

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

Withdrawn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

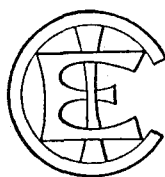
Publication 287

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 feuillets 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 troughs	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
France	Soviétiques
Italie	Yougoslavie

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 fretage 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_{du}	= 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_{du}	= 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_a	= 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
$\text{tg } \delta$ ($\tan \delta$)	= 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
$\Delta\theta_{duct}$	= 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:

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

où:

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

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	Séché 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 :

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

où:

d_i 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_c = 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.

$d_c = d_x$ = 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:

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

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

$$E_0 = \text{tension par rapport à la terre, V}$$

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:

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

$$D_1 = \text{diamètre extérieur de l'isolant, cm}$$

$$d_c = \text{diamètre du conducteur comprenant la présence d'un écran, s'il y a lieu, cm}$$

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.

- 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.
- 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.
- 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.