les pertes moyennes par phase pour une section de transposition complète peuvent être obtenues en utilisant les coefficients donnés ci-dessus pour les câbles disposés en trèfle. On aura $\lambda_1' = 0$ pour les installations dont les gaines sont réunies en un seul point et pour celles dont les gaines sont transposées et où chaque section de transposition complète est divisée en trois sections élémentaires électriquement identiques.

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

Dans les installations où les longueurs effectives des sections simples sont connues, le facteur de pertes λ_1' peut être obtenu à partir du facteur de pertes dû au courant de circulation dans un système de même configuration, non transposé, et dont les gaines seront réunies et mises à la terre aux deux extrémités, en multipliant ce dernier facteur par :

$$\left(\frac{n+m-2}{n+m+1}\right)^2$$

dans cette expression, n et m désignent pour la section de transposition complète considérée le rapport de longueurs des deux plus grandes sections à la plus petite (longueur de la plus petite : a , longueurs des deux autres : na et ma).

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

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

Lorsqu'on ne connaît pas les longueurs des sections simples, on prendra :

$\lambda_1' = 0,003$ pour les câbles directement enterrés, et

$\lambda_1' = 0,05$ pour les câbles posés en fourreaux.

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

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

$$\lambda_1'' = A_1 \frac{R_s}{R} \frac{\left(\frac{d}{2s}\right)^2}{\left(\frac{R_s 10^9}{\omega}\right)^2 + \frac{1}{5}\left(\frac{2s}{d}\right)} \left[1 + A_2 \left(\frac{d}{2s}\right)^2 \right]$$

where the coefficients A_1 and A_2 have the following values:

	A_1	A_2
Cables in trefoil formation	3.0	0.417
Cables in flat formation, with the middle cable equidistant from the outer cables:		
– for the outer cables	1.5	0.27
– for the middle cable	6	0.083

Note. – In this case, the loss is due to eddy currents in the sheaths, and is not affected by transposition. If the cables are in flat formation with regular transposition, the average loss over three sections for any phase may be obtained by using the coefficients given above for cables in trefoil formation. $\lambda_1' = 0$, for installations where the sheaths are single-point bonded, and for installations where the sheaths are cross-bonded and each major section is divided into three electrically identical minor sections.

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

For installations where the actual lengths of the minor sections are known, the loss factor λ_1' can be calculated by multiplying the circulating current loss factor for the cable configuration concerned as if it were bonded and earthed at both ends of each major section without cross-bonding, by:

$$\left(\frac{n+m-2}{n+m+1}\right)^2$$

where in any major section, the two longer minor sections are n and m times the length of the shortest minor section (i.e. the minor section lengths are a , na and ma , where the shortest section is a).

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

Any deviations in spacing must also be taken into account.

Where the lengths of the minor sections are not known, it is recommended that the value for λ_1' be:

- $\lambda_1' = 0.003$ for cables laid direct, and
- $\lambda_1' = 0.05$ for cables installed in ducts.

6.7 Câbles tripolaires sous gaine commune

Pour un câble tripolaire dont les conducteurs sont contenus dans une gaine métallique commune, λ_1' est négligeable et le facteur de pertes est donné par une des formules suivantes:

Pour les câbles à conducteurs ronds ou ovales dont la résistance de gaine R_s est inférieure ou égale à $1 \mu\Omega/\text{cm}$:

$$\lambda_1'' = \frac{3 R_s}{R} \left[\left(\frac{2c}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{159 R_s 10^6}{f} \right)^2} + \left(\frac{2c}{d} \right)^4 \frac{1}{1 + 4 \left(\frac{159 R_s 10^6}{f} \right)^2} \right]$$

avec:

c = distance entre l'axe d'un conducteur et l'axe du câble, cm

d = diamètre moyen de la gaine, cm

f = fréquence, Hz

Pour les mêmes câbles dont la résistance R_s est supérieure à $1 \mu\Omega/\text{cm}$:

$$\lambda_1'' = \frac{3,2 \omega^2}{R R_s} \left(\frac{2c}{d} \right)^2 10^{-18}$$

Pour les câbles à conducteurs sectoriaux et toutes valeurs de R_s :

$$\lambda_1'' = 0,94 \frac{R_s}{R} \left(\frac{2r_1 + t}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{159 R_s 10^6}{f} \right)^2}$$

avec:

r_1 = rayon du cercle circonscrit aux trois conducteurs sectoriaux, cm

t = épaisseur de l'isolant entre conducteurs, cm

6.8 Câbles tripolaires armés de feuillards d'acier

L'adjonction d'une armure de feuillards d'acier augmente les pertes par courants de Foucault dans la gaine. Dans ce cas, les valeurs correspondantes λ_1'' du paragraphe 6.7 doivent être multipliées par le facteur suivant:

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

où:

d_A = diamètre moyen de l'armure, cm

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

δ = épaisseur équivalente de l'armure = $\frac{A}{\pi d_A}$, cm

où A est la section transversale de l'armure, cm^2

Cette correction n'est applicable qu'aux rubans d'épaisseur comprise entre 0,3 mm à 1,0 mm. Le problème est encore à l'étude pour les rubans plus minces (voir paragraphe 7.3).

6.9 Câbles multiplombs armés

Pour un câble tripolaire dont chaque phase possède sa propre gaine de plomb, le facteur de pertes est donné par:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1,7}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2}$$

où:

X = $4,6 \omega \log_{10} \left(\frac{2s}{d} \right) 10^{-9}$ ohm/cm

s = distance entre axes de conducteurs, cm

$$\lambda_1'' = 0$$

6.7 *Three-core cables with common sheath*

For a three-core cable where the cores are contained in a common metallic sheath, λ_1' is negligible and the loss factor is, therefore, given by one of the following formulae:

For round or oval conductors, and where the sheath resistance R_s is less than or equal to $1 \mu\Omega/\text{cm}$:

$$\lambda_1'' = \frac{3 R_s}{R} \left[\left(\frac{2c}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{159 R_s 10^6}{f} \right)^2} + \left(\frac{2c}{d} \right)^4 \frac{1}{1 + 4 \left(\frac{159 R_s 10^6}{f} \right)^2} \right]$$

where:

- c = distance between the axis of one conductor and the axis of the cable, cm
- d = mean diameter of the sheath, cm
- f = frequency, Hz

For round or oval conductors, and where the sheath resistance R_s is greater than $1 \mu\Omega/\text{cm}$:

$$\lambda_1'' = \frac{3.2 \omega^2}{R R_s} \left(\frac{2c}{d} \right)^2 10^{-18}$$

For sector-shaped conductors, and R_s any value:

$$\lambda_1'' = 0.94 \frac{R_s}{R} \left(\frac{2r_1 + t}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{159 R_s 10^6}{f} \right)^2}$$

where:

- r_1 = radius of the circle circumscribing the three shaped conductors, cm
- t = thickness of insulation between conductors, cm

6.8 *Three-core cables with steel tape armour*

The addition of steel tape armour increases the eddy-current loss in the sheath. The values for λ_1'' , given in Sub-clause 6.7 should be multiplied by the following factor if the cable has steel-tape armour:

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

where:

- d_A = mean diameter of armour, cm
- μ = effective permeability of the steel tape (usually taken as 300)
- δ = equivalent thickness of armour = $\frac{A}{\pi d_A}$, cm

where A = cross-sectional area of the armour, cm^2

This correction is only known to be applicable to tapes 0.3 mm to 1.0 mm thick. The subject is still being considered for thinner tapes. (See Sub-clause 7.3.)

6.9 *Cables with each core in a separate lead sheath (S. L. type) and armoured*

For a three-core cable of which each core has a separate lead sheath, the loss factor for the sheaths is given by:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1.7}{1 + \left(\frac{R_s}{X} \right)^2}$$

where:

$$X = 4.6 \omega \log_{10} \left(\frac{2s}{d} \right) 10^{-9} \text{ ohm/cm}$$

s = distance between conductor axes, cm

$$\lambda_1'' = 0$$

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

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

La formule modifiée s'écrit :

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1,7}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2}$$

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

$$d' = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2}{2}}$$

où :

d' = diamètre moyen de gaine et frettage, cm

d_1 = diamètre moyen de l'écran ou gaine, cm

d_2 = diamètre moyen du frettage, cm

Dans le cas des conducteurs de forme ovale, d_1 et d_2 sont donnés par $\sqrt{d_M \cdot d_m}$, où d_M et d_m sont respectivement les grand et petit diamètres.

Note. – Voir aussi le paragraphe 7.2.

7. Pertes dans les armures et les frettages λ_2

7.1 Emploi des formules

Les formules données dans ce paragraphe expriment la puissance dissipée dans l'armure métallique ou le frettage des câbles sous la forme d'une fraction λ_2 de la puissance perdue dans tous les conducteurs.

Les valeurs de résistivité et le coefficient de variation de la résistivité avec la température à utiliser sont donnés dans le tableau III.

TABLEAU III

Résistivités électriques et coefficients de variation de la résistivité avec la température des métaux utilisés

Matériau	Résistivité (ρ) ohm. cm à 20 °C	Coefficient (α_{20}) par deg C à 20 °C
a) Conducteurs		
Cuivre	1,7241 10^{-6}	3,93 10^{-3}
Aluminium	2,8264 10^{-6}	4,03 10^{-3}
b) Matériaux de gaines et d'armure		
Plomb et alliage	21,4 10^{-6}	4,0 10^{-3}
Acier	13,8 10^{-6}	4,5 10^{-3}
Bronze	3,5 10^{-6}	3,0 10^{-3}
Acier inoxydable	70 10^{-6}	Négligeable
Aluminium	2,84 10^{-6}	4,03 10^{-3}

Note. – Les valeurs se rapportant au cuivre constituant les conducteurs sont prises dans la Publication 28 de la CEI. Les valeurs se rapportant à l'aluminium constituant les conducteurs sont prises dans la Publication 111 de la CEI.

6.10 Losses in screens and sheaths of pipe-type cables

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

This modifies the formula to:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1.7}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2}$$

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

$$d' = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2}{2}}$$

where:

d' = mean diameter of sheath and reinforcement, cm

d_1 = mean diameter of screen or sheath, cm

d_2 = mean diameter of reinforcement, cm

In the case of oval-shaped cores d_1 and d_2 are given by $\sqrt{d_M \cdot d_m}$, where d_M and d_m are the major and minor mean diameters respectively.

Note. – See also Sub-clause 7.2.

7. Armour and reinforcement losses λ_2

7.1 Use of formulae

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

Appropriate values of resistivity and resistance temperature coefficient for the materials used for armour and reinforcement are given in Table III.

TABLE III

Electrical resistivities and temperature coefficients of metals used

Material	Resistivity (ρ) ohm.cm at 20 °C	Temperature coefficient (α_{20}) per deg C at 20 °C
<i>a) Conductors</i>		
Copper	1.7241 10^{-6}	3.93 10^{-3}
Aluminium	2.8264 10^{-6}	4.03 10^{-3}
<i>b) Sheaths and armour</i>		
Lead or lead alloy	21.4 10^{-6}	4.0 10^{-3}
Steel	13.8 10^{-6}	4.5 10^{-3}
Bronze	3.5 10^{-6}	3.0 10^{-3}
Stainless steel	70 10^{-6}	Negligible
Aluminium	2.84 10^{-6}	4.03 10^{-3}

Note. – Values for copper conductors are taken from IEC Publication 28. Values for aluminium conductors are taken from IEC Publication 111.

7.2 Armure ou frettage non magnétique

Le procédé général est de combiner le calcul des pertes dans le frettage avec celui des pertes dans la gaine. Les formules sont données dans l'article 6 et la combinaison en parallèle des résistances de la gaine et du frettage est utilisée à la place de la résistance R_s de la gaine. La moyenne quadratique des diamètres de la gaine et du frettage remplace le diamètre moyen d_1 de la gaine. Cette méthode est applicable aux câbles unipolaires et multipolaires.

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

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

Ces considérations s'appliquent aussi aux câbles en tuyaux, comme il est indiqué dans le paragraphe 6.10.

7.3 Armure ou frettage magnétique

7.3.1 Câbles unipolaires

Ce cas sera considéré ultérieurement.

7.3.2 Câbles tripolaires – Armure en fils d'acier

a) Câbles à conducteurs ronds

$$\lambda_2 = 1,23 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2c}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{44 R_A 10^6}{f} \right)^2 + 1}$$

où :

R_A = résistance de l'armure à sa température maximale, ohm/cm

d_A = diamètre moyen de l'armure, cm

c = distance entre l'axe d'un conducteur et le centre du câble, cm

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

b) Câbles triplombs

Quand il s'agit d'un câble triplombs armé, l'effet d'écran résultant des courants dans les gaines réduit les pertes dans l'armure. La valeur de λ_2 calculée ci-dessus doit être multipliée par le facteur $(1-\lambda_1')$, λ_1' ayant la valeur déterminée au paragraphe 6.1.

c) Câbles à conducteurs sectoriaux

$$\lambda_2 = 0,358 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2r_1}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{44 R_A 10^6}{f} \right)^2 + 1}$$

où :

r_1 = rayon du cercle circonscrit aux trois conducteurs sectoriaux, cm

f = fréquence d'alimentation, Hz

7.2 Non-magnetic armour or reinforcement

The general procedure is to combine the calculation of the loss in the reinforcement with that of the sheath. The formulae are given in Clause 6 and the parallel combination of sheath and reinforcement resistance is used in place of the single sheath resistance R_s . The root mean square value of the sheath and reinforcement diameter replaces the mean sheath diameter d_1 . This procedure applies to both single and multicore cables.

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

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

These considerations apply also to the cores of pipe-type cables dealt with in Sub-clause 6.10.

7.3 Magnetic armour or reinforcement

7.3.1 Single-core cables

This subject is for future consideration.

7.3.2 Three-core cables – Steel wire armour

a) Round conductor cable

$$\lambda_2 = 1.23 \frac{R_A (2c)^2}{R d_A} \frac{1}{\left(\frac{44 R_A 10^6}{f}\right)^2 + 1}$$

where:

R_A = resistance of armour at maximum armour temperature, ohm/cm

d_A = mean diameter of armour, cm

c = distance between the axis of a conductor and the cable centre, cm

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

b) S.L. type cables

Where the armour is over an S.L. type cable, the screening effect of the sheath currents reduces the armour loss. The formula for λ_2 given above should be multiplied by the factor $(1 - \lambda_1')$, where λ_1' is obtained from Sub-clause 6.1.

c) Sector conductor cables

$$\lambda_2 = 0.358 \frac{R_A \left(\frac{2r_1}{d_A}\right)^2}{R} \frac{1}{\left(\frac{44 R_A 10^6}{f}\right)^2 + 1}$$

where:

r_1 = radius of the circle circumscribing the three shaped conductors, cm

f = frequency of supply, Hz

7.3.3 Câbles tripolaires sous feuillards d'acier

Les formules suivantes s'appliquent aux feuillards dont l'épaisseur est comprise entre 0,3 mm et 1 mm. Pour des épaisseurs inférieures à 0,3 mm, des formules sont à l'étude.

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

$$\lambda_2' = \frac{s^2 k^2 10^{-9}}{R d_A \delta}$$

où :

s = distance entre axes des conducteurs, cm

δ = épaisseur équivalente de l'armure, cm

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

et :

A = section de l'armure, cm²

d_A = diamètre moyen de l'armure, cm

Le facteur k est donné par :

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

où :

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

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

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

$$\lambda_2'' = \frac{2,25 s^2 k^2 \delta 10^{-8}}{R d_A}$$

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

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

$$\lambda_2 = \lambda_2' + \lambda_2''$$

Note. — La présence de frettages ou d'armures magnétiques augmente les pertes par courants de Foucault dans les gaines; il doit en être tenu compte comme il est indiqué au paragraphe 6.8.

7.4 Pertes dans les tuyaux d'acier

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

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

$$\lambda_2 = \left(\frac{0,0115 s - 0,001 485 d_d}{R} \right) 10^{-6}$$

pour la configuration en trèfle

7.3.3 Three-core cables – Steel tape armour or reinforcement

The following formulae apply to tapes 0.3 to 1.0 mm thick. Formulae for tapes less than 0.3 mm in thickness are under consideration.

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

$$\lambda_2' = \frac{s^2 k^2 10^{-9}}{R d_A \delta}$$

where:

s = distance between conductor axes, cm

δ = equivalent thickness of armour, cm

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

and:

A = armour cross-sectional area, cm²

d_A = mean diameter of armour, cm

The factor k is given by:

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

where:

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

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

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

$$\lambda_2'' = \frac{2.25 s^2 k^2 \delta 10^{-8}}{R d_A}$$

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

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

$$\lambda_2 = \lambda_2' + \lambda_2''$$

Note. – Magnetic armour or reinforcement, if any, increase eddy-current losses in the sheaths. Reference should be made to Sub-clause 6.8.

7.4 Losses in steel pipes

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

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

$$\lambda_2 = \left(\frac{0.0115 s - 0.001485 d_d}{R} \right) 10^{-6}$$

for closely bound triangular configuration

et:

$$\lambda_2 = \left(\frac{0,004\ 38 s + 0,002\ 26 d_d}{R} \right) 10^{-6}$$

pour la configuration en berceau,

où:

s = espacement entre axes des conducteurs, cm

d_d = diamètre intérieur du tuyau, cm

R = résistance linéique en courant alternatif du conducteur à la température maximale de service, ohm/cm

Ces formules correspondent à une fréquence de 60 Hz. Pour 50 Hz, les valeurs trouvées doivent être multipliées par 0,7. Ce facteur est toutefois en cours d'étude.

SECTION TROIS – CALCUL DES RÉSISTANCES THERMIQUES

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

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

TABLEAU IV

Résistivité thermique des matériaux

Matériau	Résistivité thermique (ρ_T) deg C.cm/W
<i>Matériaux d'isolation</i>	
Papier dans les câbles de type «solid»	600
Papier dans les câbles à huile fluide	500
Papier dans les câbles à pression externe de gaz	550
Papier dans les câbles à pression interne de gaz:	
a) Préimprégnés	650
b) Imprégnés en masse	600
Polyéthylène	400
Polychlorure de vinyle	700
Caoutchouc butyle	A l'étude
<i>Matériaux de revêtement</i>	
Jute composé et matériaux fibreux	600
Protection «rubber-sandwich»	700
Polychloroprène	550
Polychlorure de vinyle	700
Caoutchouc butyle	A l'étude
<i>Matériaux pour installations en fourreaux</i>	
Fibre	} A l'étude
Ciment-amiante	
Argile cuite	
Béton	

and:

$$\lambda_2 = \left(\frac{0.004\ 38\ s + 0.002\ 26\ d_d}{R} \right) 10^{-6}$$

for the open or cradled formation,

where:

s = axial spacing of adjacent conductors, cm

d_d = internal diameter of pipe, cm

R = a.c. resistance per unit length of the conductor at maximum operating temperature, ohm/cm

The formulae given apply to a frequency of 60 Hz. For 50 Hz they should be multiplied by 0.7. This factor is, however, under consideration.

SECTION THREE – CALCULATION OF THERMAL RESISTANCES

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

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

TABLE IV
Thermal resistivities of materials

Material	Thermal resistivity (θ_T) deg C.cm/W
<i>Insulating materials</i>	
Paper insulation in solid-type cables	600
Paper insulation in oil-filled cables	500
Paper insulation in cables with external gas pressure	550
Paper insulation in cables with internal gas pressure:	
a) Pre-impregnated	650
b) Mass-impregnated	600
Polyethylene	400
Polyvinyl chloride	700
Butyl rubber	Under consideration
<i>Protective coverings</i>	
Compounded jute and fibrous materials	600
Rubber-sandwich protection	700
Polychloroprene	550
Polyvinyl chloride	700
Butyl rubber	Under consideration
<i>Materials for duct installations</i>	
Fibre	} Under consideration
Asbestos cement	
Earthenware	
Concrete	

8.1 Résistance thermique entre conducteur et gaine T_1

8.1.1 Câbles unipolaires

T_1 est donné par :

$$T_1 = 0,366 \varrho_T \log_{10} \left[1 + \frac{2 t_1}{d_c} \right]$$

où :

d_c = diamètre du conducteur, cm

t_1 = épaisseur de l'isolant entre conducteur et gaine, cm

ϱ_T = résistivité thermique de l'isolant, deg C cm/W

8.1.2 Câbles tripolaires à ceinture

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

où :

G = facteur géométrique défini ci-dessous

– Câbles à ceinture à conducteurs ronds

Le facteur géométrique G est donné par la figure 2, page 56

– Câbles à ceinture à conducteurs sectoriaux

Pour ces câbles, le facteur géométrique G dépend de la forme du secteur, laquelle varie d'un constructeur à l'autre. On peut utiliser la formule :

$$G = F_1 6,9 \log_{10} \left(\frac{d_a}{2 r_1} \right)$$

où :

d_a = diamètre extérieur de la ceinture isolante, cm

r_1 = rayon du cercle circonscrit aux conducteurs, cm

Pour les valeurs usuelles de sections de conducteurs et d'épaisseur d'isolant, F_1 peut être égal à 1. Cependant, pour les petites sections et les fortes épaisseurs d'isolant entre conducteurs, une valeur plus correcte de F_1 est donnée par :

$$F_1 = 1 + \frac{3 t}{2 \pi (d_x + t) - t}$$

où :

d_x = diamètre du conducteur rond ayant la même section que le conducteur sectorial considéré, cm

8.1.3 Câbles tripolaires métallisés

a) Câbles métallisés à conducteurs ronds

Les câbles de ce type peuvent être considérés comme des câbles à ceinture pour lesquels $\frac{t_1}{t} = 0,5$.

Mais pour tenir compte de la conductivité thermique des écrans métalliques, le résultat doit être multiplié par un facteur K , dit facteur d'écran, donné par la figure 3, page 57, pour différentes valeurs de $\frac{t_1}{d_c}$ et différentes spécifications de câbles.

On a donc :

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

8.1 Thermal resistance between one conductor and sheath T_1

8.1.1 Single-core cables

T_1 is given by:

$$T_1 = 0.366 \rho_T \log_{10} \left[1 + \frac{2 t_1}{d_c} \right]$$

where:

d_c = diameter of conductor, cm

t_1 = thickness of insulation between conductor and sheath, cm

ρ_T = thermal resistivity of insulation, deg C cm/W

8.1.2 Three-core belted cables

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

where:

G = geometric factor

– *Belted cable with circular conductors*

The geometric factor G is given in Figure 2, page 56.

– *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:

$$G = F_1 6.9 \log_{10} \left(\frac{d_a}{2 r_1} \right)$$

where:

d_a = external diameter of the belt insulation, cm

r_1 = radius of the circle circumscribing the conductors, cm

For the usual range of conductor sizes and insulation thicknesses, F_1 may be taken as equal to unity. However, with small conductors and large insulation thicknesses between conductors, a more correct value can be obtained from:

$$F_1 = 1 + \frac{3 t}{2 \pi (d_x + t) - t}$$

where:

d_x = diameter of a circular stranded conductor having the same cross-sectional area as the shaped one, cm

8.1.3 Three-core cables, screened-type

a) Screened cables with circular conductors

Cables of this type may be first considered as belted cables for which $\frac{t_1}{t}$ is 0.5. Then, in order to take account of the thermal conductivity of the metallic screens, the result must be multiplied by a factor K , called the screening factor, which is given in Figure 3, page 57, for different values of $\frac{t_1}{d_c}$ and different cable specifications.

Thus:

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

b) *Câbles métallisés à conducteurs sectoraux*

Pour ces câbles, T_1 est calculé de la même manière que pour les câbles à ceinture, 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 4, page 58.

8.1.4 *Câbles à huile fluide*

Pour les câbles tripolaires à huile fluide, on doit tenir compte des canaux d'huile. En supposant que la résistivité thermique de l'huile n'est pas très différente de celle du papier imprégné pour les câbles tripolaires à huile fluide sans bourrage ni rubans métalliques formant les canaux d'huile, T_1 est calculé selon le paragraphe 8.1.3. Pour les câbles avec rubans métalliques formant les canaux d'huile, T_1 est donné par :

$$\text{où: } T_1 = T_0 + \frac{T_{du} T_{fl}}{T_{du} + T_{fl}}$$

T_0 = résistance thermique interne d'un conducteur isolé de mêmes dimensions que celles de chacun des constructeurs du câble à huile considéré

T_{du} = résistance thermique des canaux d'huile

T_{fl} = résistance thermique des bourrages et de l'écran situés entre diélectrique et gaine

= résistance thermique interne du câble tripolaire métallisé de mêmes dimensions que le câble considéré, mais sans les canaux d'huile, moins celle d'un simple câble T_0

La contribution due à la résistance thermique de l'huile des conduits est :

$$\text{où: } T_{du} = K_{du} \left(\frac{a+b}{a} \right) \left[\left(0,576 \frac{r_1}{e} \right) - 0,6 \right]$$

K_{du} = résistivité thermique du ruban métallique constituant le canal d'huile (0,48 deg C cm/W et 2,2 deg C cm/W pour l'aluminium et l'acier respectivement)

a = largeur du ruban de métal, cm

b = distance entre spires voisines, cm

r_1 = rayon sur écran individuel, cm

e = épaisseur du ruban de métal, cm

Câbles multiplombs (et multi-aluminium)

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

8.2 *Calcul de la résistance thermique T_2*

a) *Câbles unipolaires et câbles tripolaires ayant une gaine métallique commune*

$$\text{où: } T_2 = 0,366 \rho_T \log_{10} \left(\frac{D_a}{D_s} \right)$$

D_a = diamètre extérieur du revêtement, cm

D_s = diamètre intérieur du revêtement, cm

b) *Câbles multiplombs (ou tri-aluminium)*

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} = facteur géométrique donné par la figure 5, page 59

b) *Screened cables with sector-shaped conductors*

T_1 is calculated for these cables in the same way as for belted cables, 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 4, page 58.

8.1.4 *Oil-filled cables*

For three-core oil-filled cables, some account should be taken of the presence of the oil ducts. On the assumption that the thermal resistivity of the oil is not far removed from that of the impregnated paper dielectric, for three-core oil-filled cables without filling material and metal tapes forming the oil ducts, T_1 is calculated according to Sub-clause 8.1.3. For cables with metal tapes forming the oil ducts, T_1 is given by:

$$T_1 = T_0 + \frac{T_{du} T_{fl}}{T_{du} + T_{fl}}$$

where:

T_0 = internal thermal resistance of an isolated single-core screened cable, of the same dimensions as each screened, paper-insulated conductor of three-core oil-filled cable

T_{du} = thermal resistance of the oil ducts

T_{fl} = thermal resistance of the filling material and screen between dielectric and sheath
= internal thermal resistance of a three-core screened cable of the same dimensions as given cable, but without oil ducts, less that of a single-core cable T_0

The contribution due to the thermal resistance of the oil ducts is:

$$T_{du} = K_{du} \left(\frac{a+b}{a} \right) \left[\left(0.576 \frac{r_1}{e} \right) - 0.6 \right]$$

where:

K_{du} = thermal resistivity of the metal tape forming the oil duct (0.48 deg C cm/W and 2.2 deg C cm/W for aluminum and steel respectively)

a = width of metal tape, cm

b = gap between successive turns, cm

r_1 = external radius of each touching screen, cm

e = thickness of metal tape, cm

S.L. and S.A. type cables

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

8.2 *Calculation of thermal resistance T_2*

a) *Single-core cables and three-core cables having a common metallic sheath*

$$T_2 = 0.366 \varrho_T \log_{10} \left(\frac{D_a}{D_s} \right)$$

where:

D_a = external diameter of the bedding, cm

D_s = internal diameter of the bedding, cm

b) *S.L. and S.A. type cables*

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

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

where:

\bar{G} = geometric factor given in Figure 5, page 59

8.3 Calcul de la résistance thermique T_3

Les revêtements extérieurs sont généralement disposés en couches concentriques et :

$$T_3 = 0,366 \rho_T \log_{10} \left(\frac{D_e}{D_a'} \right)$$

où :

D_e = diamètre extérieur du revêtement externe, cm

D_a' = diamètre intérieur du revêtement externe, cm

8.4 Cas des câbles en tuyau

Pour ces câbles, nous avons :

a) La résistance thermique T_1 de l'isolant de chaque phase entre conducteur et écran. Celle-ci est calculée comme indiqué au paragraphe relatif aux câbles unipolaires.

b) La résistance thermique T_2 comprenant d'une part :

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

La valeur par phase est calculée par la méthode donnée au paragraphe 8.2 pour le revêtement des câbles unipolaires. Dans le cas de conducteurs ovales, on prend le diamètre équivalent (moyenne géométrique).

D'autre part :

2) La résistance thermique du gaz ou de l'huile compris entre la surface extérieure du câble et le tuyau. Cette résistance est calculée de la même façon que la partie de T_4 correspondant à l'espace compris entre un câble et la surface du fourreau dans lequel il serait posé (paragraphe 9.8).

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

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

9. Résistivité thermique extérieure T_4

9.1 Câbles posés à l'air libre

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 :

D_e = diamètre extérieur du câble, cm

h = coefficient d'émission de chaleur (obtenu à partir de la figure 6, page 60) qui donne des valeurs de k pour les états de surface extrêmes, par exemple surface sombre et surface brillante, $W/cm^2 (deg C)^{5/4}$

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

8.3 Calculation of thermal resistance T_3

The external servings are generally in the form of concentric layers and:

$$T_3 = 0.366 \rho_T \log_{10} \left(\frac{D_e}{D_{a'}} \right)$$

where:

D_e = external diameter of the outer serving, cm

$D_{a'}$ = internal diameter of the outer serving, cm

8.4 Pipe-type cables

For these cables, we have:

a) The thermal resistance T_1 of the insulation of each core between the conductor and the screen. This is calculated in the section on single-core cables.

b) The thermal resistance T_2 is made up in part by:

1) The resistance of any serving over the screen or sheath of each core. The value to be substituted for part of T_2 in the rating equation of Clause 3 is the value per cable, i.e. one third the value per core for a three-core cable.

The value per core is calculated by the method given in Sub-clause 8.2 for the serving of single-core cables. For oval cores, the geometric mean of the major and minor diameters shall be used in place of the diameter for a circular core assembly.

2) By the thermal resistance of the gas or oil between the surface of the cores and the pipe. This resistance is calculated in the same way as that part of T_4 which is between a cable and the internal surface of a duct, as given in Sub-clause 9.8.

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

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

9. External thermal resistance T_4

9.1 Cables laid in free air

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:

D_e = external diameter of cable, cm

h = heat dissipation coefficient (obtained from Figure 6, page 60) which gives values for two extreme surface conditions of the cable, i.e. black and bright, $W/cm^2 (deg C)^{6/4}$

$\Delta\theta_s$ = excess of cable surface temperature above ambient temperature (see hereafter for method of calculation), deg C

Les câbles revêtus de jute doivent être considérés comme ayant une surface noire.

Pour les câbles non revêtus de jute, à plomb nu ou armure nue, ainsi que pour les câbles à gaine thermoplastique, il faut prendre une valeur de h intermédiaire entre les valeurs données pour les surfaces sombres et brillantes.

Trois câbles installés sur des consoles discontinues doivent être considérés équivalents au cas 2) de la figure 6, page 60, et s'ils sont installés sur des tablettes continues, équivalents au cas 3) de la figure 6.

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

Calcul de $\Delta\theta_s$ au moyen d'un abaque

L'élévation de température de la surface du câble $\Delta\theta_s$ au-dessus de la température ambiante est donnée par l'équation:

$$(1 + \lambda_1 + \lambda_2) (\Delta\theta + \Delta\theta_d - \Delta\theta_s) = \pi D_e h (\Delta\theta_s)^{5/4} \left[\frac{T_1}{n} + T_2 (1 + \lambda_1) + T_3 (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right]$$

où:

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

On procède alors ainsi:

a) On calcule la valeur de $\frac{(\Delta\theta + \Delta\theta_d - \Delta\theta_s)}{(\Delta\theta_s)^{5/4}}$ en utilisant la formule:

$$\frac{(\Delta\theta + \Delta\theta_d - \Delta\theta_s)}{(\Delta\theta_s)^{5/4}} = \frac{\pi D_e h}{(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \left[\frac{T_1}{n} + T_2 (1 + \lambda_1) + T_3 (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right]$$

b) On trace sur le graphique de la figure 7, page 61, la droite ayant l'ordonnée calculée ci-dessus et on repère son intersection avec la courbe $\Delta\theta + \Delta\theta_d = Cte$ de valeur convenable.

c) L'abscisse correspondant au point d'intersection a pour valeur $(\Delta\theta_s)^{1/4}$.

9.2 *Un seul câble enterré*

$$T_4 = 0,366 \varrho_T \log_{10} \left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right)$$

où:

ϱ_T = résistivité thermique du sol, deg C cm/W

$u = \frac{L}{r_e}$

L = distance de la surface du sol à l'axe du câble, cm

r_e = rayon extérieur du câble, cm

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

$$T_4 = 0,366 \varrho_T \log_{10} (2 u)$$

Served cables should be considered to have a black surface.

Unserved cables, either plain lead or armoured, and cables with a thermoplastic sheath should be given a value of h midway between the bright and black values.

Three cables installed on non-continuous brackets shall be considered equivalent to case 2) in Figure 6, page 60, and when on continuous trays, as equivalent to case 3) in Figure 6.

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

Calculation of $\Delta\theta_s$ by means of a diagram

$\Delta\theta_s$ the excess of cable surface temperature above ambient temperature is given by the equation:

$$(1 + \lambda_1 + \lambda_2) (\Delta\theta + \Delta\theta_d - \Delta\theta_s) = \pi D_e h (\Delta\theta_s)^{5/4} \left[\frac{T_1}{n} + T_2 (1 + \lambda_1) + T_3 (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right]$$

where:

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

The procedure is as follows:

a) Calculate the value of $\frac{(\Delta\theta + \Delta\theta_d - \Delta\theta_s)}{(\Delta\theta_s)^{5/4}}$ using the formula:

$$\frac{(\Delta\theta + \Delta\theta_d - \Delta\theta_s)}{(\Delta\theta_s)^{5/4}} = \frac{\pi D_e h}{(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \left[\frac{T_1}{n} + T_2 (1 + \lambda_1) + T_3 (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right]$$

b) Locate the line on the graph of Figure 7, page 61, with the value of a) above as ordinate, and then locate the point on this line for the appropriate value of $\Delta\theta + \Delta\theta_d = \text{constant}$.

c) Read off the abscissa of this point to obtain $(\Delta\theta_s)^{1/4}$.

9.2 Single isolated buried cable

$$T_4 = 0.366 \varrho_T \log_{10} \left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right)$$

where:

ϱ_T = the thermal resistivity of the soil, deg C cm/W

$u = \frac{L}{r_e}$

L = distance from the surface of the ground to the cable axis, cm

r_e = external radius of the cable, cm

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

$$T_4 = 0.366 \varrho_T \log_{10} (2u)$$

9.3 Groupe de câbles enterrés (non jointifs)

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

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

9.3.1 Câbles inégalement chargés

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

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

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

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

où:

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

$$\Delta\theta_{kp} = 0,366 \varrho_T W_k \log_{10} \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right)$$

Les distances d_{pk} et d'_{pk} sont mesurées du centre du câble p au centre du câble k et au centre du câble symétrique de k par rapport à la surface du sol (voir figure 1, page 55).

La valeur de $\Delta\theta$ figurant dans l'équation du courant admissible de l'article 3 est alors minorée de la quantité $\Delta\theta_p$ et la charge dans le câble p est calculée avec la valeur de T_4 correspondant au câble p supposé seul.

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

9.3.2 Câbles identiques également chargés

Le deuxième cas est celui d'un groupe de câbles identiques et également chargés pour lesquels le courant admissible sera déterminé par le câble le plus chaud. Il est en général possible, d'après la configuration de l'installation, de déterminer ce câble et de ne faire le calcul que pour celui-ci. En cas de difficulté, on peut avoir à faire le calcul pour un autre câble du groupe. La méthode de calcul consiste à utiliser une valeur modifiée de T_4 tenant compte de l'échauffement mutuel des câbles du groupe et à ne plus modifier la valeur de $\Delta\theta$ dans l'équation de l'article 3.

9.3 Group of buried cables (not touching)

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

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

9.3.1 Unequally loaded cables

The method suggested for groups of unequally loaded dissimilar cables is to calculate the temperature rise at the surface of the cable under consideration caused by the other cables of the group, and to subtract this rise from the value of $\Delta\theta$ used in the equation for the rated current in Clause 3. An estimate of the power dissipated per unit length of each cable must be made beforehand, and this can be subsequently amended as a result of the calculation where this becomes necessary.

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

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

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

where:

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

$$\Delta\theta_{kp} = 0.366 \rho_T W_k \log_{10} \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right)$$

The distances d_{pk} and d'_{pk} are measured from the centre of the p^{th} cable to the centre of cable k , and to the centre of the reflection of cable k in the ground-air surface respectively (see Figure 1, page 55).

The value of $\Delta\theta$ in the equation for the rated current in Clause 3 is then reduced by the amount $\Delta\theta_p$ and the rating for the p^{th} cable is determined using a value for T_4 corresponding to an isolated cable at position p .

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

9.3.2 Equally loaded identical cables

The second type of grouping is where the rating of a number of equally loaded identical cables is determined by the rating for the hottest cable. It is usually possible to decide from the configuration of the installation which cable will be the hottest, and to calculate the rating for this one. In cases of difficulty, a further calculation for another cable may be necessary. The method is to calculate a modified value of T_4 which takes into account the mutual heating of the group and to leave unaltered the value of $\Delta\theta$ used in the rating equation of Clause 3.

La valeur modifiée de la résistance thermique externe T_4 pour le $p^{\text{ième}}$ câble est donnée par :

$$T_4 = 0,366 \varrho_T \log_{10} \left\{ \left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right) \left[\left(\frac{d'_{p1}}{d_{p1}} \right) \left(\frac{d'_{p2}}{d_{p2}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pq}}{d_{pq}} \right) \right] \right\}$$

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

Les distances d_{pk} , etc. sont les mêmes que celles indiquées par la figure 1, page 55, pour la première méthode.

L'expression simplifiée, $2u$, peut être utilisée à la place de $u + (\sqrt{u^2 - 1})$ si les conditions nécessaires sont remplies (voir paragraphe 9.2).

Pour des configurations de câbles simples, cette formule peut être considérablement simplifiée, comme l'indique l'exemple ci-dessous :

Dans le cas pratique de trois câbles également chargés, posés en nappe horizontale à distance égale, la formule précédente peut s'écrire :

$$T_4 = 0,366 \varrho_T \left[\log_{10} (2u) + \log_{10} \left(\frac{4L^2 + s_1^2}{s_1^2} \right) \right]$$

où :

$$u = \frac{L}{r_e}$$

L = distance de la surface du sol à l'axe du câble, cm

r_e = rayon extérieur du câble, cm

s_1 = distance entre axes de deux câbles voisins, cm

La valeur de T_4 est celle correspondant au câble central du groupe et à introduire directement dans les équations de l'article 3, sans modification.

9.4 Câbles enterrés posés en trèfle (jointifs)

Pour des câbles uniformément chargés, posés en trèfle :

$$T_4 = 0,366 \varrho_T [\log_{10} (2u) + 2 \log_{10} u]$$

où :

$$u = \frac{L}{r_e}$$

L est mesurée à partir du centre du groupe en trèfle et r_e est le rayon d'un câble. T_4 est la résistivité 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.

9.5 Tuyaux enterrés

La résistance thermique externe des conduites enterrées utilisées pour les câbles en tuyaux est calculée comme pour les câbles ordinaires, en utilisant la formule du paragraphe 9.2. Dans ce cas, la profondeur de pose L est mesurée à partir du centre du tuyau et r_e est le rayon extérieur du tuyau, y compris le revêtement anti-corrosion.

9.6 Câbles en caniveaux enterrés

a) Caniveaux enterrés remplis de sable

Les caractéristiques thermiques du sable et du caniveau étant en général voisines de celles du sol, on fait le calcul comme si ces câbles étaient directement enterrés.

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

$$T_4 = 0.366 \rho_T \log_{10} \left\{ \left(u + \sqrt{u^2 - 1} \right) \left[\left(\frac{d'_{p1}}{d_{p1}} \right) \left(\frac{d'_{p2}}{d_{p2}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right) \dots \left(\frac{d'_{pq}}{d_{pq}} \right) \right] \right\}$$

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, page 55, for the first method.

The simpler version, $2u$, may be used instead of the expression in the first bracket in the logarithm, if suitable (see Sub-clause 9.2).

For simple configurations of cables, this formula may be simplified considerably. An example of this follows:

In the practical case of three equally loaded cables, laid in a horizontal plane, equally spaced apart, the preceding formula can be written:

$$T_4 = 0.366 \rho_T \left[\log_{10} (2u) + \log_{10} \left(\frac{4L^2 + s_1^2}{s_1^2} \right) \right]$$

where:

$$u = \frac{L}{r_e}$$

L = distance from the surface of the ground to the cable axis, cm

r_e = external radius of one cable, cm

s_1 = axial separation between adjacent cables, cm

The value of T_4 is that of the centre cable of the group and is used directly in the equations in Clause 3 as they stand.

9.4 Buried cables in trefoil (touching)

For the trefoil arrangement of equally loaded cables:

$$T_4 = 0.366 \rho_T [\log_{10} (2u) + 2 \log_{10} u]$$

where:

$$u = \frac{L}{r_e}$$

Here L is measured to the centre of the trefoil group and r_e is the radius 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.

9.5 Buried pipes

The external thermal resistance of buried pipes used for pipe-type cables is calculated as for ordinary cables, using the formula in Sub-clause 9.2. In this case, the depth of laying L is measured to the centre of the pipe and r_e is the external radius of the pipe, including anti-corrosion covering.

9.6 Cables in buried troughs

a) Buried troughs filled with sand

The thermal characteristics of the sand and trough are generally similar to those of the soil and the calculation is made as though the cables were buried direct.

b) Caniveaux remplis de sable dont le couvercle affleure la surface du sol

A l'étude.

c) 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:

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

où:

W_{TOT} = puissance totale dissipée dans le caniveau par mètre de longueur, W/m

p = partie du périmètre qui participe à la dissipation de chaleur, m

Note. - La validité de cette formule est à l'étude.

On ne doit pas introduire dans la valeur de p les parties du périmètre exposées aux rayons solaires. Le calcul de l'échauffement d'un câble particulier du caniveau est identique à celui d'un câble à l'air libre (voir paragraphe 9.1), mais la température ambiante doit être augmentée de $\Delta\theta_{tr}$.

9.7 Câbles en fourreaux ou en tuyaux

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

- 1) La résistance thermique de l'intervalle d'air entre la surface du câble et la surface intérieure du fourreau, T_4' .
- 2) La résistance thermique du matériau constituant le fourreau, T_4'' . La résistance thermique d'un tuyau métallique est négligeable.
- 3) La résistance thermique entre la surface extérieure du fourreau et le milieu ambiant, T_4''' .

La valeur de T_4 qui doit figurer dans l'équation donnant l'intensité admissible (article 2) est la somme de ces trois termes:

$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4'''.$$

9.8 Résistance thermique entre câble et fourreau, T_4'

Pour les câbles de diamètre compris entre 2,5 cm et 10 cm posés en fourreaux, on utilisera la formule indiquée ci-après. On l'utilisera également pour le calcul de la résistance thermique de l'espace compris entre les phases et la surface du tuyau d'un câble en tuyau (voir paragraphe 8.4 b)), quand le diamètre équivalent des trois phases dans le tuyau est compris entre 7,5 cm et 12,5 cm. Le diamètre équivalent est défini plus loin:

$$T_4' = \frac{100 A}{1 + (B + C \theta_m) D_e}$$

où:

A =

B =

C =

} constantes dépendant des installations, dont les valeurs sont données dans le tableau V

D_e = diamètre extérieur du câble, cm

Lorsque la formule est appliquée aux câbles en tuyaux (voir paragraphe 8.4 b)), D_e est le diamètre équivalent du groupe de phases, soit:

- deux phases: $D_e = 1,65 \times$ diamètre extérieur d'une phase, cm

- trois phases: $D_e = 2,15 \times$ diamètre extérieur d'une phase, cm

- quatre phases: $D_e = 2,50 \times$ diamètre extérieur d'une phase, cm

θ_m = 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