

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60853-2

Première édition
First edition
1989-07

**Calcul des capacités de transport des câbles
pour les régimes de charge cycliques et de
surcharge de secours**

Deuxième partie:

Régime cyclique pour des câbles de tensions
supérieures à 18/30 (36) kV et régimes
de secours pour des câbles de toutes tensions

**Calculation of the cyclic and emergency
current rating of cables**

Part 2:

Cyclic rating of câbles greater than 18/30 (36) kV
and emergency ratings for câbles of all voltages



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60853-2: 1989

Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Validité de la présente publication

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

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- «Site web» de la CEI*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement
(Catalogue en ligne)*
- **Bulletin de la CEI**
Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Validity of this publication

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

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates
(On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

* See web site address on title page.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60853-2

Première édition
First edition
1989-07

**Calcul des capacités de transport des câbles
pour les régimes de charge cycliques et de
surcharge de secours**

Deuxième partie:

Régime cyclique pour des câbles de tensions
supérieures à 18/30 (36) kV et régimes
de secours pour des câbles de toutes tensions

**Calculation of the cyclic and emergency
current rating of cables**

Part 2:

Cyclic rating of cables greater than 18/30 (36) kV
and emergency ratings for cables of all voltages

© IEC 1989 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 photo-
copie 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.

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE **XA**

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

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	6
PRÉFACE	6

SECTION UN — DONNÉES DE BASE

Articles

1. Introduction et domaine d'application	8
1.1 Généralités	8
1.2 Prise en compte de la capacité thermique du câble	8
1.3 Conditions permettant de négliger la capacité thermique	10
1.4 Indication des articles applicables aux types particuliers de câbles	12
1.4.1 Calcul des réponses transitoires et des capacités de transport en régime de secours	12
1.4.2 Capacités de transport en régime cyclique	12
2. Symboles	14
3. Plan de la présente norme	18

SECTION DEUX — RÉPONSE TRANSITOIRE EN TEMPÉRATURE

4. Réponse transitoire en température à l'application d'un échelon de courant	18
4.1 Aspects généraux	18
4.1.1 Données de base	18
4.1.2 Critères permettant l'utilisation d'un facteur d'approche égal à l'unité	20
4.1.3 Représentation du câble	20
4.1.4 Critères de choix du circuit thermique	22
4.2 Calcul des réponses transitoires partielles pour les longues durées ($> \frac{1}{3} T \cdot Q$) et les régimes de charge cycliques	24
4.2.1 Représentation de l'isolant	24
4.2.2 Représentation du câble	26
4.2.3 Calcul de la réponse transitoire partielle du câble	32
4.2.4 Calcul de la réponse transitoire partielle de l'environnement des câbles	32
4.3 Calcul des réponses transitoires partielles pour les courtes durées ($\leq \frac{1}{3} T \cdot Q$)	34
4.3.1 Représentation de l'isolant (câbles unipolaires et tripolaires)	34
4.3.2 Représentation du câble	36
4.3.3 Calcul de la réponse transitoire partielle du câble	40
4.3.4 Calcul de la réponse transitoire partielle de l'environnement des câbles	42
4.4 Calcul de la réponse transitoire complète en température	42
4.4.1 Réponse transitoire en température	42
4.4.2 Correction à la réponse transitoire en température pour tenir compte de la variation des pertes dans l'âme avec la température (régimes de secours seulement)	44
4.4.3 Réponse transitoire en température causée par l'application brusque de tension (régime transitoire dû aux pertes diélectriques)	44

SECTION TROIS — CAPACITÉS DE TRANSPORT EN RÉGIME CYCLIQUE

5. Calcul du facteur de capacité de transport cyclique (M)	46
5.1 Généralités	46
5.2 Calcul du facteur de capacité de transport cyclique (en tenant compte de la capacité thermique du câble)	48
5.2.1 Cycle de charge quelconque de forme connue	48
5.2.2 Cycle de charge plafonné à une valeur constante	50
5.2.3 Cycle de charge de forme inconnue mais dont le facteur de charge des pertes (μ) est connu	50
6. Calcul du facteur de charge des pertes (μ)	50
7. Calcul de $\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)}$	52
7.1 Un seul câble tripolaire	52
7.2 Un seul circuit	54
7.3 Groupe de « N » câbles ayant des pertes égales; câbles ou fourreaux non jointifs	54
7.4 Groupe de « N » circuits, composé de trois câbles unipolaires ou fourreaux identiques et jointifs, tous les câbles ayant des pertes égales	56

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
PREFACE	7

SECTION ONE — BACKGROUND

Clause

1. Introduction and scope	9
1.1 General	9
1.2 Inclusion of cable thermal capacitance	9
1.3 Conditions where thermal capacitance can be neglected	11
1.4 Guide to clauses applicable to particular types of cable	13
1.4.1 Transient calculation and emergency rating	13
1.4.2 Cyclic rating	13
2. Symbols	15
3. Layout of this standard	19

SECTION TWO — TRANSIENT TEMPERATURE RESPONSE

4. Transient temperature response to a step function of current	19
4.1 General aspects	19
4.1.1 Background	19
4.1.2 Criteria for the attainment factor to be unity	21
4.1.3 Representation of the cable	21
4.1.4 Criteria for selecting the thermal circuit	23
4.2 Calculation of partial transients for long durations ($> \frac{1}{3} T \cdot Q$) and cyclic rating	25
4.2.1 Representation of the dielectric	25
4.2.2 Representation of the cable	27
4.2.3 Calculation of cable partial transient	33
4.2.4 Calculation of cable environment partial transient	33
4.3 Calculation of partial transients for short duration ($\leq \frac{1}{3} T \cdot Q$)	35
4.3.1 Representation of the dielectric (single and 3-core cables)	35
4.3.2 Representation of the cable	37
4.3.3 Calculation of cable partial transient	41
4.3.4 Calculation of cable environment partial transient	43
4.4 Calculation of the complete temperature transient	43
4.4.1 Transient temperature response	43
4.4.2 Correction to transient temperature response for variation in conductor losses with temperature (emergency ratings only)	45
4.4.3 Transient temperature response caused by sudden application of voltage (transient due to dielectric loss)	45

SECTION THREE — CYCLIC RATINGS

5. Computation of the cyclic rating factor (M)	47
5.1 General	47
5.2 Calculation of cyclic rating factor (including cable thermal capacitance)	49
5.2.1 Any load cycle of known shape	49
5.2.2 Flat top load cycle	51
5.2.3 Load cycle of unknown shape but with a known loss-load factor (μ)	51
6. Calculation of loss-load factor (μ)	51
7. Calculation of $\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)}$	53
7.1 Single isolated 3-core cable	53
7.2 Single isolated circuit	55
7.3 Group of "N" cables with equal losses; cables or ducts not touching	55
7.4 Group of "N" circuits, each of three single-core identical touching cables or ducts, all cables having equal losses	57

Articles	SECTION QUATRE — CAPACITÉS DE TRANSPORT EN RÉGIME DE SECOURS	Pages
8.	Calcul des capacités de transport en régime de secours	56
8.1	Circuits thermiquement séparés	56
8.2	Groupes de circuits	58
9.	Bibliographie	60
ANNEXE A	— Réduction d'un circuit thermique multiple à un circuit à deux cellules	62
ANNEXE B	— Variation de température transitoire moyenne à travers l'isolant ou à travers l'huile de remplissage des tuyaux	66
ANNEXE C	— Méthode applicable à différentes valeurs de résistivité du sol, diffusivité thermique du sol et profondeur de pose	70
ANNEXE D	— Diffusivité du sol	72
ANNEXE E	— Constantes physiques des matériaux	74
ANNEXE F	— Exemples	78
FIGURES		97

Clause	SECTION FOUR — EMERGENCY RATINGS	Page
8. Calculation of emergency ratings		57
8.1 Thermally isolated circuits		57
8.2 Groups of circuits		59
9. Bibliography		61
APPENDIX A — Reduction of a multiple thermal circuit to one having two sections		63
APPENDIX B — Transient average temperature variation through dielectric or through oil filling in pipes		67
APPENDIX C — Method for dealing with different soil resistivities, thermal diffusivities and depths of laying		71
APPENDIX D — Diffusivity of soil		73
APPENDIX E — Physical constants of materials		75
APPENDIX F — Examples		79
FIGURES		97

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**CALCUL DES CAPACITÉS DE TRANSPORT DES CÂBLES
POUR LES RÉGIMES DE CHARGE CYCLIQUES
ET DE SURCHARGE DE SECOURS**

**Deuxième partie: Régime cyclique pour des câbles de tensions supérieures
à 18/30 (36) kV et régimes de secours pour des câbles de toutes tensions**

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PRÉFACE

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

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapport de vote
20A(BC)104	20A(BC)111

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

Les publications suivantes de la CEI sont citées dans la présente norme:

- Publications n°s 287 (1982): Calcul du courant admissible dans les câbles en régime permanent (facteur de charge 100%).
 853-1 (1985): Calcul des capacités de transport des câbles pour les régimes de charge cycliques et de surcharge de secours, Première partie: Facteurs de capacité de transport cyclique pour des câbles de tensions inférieures ou égales à 18/30 (36) kV.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**CALCULATION OF THE CYCLIC AND
EMERGENCY CURRENT RATING OF CABLES****Part 2: Cyclic rating of cables greater than 18/30 (36) kV and
emergency ratings for cables of all voltages**

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules insofar as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

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

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

Six Months' Rule	Report on Voting
20A(CO)104	20A(CO)111

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

The following IEC publications are quoted in this standard:

- Publications Nos. 287 (1982): Calculation of the continuous current rating of cables (100% Load Factor).
853-1 (1985): Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables, Part 1: Cyclic rating factor for cables up to and including 18/30 (36) kV.

CALCUL DES CAPACITÉS DE TRANSPORT DES CÂBLES POUR LES RÉGIMES DE CHARGE CYCLIQUES ET DE SURCHARGE DE SECOURS

Deuxième partie: Régime cyclique pour des câbles de tensions supérieures à 18/30 (36) kV et régimes de secours pour des câbles de toutes tensions

SECTION UN — DONNÉES DE BASE

1. Introduction et domaine d'application

1.1 Généralités

La présente norme fournit des méthodes manuelles de calcul des facteurs de capacité de transport en régime cyclique pour des câbles dont la capacité thermique interne ne peut pas être négligée; il s'agit généralement de câbles de tensions supérieures à 18/30 (36) kV. Cette norme donne également une méthode de calcul des capacités de transport en régime de secours pour des câbles de tout niveau de tension. La première partie de la norme traite des facteurs de capacité de transport cyclique de câbles de tensions inférieures ou égales à 18/30 (36) kV dont la capacité thermique interne peut être négligée.

Dans les cas où cette capacité thermique interne doit être prise en compte, le calcul de la réponse transitoire en température du câble et de son environnement est nécessaire pour déterminer les facteurs de capacité de transport cyclique.

Les formules recommandées dans cette norme contiennent des grandeurs qui varient avec la constitution du câble et les matériaux utilisés. Les valeurs données dans les tableaux sont soit approuvées au plan international, par exemple les coefficients de température de la résistance, soit généralement utilisées dans la pratique, par exemple les résistivités thermiques et les capacités thermiques volumiques des matériaux. Afin que les résultats uniformes et comparables puissent être obtenus, il est recommandé que le calcul des capacités de transport pour les régimes de charge cycliques et de surcharge de secours soit effectué avec les valeurs indiquées dans la présente norme. Cependant, lorsque l'on sait avec certitude que d'autres valeurs sont plus appropriées aux matériaux et à la constitution d'un câble donné, elles peuvent être utilisées, à condition de l'indiquer lors du calcul des intensités de courant en régimes cycliques et de secours correspondant à ces valeurs.

Jusqu'à présent, on n'a pas tenu compte des effets éventuels de la migration de l'humidité sur la résistivité thermique du sol. Cette approche est en accord avec celle qui a déjà été utilisée dans la Publication 287 de la CEI pour le calcul de capacités de transport en régime permanent dans un sol uniforme. Des méthodes permettant de tenir compte des zones du sol ayant des caractéristiques thermiques différentes ainsi que de l'assèchement du sol sont à l'étude.

La façon de tenir compte de la variation de la résistance de l'âme avec la température est indiquée plus loin.

1.2 Prise en compte de la capacité thermique du câble

Dans le cas où la capacité thermique du câble ne peut pas être négligée, il est nécessaire de calculer la réponse interne transitoire en température du ou des câbles. Les méthodes manuelles recommandées pour ce calcul sont les suivantes:

CALCULATION OF THE CYCLIC AND EMERGENCY CURRENT RATING OF CABLES

Part 2: Cyclic rating of cables greater than 18/30 (36) kV and emergency ratings for cables of all voltages

SECTION ONE — BACKGROUND

1. Introduction and scope

1.1 *General*

This standard gives manual methods for calculating cyclic rating factors for cables whose internal thermal capacitance cannot be neglected; in general this applies to cables for voltages greater than 18/30 (36) kV. It also gives a method for calculating the emergency rating for cables of any voltage. Part I of the standard dealt with cyclic rating factors for cables of voltages not greater than 18/30 (36) kV where the internal thermal capacitance could be neglected.

To determine the cyclic rating factors where the internal thermal capacitance cannot be neglected it is necessary to calculate the transient temperature response of the cable and its environment.

The formulae recommended in this standard contain quantities which vary with cable design and materials used. The values given in the tables are either internationally agreed, for example, resistance temperature coefficients, or are those which are generally accepted in practice, for example, thermal resistivities and volumetric specific heats of materials. In order that uniform and comparable results may be obtained, the cyclic and/or emergency current ratings should be calculated with the values given in this standard. However, where it is known with certainty that other values are more appropriate to the materials and design, then these may be used, and the corresponding cyclic/emergency current rating declared in addition, provided that the different values are quoted.

No account has been taken at present of possible effects of moisture migration on the thermal resistivity of the soil. This is in line with the approach already adopted for the calculation of steady state ratings in uniform soil as given in IEC Publication 287. Methods for dealing with regions having different thermal characteristics and with drying out of the soil are under consideration.

A means of incorporating the effect of change in conductor resistance with temperature is included.

1.2 *Inclusion of cable thermal capacitance*

When a cable thermal capacitance cannot be neglected, it is necessary to calculate the internal transient temperature response of the cable(s). The manual methods recommended for this computation are:

a) Calcul des facteurs de capacité de transport cyclique:

L'utilisation de circuits équivalents à constantes thermiques localisées pour représenter les câbles est uniquement applicable pour des durées supérieures à environ 1 h [1]*. (Une telle limitation est sans importance pour le calcul des régimes correspondant à des charges cycliques journalières.) Cette méthode peut être utilisée soit manuellement, soit sur ordinateur pour tous les types de câbles.

Note. — Les régimes transitoires thermiques d'un câble peuvent également être calculés au moyen d'une méthode numérique dans laquelle les constituants du câble peuvent être séparés en plusieurs éléments concentriques cylindriques, de manière à atteindre une précision satisfaisante pour une période de temps quelconque [2]*. Cette méthode s'applique uniquement aux câbles unipolaires et n'entre pas dans le domaine de cette norme.

Dans la présente norme, les méthodes de calcul de capacités de transport cycliques s'appliquent aux câbles enterrés dans le sol, soit directement soit en fourreaux, lorsque ces câbles supportent des charges variant de manière cyclique sur une période de 24 h, la forme de chaque cycle journalier étant sensiblement identique. Pour ces méthodes d'installation, on a admis que la tension a été appliquée pendant une durée suffisante pour que l'échauffement de l'âme dû aux pertes diélectriques ait atteint son état stationnaire. L'échauffement total de l'âme au-dessus de la température ambiante est alors la somme de l'échauffement stationnaire dû aux pertes diélectriques (tel qu'il est donné dans la Publication 287 de la CEI) et des variations de température transitoires dues aux variations du courant. Pour le calcul du facteur de capacité de transport cyclique, il suffit d'effectuer séparément le calcul des variations de température transitoires dues aux variations de courant.

En ce qui concerne les câbles posés à l'air libre, la température de l'âme suit les variations de courant de charge de manière suffisamment rapide pour que les cycles journaliers habituels ne permettent pas des charges dont la valeur de pointe soit supérieure à la valeur en régime permanent.

Des valeurs numériques sont données pour l'évaluation des facteurs de capacité de transport cyclique pour des câbles enterrés à 1 m de profondeur dans un sol dont la diffusivité est de $0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Des méthodes permettant de prendre en compte d'autres conditions sont également indiquées. On suppose que les propriétés du sol sont constantes à la fois dans le temps et dans l'espace.

b) Calcul des facteurs de capacité de transport en régime de secours:

- i) Pour des durées supérieures à 1 h environ, on utilise la même méthode que pour les facteurs de capacité de transport cyclique (voir le point a) ci-dessus).
- ii) Pour des durées allant de 10 min à moins de 1 h, on utilise une version modifiée du point a), avec un circuit thermique plus détaillé [3]*.

Note. — Voir également la note du point a).

Les méthodes de calcul des capacités de transport pour les régimes de secours s'appliquent aux câbles enterrés dans le sol, soit directement, soit en fourreaux, et aux câbles posés à l'air libre. Il est prévu de tenir compte du régime transitoire dû à l'application soudaine d'une tension (à savoir le régime transitoire dû aux pertes diélectriques).

Les méthodes de calcul des facteurs de capacité de transport en régime de secours sont prévues pour des charges ne dépassant pas environ 2,5 fois le courant de la pleine charge nominale (facteur de charge 100%).

1.3 Conditions permettant de négliger la capacité thermique

Si les durées considérées sont assez longues comparées à la constante de temps thermique du câble, la capacité thermique du câble peut alors être négligée. Cela s'applique en pratique à tous les

*Les chiffres entre crochets se rapportent à la «Bibliographie», article 9, page 60.

a) For the computation of cyclic rating factors:

The use of analogous lumped thermal constant circuits to represent the cables, applicable only where time periods greater than about 1 h are involved [1]*. (For the calculation of ratings for daily load cycles such a limitation is not important.) This method can be used manually or on a computer and is capable of dealing with all types of cable.

Note. — The cable thermal transient can also be calculated by a numerical method, where the division of cable components into numerous concentric cylindrical elements can be arranged so as to yield adequate accuracy for any time period [2]*. This method applies to single-core cables only and is outside the scope of this standard.

The methods for cyclic ratings in this standard apply to cables buried in the ground, either directly or in ducts, when carrying a load which varies cyclically over a 24 h period, the shape of each daily cycle being substantially the same. For these installation methods it has been assumed that the voltage had been applied for a sufficiently long time for the conductor temperature rise due to dielectric loss to have reached a steady state. The total temperature rise of the conductor above ambient is then the sum of the steady state temperature rise due to the dielectric loss (as given by IEC Publication 287) and the transient temperature variations due to change of current. For cyclic rating factor purposes it is sufficient to independently calculate the transient temperature variations due to changes in current.

For cables in air, the conductor temperature follows changes in load current sufficiently rapidly so that the usual daily cycles do not permit peak loads greater than the steady-state value.

Numerical data are provided for the evaluation of cyclic rating factors for cables buried at 1 m depth in soil having a diffusivity of $0.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, but methods for dealing with other conditions are included. It is assumed that the soil properties are constant in both time and space.

b) For the computation of emergency rating factors:

- i) For time periods longer than about 1 h, use the same method as for cyclic rating factor purposes (see Item a) above).
- ii) For time periods less than 1 h down to 10 min, a modified version of Item a) is used having a more detailed thermal circuit [3]*.

Note. — See also note under Item a).

The methods for calculating the emergency ratings apply to cables buried in the ground, either directly or in ducts, and to cables in air. Provision is made for incorporating the transient caused by a sudden application of voltage (i.e. the transient due to dielectric loss).

Methods for calculating emergency rating factors are intended for emergency loads not greater than about 2.5 times rated full load current (100% load factor).

1.3 Conditions where thermal capacitance can be neglected

If the time periods being considered are sufficiently long compared with the thermal time constant of the cable, then the cable thermal capacitance may be neglected. In practice this applies to all

* The figures in square brackets refer to "Bibliography", Clause 9, page 61.

câbles de tensions assignées inférieures ou égales à 18/30 (36) kV et permet l'utilisation d'une procédure simplifiée. Cette procédure est détaillée dans la première partie de la norme.

On considère que la capacité thermique des câbles peut être négligée pour:

- a) toutes les sections d'âme et tous les types de câbles de tensions assignées inférieures ou égales à 18/30 (36) kV, avec un cycle de charge de forme quelconque;
- b) tous les câbles auxquels les conditions suivantes s'appliquent simultanément:
 - i) le facteur de charge des pertes μ n'est pas inférieur à 0,65;
 - ii) la moyenne des ordonnées Y_0 , Y_1 et Y_2 n'est pas inférieure à 0,9 (voir article 6);
 - iii) la moyenne de Y_3 , Y_4 et Y_5 n'est pas inférieure à 0,7 (voir article 6).
- c) les câbles à pression sous gaine métallique auxquels les conditions suivantes s'appliquent simultanément:
 - i) le facteur de charge des pertes μ n'est pas inférieur à 0,4;
 - ii) la moyenne des ordonnées Y_0 , Y_1 et Y_2 n'est pas inférieure à 0,9 (voir article 6);
 - iii) la moyenne de Y_3 , Y_4 et Y_5 n'est pas inférieure à 0,7 (voir article 6).

1.4 Indication des articles applicables aux types particuliers de câbles

1.4.1 Calcul des réponses transitoires et des capacités de transport en régime de secours

Type de câble	Calcul des réponses transitoires		Régime de secours	
	Durée du régime transitoire	Paragraphes	Durée du régime transitoire	Articles et paragraphes
Tous types de câbles unipolaires	$> \frac{1}{3}T \cdot Q$	4.1, 4.2, 4.4	$> \frac{1}{3}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.2, 4.4
	$\leq \frac{1}{3}T \cdot Q$	4.1, 4.3, 4.4	$\leq \frac{1}{3}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.3, 4.4
Câbles en tuyau	$> \frac{1}{3}T \cdot Q$	4.1, 4.2, 4.4	$> \frac{1}{3}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.2, 4.4
	$\leq \frac{1}{3}T \cdot Q$	4.1, 4.3, 4.4	$\leq \frac{1}{3}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.3, 4.4
Câbles tripolaires (excepté câbles en tuyau)	$> \frac{1}{2}T \cdot Q$	4.1, 4.2, 4.4	$> \frac{1}{2}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.2, 4.4
	(totalité du câble) $\leq T \cdot Q$	4.1, 4.3, 4.4	(totalité du câble) $\leq T \cdot Q$	8, 4.1, 4.3, 4.4
	(un conducteur isolé) intermédiaire	4.1, 4.2, 4.3, 4.4	(un conducteur isolé) intermédiaire	8, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4

Note. — T = résistance thermique d'un câble ou d'un conducteur isolé selon le cas considéré

Q = capacité thermique d'un câble ou d'un conducteur isolé selon le cas considéré

1.4.2 Capacités de transport en régime cyclique

Les articles et paragraphes à appliquer sont 4.1, 4.2, 4.4, 5, 6 et 7, ainsi que ceux qui sont indiqués ci-dessous.

Type de câble	Type de cycle de charge	Paragraphes
Tous types	Quelconque de forme connue	5.2.1
	Plafonné à une valeur constante	5.2.2
	Facteur de charge des pertes seul connu	5.2.3

cables up to and including 18/30 (36) kV and allows a simplified procedure to be used. Full details of this simplified procedure are given in Part I of this standard.

It has been estimated that cable thermal capacitance can be neglected for:

- a) all conductor cross-sections and types of cable for nominal voltages up to and including 18/30 (36) kV, for any shape of load cycle;
- b) all cables where the following conditions apply together:
 - i) the loss-load factor μ is not less than 0.65;
 - ii) the average of the ordinates Y_0 , Y_1 and Y_2 is not less than 0.9 (see Clause 6);
 - iii) the average of Y_3 , Y_4 and Y_5 is not less than 0.7 (see Clause 6).
- c) self-contained cables where the following conditions apply together:
 - i) the loss-load factor μ is not less than 0.4;
 - ii) the average of the ordinates Y_0 , Y_1 and Y_2 is not less than 0.9 (see Clause 6);
 - iii) the average of Y_3 , Y_4 and Y_5 is not less than 0.7 (see Clause 6).

1.4 Guide to clauses applicable to particular types of cable

1.4.1 Transient calculation and emergency rating

Cable type	Transient calculation		Emergency rating	
	Duration of transient	Sub-clauses	Duration of transient	Clauses and sub-clauses
All types of single-core cables	$> \frac{1}{3}T \cdot Q$	4.1, 4.2, 4.4	$> \frac{1}{3}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.2, 4.4
	$\leq \frac{1}{3}T \cdot Q$	4.1, 4.3, 4.4	$\leq \frac{1}{3}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.3, 4.4
Pipe-type cables	$> \frac{1}{3}T \cdot Q$	4.1, 4.2, 4.4	$> \frac{1}{3}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.2, 4.4
	$\leq \frac{1}{3}T \cdot Q$	4.1, 4.3, 4.4	$\leq \frac{1}{3}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.3, 4.4
Three-core cables (except pipe type)	$> \frac{1}{2}T \cdot Q$	4.1, 4.2, 4.4	$> \frac{1}{2}T \cdot Q$	8, 4.1, 4.2, 4.4
	(whole cable) $\leq T \cdot Q$	4.1, 4.3, 4.4	(whole cable) $\leq T \cdot Q$	8, 4.1, 4.3, 4.4
	one core (intermediate)	4.1, 4.2, 4.3, 4.4	one core (intermediate)	8, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4

Note. — T = thermal resistance of cable or one core as appropriate
 Q = thermal capacitance of cable or one core as appropriate

1.4.2 Cyclic rating

The applicable clauses and sub-clauses are 4.1, 4.2, 4.4, 5, 6 and 7 and as noted below.

Cable type	Load cycle type	Sub-clauses
All types	Any known shape	5.2.1
	Flat top	5.2.2
	Where only the loss-load factor is known	5.2.3

2. Symboles

Symboles	Définitions	Unités
D_e	= diamètre extérieur du revêtement du câble	m
D_i	= diamètre extérieur de l'enveloppe isolante	m
D_s	= diamètre intérieur du revêtement du câble	m
$-Ei(-x)$	= fonction exponentielle intégrale	
F	= coefficient d'échauffement mutuel d'un groupe de câbles	
I	= intensité de courant admissible pour une condition donnée (normalisée)	A
I_1	= courant constant parcourant le câble avant l'application d'une charge de secours	A
I_2	= courant de surcharge de secours qui peut être appliqué pendant un temps t tel que l'échauffement de l'âme au-dessus de la température ambiante soit $\theta_{\max}$ à la fin de la période de surcharge	A
$I_{\max}$	= courant le plus élevé du cycle de charge journalier: utilisé comme dénominateur lors de la détermination des ordonnées du cycle de charge des pertes	A
I_R	= courant nominal permanent (facteur de charge 100%) tel que l'âme atteigne, sans la dépasser, sa température maximale admissible	A
L	= profondeur de pose mesurée au centre d'un câble ou d'un fourreau	m
M	= facteur de capacité de transport cyclique	
N	= nombre de câbles d'un groupe	
M_0, N_0	= coefficients utilisés pour calculer l'échauffement partiel transitoire d'un câble (voir paragraphes 4.2.3 et 4.3.3)	s, s ²
Q	= capacité thermique totale d'un câble	J/m.K
Q_A, Q_B	= éléments du circuit thermique à deux cellules (voir paragraphes 4.2.2 et 4.3.2)	J/m.K
Q_a	= capacité thermique de l'armure	J/m.K
Q_c	= capacité thermique de l'âme	J/m.K
Q_d	= capacité thermique d'un fourreau	J/m.K
Q_f	= capacité thermique des bourrages dans un câble triplomb ou de la matière de remplissage entre conducteurs isolés d'un câble en tuyau à pression de gaz	J/m.K
Q_i	= capacité thermique de l'isolant de chaque conducteur	J/m.K
Q_{il}	= capacité thermique de la première partie de l'enveloppe isolante	J/m.K
Q_{i2}	= capacité thermique de la seconde partie de l'enveloppe isolante	J/m.K
Q_j	= capacité thermique du revêtement extérieur du câble	J/m.K
Q_o	= capacité thermique de l'huile dans un câble en tuyau	J/m.K
Q_p	= capacité thermique d'un tuyau	J/m.K
Q_s	= capacité thermique d'une gaine et de son frettage	J/m.K
R_1	= résistance de l'âme en courant alternatif avant l'application du courant de secours	Ω/m
R_R	= résistance de l'âme en courant alternatif sous le courant nominal permanent I_R , c'est-à-dire à la température maximale admissible à l'âme	Ω/m
$R_{\max}$	= résistance de l'âme en courant alternatif à la fin de la charge de secours	Ω/m
T	= résistance thermique totale d'un câble entre l'âme et la surface extérieure	K.m/W
T_A, T_B, T_C	= éléments du circuit thermique équivalent	K.m/W
T_1	= résistance thermique de l'isolant de chaque conducteur	K.m/W
T_2	= résistance thermique du gaz dans un câble en tuyau à pression de gaz	K.m/W
T_3	= résistance thermique du revêtement extérieur d'un câble	K.m/W
T_4	= résistance thermique extérieure d'un câble ou d'un fourreau	K.m/W
T'_4	= résistance thermique de l'espace d'air dans un fourreau	K.m/W
T''_4	= résistance thermique d'un fourreau	K.m/W
ΔT_4	= résistance thermique extérieure additionnelle causée par l'échauffement dû à d'autres câbles du groupe	K.m/W
T_a, T_b	= résistances thermiques apparentes utilisées pour calculer l'échauffement transitoire partiel du câble (voir paragraphes 4.2.3 et 4.3.3)	K.m/W
T_f	= résistance thermique des bourrages entre conducteurs isolés d'un câble triplomb ou d'un câble en tuyau à pression de gaz	K.m/W
T_o	= résistance thermique de l'huile dans un câble en tuyau	K.m/W
W_c	= pertes dissipées dans une âme ou dans l'âme d'un conducteur équivalent	W/m
W_1	= pertes totales par effet Joule de chaque câble	W/m
W_d	= pertes diélectriques dans l'isolant d'un câble	W/m
$Y_0 \dots Y_{23}$	= ordonnées réduites dans un diagramme en (charges) ² utilisé pour le calcul du facteur de capacité de transport cyclique	
a, b	= coefficients utilisés pour calculer l'échauffement partiel transitoire	1/s
d	= masse volumique du sol à sec	kg/m ³
d_c	= diamètre extérieur de l'âme	m
d_f	= distance du centre du câble le plus chaud pour une source unifilaire représentant l'effet d'échauffement dû à tous les autres câbles d'un groupe	m
d_{pk}	= distance du centre du $p^{\text{ème}}$ câble, dont on détermine la capacité de transport, à un câble adjacent k	m

2. Symbols

Symbol	Definition	Unit
D_e	= external diameter of cable covering	m
D_i	= external diameter of dielectric	m
D_s	= internal diameter of cable covering	m
$-Ei(-x)$	= exponential integral function	
F	= mutual heating coefficient for a group of cables	
I	= permissible current for given (standard) condition	A
I_1	= constant current applied to cable prior to emergency load	A
I_2	= emergency load current which may subsequently be applied for time t so that the conductor temperature rise above ambient at the end of the period of emergency load is $\theta_{\max}$	A
$I_{\max}$	= highest current of daily load cycle: used as denominator when determining loss-load ordinates	A
I_R	= sustained (100% load factor) rated current to attain, but not exceed, the permissible maximum conductor temperature	A
L	= axial depth of burial of a cable or duct	m
M	= cyclic rating factor	
N	= number of cables in a group	
M_o, N_o	= coefficients used for calculating cable partial transient temperature rise (see Sub-clauses 4.2.3 and 4.3.3)	s, s ²
Q	= total thermal capacitance of a cable	J/m.K
Q_A, Q_B	= elements of two part thermal circuit (see Sub-clauses 4.2.2 and 4.3.2)	J/m.K
Q_a	= thermal capacitance of armour	J/m.K
Q_c	= thermal capacitance of conductor	J/m.K
Q_d	= thermal capacitance of a duct	J/m.K
Q_f	= thermal capacitance of filling in S.L type cables, or of filling between cores of a gas-pressure pipe-type cable	J/m.K
Q_i	= thermal capacitance of dielectric per conductor	J/m.K
Q_{i1}	= thermal capacitance of first portion of insulation	J/m.K
Q_{i2}	= thermal capacitance of second portion of insulation	J/m.K
Q_j	= thermal capacitance of outer covering of cable	J/m.K
Q_o	= thermal capacitance of oil in a pipe type cable	J/m.K
Q_p	= thermal capacitance of a pipe	J/m.K
Q_s	= thermal capacitance of sheath and reinforcement	J/m.K
R_1	= A.C. resistance of conductor before application of emergency current	Ω/m
R_R	= A.C. resistance of conductor with sustained application of rated current I_R , i.e. at standard maximum permissible temperature	Ω/m
$R_{\max}$	= A.C. resistance of conductor at end of period of emergency loading	Ω/m
T	= total thermal resistance of a cable from conductor to outer surface	K.m/W
T_A, T_B, T_C	= elements of equivalent thermal circuit	K.m/W
T_1	= thermal resistance of dielectric per conductor	K.m/W
T_2	= thermal resistance of gas in a gas-pressure pipe-type cable	K.m/W
T_3	= thermal resistance of outer covering of a cable	K.m/W
T_4	= external thermal resistance of a cable or a duct	K.m/W
T_4'	= thermal resistance of air space in a duct	K.m/W
T_4''	= thermal resistance of a duct	K.m/W
ΔT_4	= additional external thermal resistance caused by heating from other cables in a group	K.m/W
T_a, T_b	= apparent thermal resistances used to calculate cable partial transient temperature rise (see Sub-clauses 4.2.3 and 4.3.3)	K.m/W
T_f	= thermal resistance of filling between cores of SL type cable and of gas-pressure pipe-type cable	K.m/W
T_o	= thermal resistance of the oil in a pipe-type cable	K.m/W
W_c	= power loss in a conductor or equivalent conductor	W/m
W_1	= total P_R power loss of each cable	W/m
W_d	= power loss in cable dielectric	W/m
$Y_0 \dots Y_{23}$	= scaled ordinate in (load) ² graph, used in calculation of cyclic rating factor	
a, b	= coefficients used for calculating cable partial transient temperature rise	1/s
d	= dry density of soil	kg/m ³
d_c	= external diameter of conductor	m
d_f	= spacing from centre of hottest cable for a single line source representing the heating effect of all other cables in a group	m
d_{pk}	= distance from centre of p^{th} cable, where rating is being determined to an adjacent cable k	m

Symboles	Définitions	Unités
d'_{pk}	= distance du centre du $p^{\text{ème}}$ câble, dont on détermine la capacité de transport, à l'image d'un câble adjacent k (voir figure 9)	m
h	= coefficient d'émission de chaleur d'un câble dans l'air	W/m ² .K ^{5/4}
h_1	= rapport I_V/I_R	
i	= temps	h
k	= rapport de l'échauffement au-dessus de la température ambiante de la surface extérieure d'un câble, d'un tuyau ou d'un fourreau, à l'échauffement au-dessus de la température ambiante de l'âme en régime permanent	
k_1	= valeur de k pour un câble d'un groupe	
n	= nombre de conducteurs isolés dans un câble	
p	= facteur pour la répartition de la capacité thermique d'un isolant (pour des durées supérieures à $\frac{1}{3} T.Q$)	
p^*	= facteur pour la répartition de la capacité thermique d'un isolant (pour des durées inférieures ou égales à $\frac{1}{3} T.Q$)	
p'	= facteur pour la répartition de la capacité thermique des revêtements d'un câble	
p_d	= facteur pour la répartition de la capacité thermique d'un isolant lors du régime transitoire causé par les pertes diélectriques	
q_a	= rapport: <u>pertes dans (âmes + gaines + armure)</u>	
q_e	= rapport: <u>pertes dans (âmes + écrans + tuyau)</u>	
q_j	= rapport: <u>pertes dans (âmes + gaines + armure + tuyau)</u>	
q_s	= rapport: <u>pertes dans [âme + gaine (ou écran)]</u>	
r	= rapport $\theta_{\max}/\theta_R(\infty)$	
t	= temps écoulé depuis le début d'application d'un échauffement, symbole général pour le temps, généralement en secondes ($t = 3\ 600i$)	s
a	= coefficient de température de la résistivité électrique du matériau de l'âme	1/K
$a(t), \beta(t)$	= facteurs d'approche pour les échauffements de l'âme par rapport à la surface du câble d'une part, de la surface du câble par rapport à la température ambiante d'autre part	
β	= inverse du coefficient de température de la résistivité électrique à 0 °C	K
$\gamma(t)$	= fonction utilisée dans les calculs du facteur de capacité de transport cyclique pour groupes de câbles	
δ	= diffusivité thermique du sol	m ² /s
η	= teneur en humidité du sol en pourcentage du poids à sec	
μ	= facteur de charge des pertes d'un cycle de charge	
ρ_T	= résistivité thermique du sol	K.m/W
ρ_i	= résistivité thermique de l'isolant	K.m/W
θ_i	= température de l'âme au début du régime transitoire	°C
$\theta(t)$	= échauffement transitoire de l'âme au-dessus de la température ambiante, sans correction pour variations des pertes dans l'âme	K
$\theta_c(t)$	= échauffement transitoire de l'âme au-dessus de la température de la surface extérieure d'un câble	K
$\theta_d(t)$	= échauffement transitoire moyen dans l'épaisseur de l'isolant au-dessus de la surface extérieure d'un câble	K
$\theta_e(t)$	= échauffement transitoire de la surface extérieure d'un câble (ou du câble le plus chaud d'un groupe de câbles également chargés) au-dessus de la température ambiante	K
$\theta_o(t)$	= échauffement transitoire moyen de l'huile dans un câble en tuyau au-dessus de la température de la surface extérieure du tuyau	K
$\theta_R(t)$	= échauffement de l'âme au-dessus de la température ambiante au temps t après application du courant I_R , en négligeant la variation de la résistance de l'âme. $\theta_R(t)$ est calculé par les méthodes données dans l'article 8	K
$\theta_R(i)$	= $\theta(t)$, lorsque l'amplitude de l'échelon de courant est égale au courant nominal en service permanent (facteur de charge 100%, i étant exprimé en heures)	K
$\theta_R(\infty)$	= valeur de θ_R en régime permanent, c'est-à-dire échauffement maximal admissible prescrit	K
$\theta_d(t)$	= échauffement transitoire de l'âme au-dessus de la température ambiante, corrigée pour tenir compte de la variation des pertes dans l'âme en fonction de la température	K
$\theta(\infty)$	= échauffement de l'âme en régime permanent au-dessus de la température ambiante	K
$\theta_{\max}$	= échauffement maximal admissible au-dessus de la température ambiante, a) pour une charge cyclique journalière, b) à la fin de la période de surcharge	K
σ	= capacité thermique volumique de l'isolant (voir annexe E)	J/K.m ³

Symbol	Definition	Units
d'_{pk}	= distance from centre of p^{th} cable, whose rating is being determined, to the image of an adjacent cable k (see Figure 9)	m
h	= heat emission coefficient for a cable in air	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^{5/4}$
h_1	= ratio I_1/I_R	
i	= time	h
k	= ratio of cable, pipe or duct external-surface temperature rise above ambient to conductor temperature rise above ambient under steady conditions	
k_1	= value of k for a cable in a group	
n	= number of cores in a cable	
p	= factor for apportioning the thermal capacitance of a dielectric (durations greater than $\frac{1}{3} T.Q$)	
p^*	= factor for apportioning the thermal capacitance of a dielectric (durations less than or equal to $\frac{1}{3} T.Q$)	
p'	= factor for apportioning the thermal capacitance of cable coverings	
p_d	= factor for apportioning thermal capacitance of dielectric when calculating transient caused by dielectric loss	
q_a	= ratio: $\frac{\text{losses in (conductors + sheaths + armour)}}{\text{losses in conductors}}$	
q_e	= ratio: $\frac{\text{losses in (conductors + screens + pipe)}}{\text{losses in conductors}}$	
q_j	= ratio: $\frac{\text{losses in (conductors + sheaths + armour + pipe)}}{\text{losses in conductors}}$	
q_s	= ratio: $\frac{\text{losses in [conductor + sheath (or screen)]}}{\text{loss in conductor}}$	
r	= ratio $\theta_{\text{max}}/\theta_R(\infty)$	
t	= time from start of application of heating, a general symbol for time, usually in seconds ($t = 3\,600i$)	s
a	= temperature coefficient of electrical resistivity of conductor material	1/K
$\alpha(t), \beta(t)$	= attainment factors for the conductor to cable surface and cable surface to ambient temperature rises respectively	
β	= reciprocal of temperature coefficient of electrical resistivity at 0°C	K
$\gamma(t)$	= function used in calculating cyclic rating factor for groups of cables	
δ	= soil thermal diffusivity	m^2/s
η	= moisture content of soil in per cent of dry weight	
μ	= loss-load factor of a load cycle	
ρ_T	= soil thermal resistivity	$\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$
ρ_i	= dielectric thermal resistivity	$\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$
θ_i	= conductor temperature at commencement of transient	$^\circ\text{C}$
$\theta(t)$	= transient temperature rise of conductor above ambient, without correction for variation in conductor loss	K
$\theta_c(t)$	= transient temperature rise of conductor above the outer surface of a cable	K
$\theta_d(t)$	= transient spatial average temperature rise of dielectric above the outer surface of a cable	K
$\theta_e(t)$	= transient temperature rise of outer surface of a cable (or hottest cable in a group of similarly loaded cables) above ambient temperature	K
$\theta_o(t)$	= transient average temperature rise of oil in a pipe-type cable above the outer surface of the pipe	K
$\theta_R(t)$	= conductor temperature rise above ambient at time t after application of current I_R , neglecting variation in conductor resistance, $\theta_R(t)$ is calculated by the methods given in Clause 8	K
$\theta_R(i)$	= $\theta(t)$, when the magnitude of the step function current is the sustained (100% load factor) rated current, and i is expressed in hours	K
$\theta_R(\infty)$	= value of θ_R in the steady state, i.e. the standard maximum permissible temperature rise	K
$\theta_a(t)$	= conductor transient temperature rise above ambient corrected for variation in conductor loss with temperature	K
$\theta(\infty)$	= conductor steady state temperature rise above ambient	K
θ_{max}	= maximum permissible temperature rise above ambient a) for a daily cyclic load, b) at end of period of emergency loading	K
δ	= volumetric specific heat of insulation (see Appendix E)	$\text{J}/\text{K}\cdot\text{m}^3$

3. Plan de la présente norme

La section deux donne les méthodes manuelles de calcul de la réponse transitoire en température d'un câble à l'application d'un échelon de courant. Les méthodes sont établies pour des durées allant de:

- a) 10 min à 1 h environ:
- b) égales ou supérieures à 1 h environ. L'utilisation de cette dernière méthode est aussi nécessaire dans la section trois.

Une méthode de calcul par ordinateur de la réponse transitoire de câbles unipolaires a été publiée par la CIGRÉ [2]*.

La section trois fixe la méthode générale de calcul du facteur de capacité de transport cyclique fondée sur la réponse transitoire obtenue dans la section deux.

La section quatre fixe la méthode de calcul du régime de secours d'un câble fondée sur les réponses transitoires obtenues dans la section deux.

L'annexe A donne une méthode détaillée pour la réduction d'un circuit thermique multiple à un circuit à deux cellules. L'application de cette technique est nécessaire pour les câbles non traités de manière détaillée par l'article 4.

L'annexe B donne une méthode de calcul de la variation moyenne de température transitoire à travers l'isolant ou à travers l'huile de remplissage des tuyaux. Cette méthode est indispensable pour le calcul des variations transitoires de pression d'huile dans les câbles à huile fluide.

L'annexe C définit les méthodes servant à modifier certains des facteurs transitoires utilisés pour le calcul de capacité de transport cyclique dans les cas où les propriétés du sol et la profondeur de pose ne sont pas standard.

L'annexe D indique les méthodes d'estimation de la diffusivité du sol à partir d'autres paramètres ayant trait au sol, lorsque la valeur réelle n'est pas connue.

L'annexe E donne les valeurs de la résistivité thermique des matériaux (prises dans la Publication 287 de la CEI) et les valeurs proposées pour la capacité thermique volumique des matériaux, provenant de sources diverses.

L'annexe F fournit des exemples d'application des méthodes énoncées dans la présente norme. Des calculs détaillés sont présentés pour un régime transitoire de câble, un régime de charge cyclique et un régime de secours.

SECTION DEUX — RÉPONSE TRANSITOIRE EN TEMPÉRATURE

4. Réponse transitoire en température à l'application d'un échelon de courant

4.1 Aspects généraux

Les formules de base utilisées dans les calculs sont données dans la Publication 287 de la CEI.

4.1.1 Données de base

La réponse transitoire en température d'un câble à un échelon de courant circulant dans son âme (ou dans ses âmes) dépend de la combinaison des capacités thermiques et des résistances thermiques des parties constitutives du câble lui-même et de son environnement. A titre d'exemple, dans le cas important de câbles directement posés dans le sol, si la réponse est demandée pour des temps courts, les capacités thermiques du câble et la façon dont il en est tenu compte jouent un rôle

*Les chiffres entre crochets se rapportent à la «Bibliographie», article 9, page 60.

3. Layout of this standard

Section Two gives the manual methods for calculating the transient temperature response of a cable to a step function of current. Methods are set out for durations of:

- a) from 10 min up to about 1 h;
- b) for durations of about 1 h or greater. This is also required for use in Section Three.

A computer method for calculating the transient response of single-core cables has been published by CIGRE [2]*.

Section Three sets out the general method of calculating the cyclic rating factor based on the calculated transient response from Section Two.

Section Four sets out the method of calculating the emergency rating of a cable based on the calculated transient responses from Section Two.

Appendix A gives a detailed method for reducing a multiple thermal circuit to one having two sections. This technique is required for cables not covered in detail in Clause 4.

Appendix B gives a method for calculating the transient average temperature variation through the dielectric or through oil filling in pipes. This is required when calculating transient oil-pressure variations in oil-filled cables.

Appendix C sets out methods of modifying some of the transient factors used in the cyclic rating calculation when the soil properties and depth of laying are non-standard.

Appendix D gives methods for estimating the diffusivity of the soil from other soil parameters when the actual value is unknown.

Appendix E gives values for thermal resistivity of materials (reproduced from IEC Publication 287) and suggested values for the volumetric specific heat of materials, gleaned from various sources.

Appendix F gives sample applications of the methods enounced in this standard. Detailed calculations are given for a cable transient, a cyclic rating and an emergency rating.

SECTION TWO — TRANSIENT TEMPERATURE RESPONSE

4. Transient temperature response to a step function of current

4.1 *General aspects*

Supporting formulae are given in IEC Publication 287.

4.1.1 *Background*

The transient temperature response of a cable to a step-function of current in its conductor (or conductors) depends on the combination of thermal capacitances and resistances formed by the constituent parts of the cable itself and its surroundings. As an example, in the important case of cables laid directly in the ground, if the response is required for short times the thermal capacitances of the cable, and the way in which these are taken into account, are important. At the same time the

* The figures in square brackets refer to "Bibliography", Clause 9, page 61.

important. La contribution du sol environnant est alors négligeable. Au contraire, quand la réponse est demandée pour des temps longs, les capacités thermiques associées au câble peuvent être négligeables et le facteur prépondérant est le régime transitoire thermique du sol environnant.

La méthode de calcul de la réponse en température d'un câble à l'application brusque d'une valeur constante du courant à l'âme consiste à considérer que l'ensemble du circuit thermique est divisible en deux parties indépendantes. La première partie comprend les constituants du câble situés à l'intérieur de sa surface externe, la seconde partie est l'environnement du câble. Les réponses individuelles de ces deux parties constituent des régimes transitoires partiels, à partir desquels on peut reconstituer le régime transitoire du système complet.

La méthode utilisée pour déterminer ces deux parties du circuit thermique et des régimes transitoires de température correspondants est donnée séparément dans les paragraphes 4.2 et 4.3. La méthode permettant de combiner ces régimes transitoires entre eux, au moyen du facteur d'approche $a(t)$, est décrite dans le paragraphe 4.4.

4.1.2 Critères permettant l'utilisation d'un facteur d'approche égal à l'unité

Lorsqu'on effectue des calculs destinés à donner la température atteinte par l'âme après un temps suffisamment long pour que s'amortisse complètement le régime transitoire de la première partie du circuit thermique, on peut admettre que le facteur d'approche $a(t)$ est égal à 1. En pratique, cela est valable lorsque le temps écoulé depuis l'apparition du régime transitoire thermique est supérieur :

- a) à 12 h pour tous les types de câbles;
- b) au produit $T.Q$: lorsqu'il s'agit de câbles en tuyau à pression d'huile et de tous les types de câbles sous gaine métallique pour lesquels le produit $T.Q \leq 2$ h;
- c) au produit $2.T.Q$: lorsqu'il s'agit de câbles en tuyau sous pression de gaz et de tous les types de câbles sous gaine métallique pour lesquels le produit $T.Q > 2$ h;

où T est la résistance thermique totale et Q la capacité thermique totale du câble.

Le tableau ci-dessous, fondé sur les critères de spécification couramment appliqués à l'heure actuelle pour déterminer les dimensions des câbles, montre les domaines d'application des cas b) et c).

Type de câble	Cas b)	Cas c)
Câbles à huile fluide	1) Toutes tensions < 220 kV 2) 220 kV: sections $\leq 150 \text{ mm}^2$	1) 220 kV: sections > 150 mm ² 2) toutes tensions > 220 kV
Câbles en tuyau à pression d'huile	1) Toutes tensions $\leq 220 \text{ kV}$ 2) 220 kV: sections $\leq 800 \text{ mm}^2$	1) 220 kV: sections > 800 mm ² 2) Toutes tensions > 220 kV
Câbles en tuyau à pression de gaz		1) $\leq 220 \text{ kV}$ 2) Sections $\leq 1\,000 \text{ mm}^2$
Câbles à isolation extrudée	1) Toutes tensions < 60 kV 2) 60 kV: sections $\leq 150 \text{ mm}^2$	1) 60 kV: sections > 150 mm ² 2) Toutes tensions > 60 kV

4.1.3 Représentation du câble

Pour les besoins de la présente norme, le câble, c'est-à-dire la première partie du circuit thermique, doit être défini pour chaque mode d'installation, à savoir les installations suivantes:

a) Câbles enterrés directement dans le sol

Le câble complet y compris son revêtement extérieur ou sa protection contre la corrosion. Pour les câbles en tuyau, cela comprend le tuyau et son rubanage de protection.

contribution of the surrounding soil is negligible. On the other hand, when the response for long times is required, the thermal capacitances associated with the cable may be negligible and the most important factor is the thermal transient in the surrounding soil.

The method for calculating the temperature response of a cable to a suddenly applied constant value of conductor current is to consider that the whole thermal circuit is divisible into two independent parts. One part is made up of the cable components out to the outer surface of the cable, the second part is the environment of the cable. The individual responses of these two parts are partial transients, with which the total transient for the complete system can be built up.

The method for determining these two parts of the thermal circuit and the temperature transients across them are given separately in Sub-clauses 4.2 and 4.3 and the method for combining the transients by means of the attainment factor $a(t)$ is described in Sub-clause 4.4.

4.1.2 Criteria for the attainment factor to be unity

When the calculations are required to give the conductor temperature occurring after a period long enough to complete the transient in the first part of the thermal circuit, then the attainment factor $a(t)$ may be assumed to be equal to 1. In practice this applies when the period from the initiation of the thermal transient is longer than:

- a) 12 h for all cables;
- b) the product $T.Q$: when dealing with oil-pressure pipe-types cables and all types of self-contained cables where the product $T.Q \leq 2$ h, and
- c) the product $2.T.Q$: when dealing with gas-pressure pipe-type cables and all types of self-contained cables where the product $T.Q > 2$ h.

where T is the total thermal resistance and Q is the total thermal capacitance of the cable.

The table below, based on design values at present commonly used to determine dimensions of cables, shows when cases b) and c) apply.

Type of cable	Case b)	Case c)
Oil-filled cables	1) All voltages < 220 kV 2) 220 kV: sections $\leq 150 \text{ mm}^2$	1) 220 kV: sections > 150 mm ² 2) All voltages > 220 kV
Pipe-type, oil-pressure cables	1) All voltages $\leq 220 \text{ kV}$ 2) 220 kV: sections $\leq 800 \text{ mm}^2$	1) 220 kV: sections > 800 mm ² 2) All voltages > 220 kV
Pipe-type, gas-pressure cables		1) $\leq 220 \text{ kV}$ 2) Sections $\leq 1\,000 \text{ mm}^2$
Cables with extruded insulation	1) All voltages < 60 kV 2) 60 kV: sections $\leq 150 \text{ mm}^2$	1) 60 kV: sections > 150 mm ² 2) All voltages > 60 kV

4.1.3 Representation of the cable

For the purpose of this standard, the cable or first part of the thermal circuit shall be defined for each type of installation to include the following:

- a) *Cables buried directly in soil*

The complete cable including its outermost serving or anticorrosion protection. For pipe-type cables this includes the pipe and its protective wrappings.

b) Câbles en fourreaux

Le câble, le fourreau et tout ce qui remplit l'espace libre dans le fourreau. Pour les fourreaux noyés dans du béton, le circuit de câble comprend le fourreau proprement dit. (Le béton doit, de même que le sol, être considéré comme appartenant à la deuxième partie du circuit thermique.) Dans le cas de fourreaux formés directement en coulant du béton, le mode de traitement est le même, mais la capacité thermique du fourreau, Q_d , est nulle.

c) Câbles posés à l'air libre

Le câble complet y compris son revêtement extérieur.

Les régimes transitoires de température calculés pour la première partie du circuit thermique donnent l'échauffement de l'âme par rapport à la température de la surface extérieure du câble, telle qu'elle est définie ci-dessus.

Le câble est représenté par un circuit à constantes localisées, dont la détermination est importante, et les méthodes données dans la présente norme doivent être suivies si l'on veut obtenir des résultats uniformes chez les différents utilisateurs. Cela s'applique en particulier aux câbles de structure complexe pour lesquels, afin de rendre les calculs suffisamment commodes, le circuit du câble a été simplifié en le ramenant à un nombre d'éléments aussi réduits que possible.

Il convient de noter que, dans un câble, toutes les résistances thermiques, capacités thermiques et pertes doivent être calculées comme des grandeurs ramenées à un conducteur, ou au conducteur équivalent dans le cas de câbles tripolaires (voir paragraphe 4.2.1.2).

4.1.4 Critères de choix du circuit thermique

Les critères de choix des circuits thermiques à utiliser pour le calcul des régimes transitoires individuels dépendent de la durée de ceux-ci et devront être sélectionnés dans le tableau ci-dessous:

Choix du circuit thermique

Type de câble	Durée du régime transitoire	Paragraphe
Tous types de câbles unipolaires	$> \frac{1}{3} T.Q$ (et régimes de charges cycliques)	4.2
	de 600 s (10 min) à $\leq \frac{1}{3} T.Q$	4.3
Câbles en tuyau	$> \frac{1}{3} T.Q$ (et régimes de charges cycliques)	4.2
	de 600 s (10 min) à $\leq \frac{1}{3} T.Q$	4.3
Câbles tripolaires	$> \frac{1}{2} T.Q$ (totalité du câble) (et régimes de charges cycliques)	4.2
	de 600 s (10 min) à $\leq T.Q$ (un conducteur isolé)*	4.3

* Dans ce cas précis, T et Q représentent la résistance thermique et la capacité thermique d'un conducteur isolé unique.

Note. — T et Q représentent la résistance thermique et la capacité thermique totales du câble, à l'exception du cas marqué d'un *. $T.Q$ est la constante de temps thermique du câble.

Pour les câbles tripolaires, on admet que la réponse transitoire en température pour des durées fixées entre les deux limites, $T.Q$ pour le conducteur isolé et $\frac{1}{2} T.Q$ pour la totalité du câble, est donnée par une interpolation linéaire de la courbe d'échauffement en coordonnées semi-logarithmiques (échauffement linéaire et temps logarithmique).

b) Cables in ducts

The cable, the duct and whatever occupies the duct-space. For ducts embedded in concrete, the cable circuit includes the duct itself. (The concrete is to be considered, with the soil, as belonging to the second part of the thermal circuit.) For ducts formed directly by casting concrete, the treatment is the same, but the thermal capacity of the duct, Q_d , is zero.

c) Cables in air

The complete cable including its outermost covering.

The temperature transients calculated for the first part of the thermal circuit will give the temperature rise of the conductor with respect to the outermost surface of the cable as defined above.

The cable is represented by a circuit with lumped constants, the derivation of which is important and the methods given in this standard must be followed if uniform results between users are to be obtained. This applies particularly to cables having complex constructions and where, in order to make calculation reasonably convenient, the cable circuit has been simplified to as few a number of elements as possible.

It should be noted that, in a cable, all thermal resistances, capacitances and losses are to be calculated as losses per conductor, or per equivalent conductor in the case of three-core cables (see Sub-clause 4.2.1.2).

4.1.4 Criteria for selecting the thermal circuit

The criteria for selecting the thermal circuits to be used for calculating the individual transients depends on the duration of the transient and should be selected from the table below:

Selection of thermal circuit

Cable type	Duration of transient	Sub-clause
Single-core cables, all types	$> \frac{1}{3} T.Q$ (and cyclic ratings)	4.2
	600 s (10 min) to $\leq \frac{1}{3} T.Q$	4.3
Pipe-type cables	$> \frac{1}{3} T.Q$ (and cyclic ratings)	4.2
	600 s (10 min) to $\leq \frac{1}{3} T.Q$	4.3
Three-core cables	$> \frac{1}{2} T.Q$. (total cable) (and cyclic ratings)	4.2
	600 s (10 min) to $\leq T.Q$ (one core)*	4.3

* In this case T and Q are the thermal resistance and thermal capacitance of *one core* only.

Note. — T and Q are the total thermal resistance and thermal capacitance of the cable except as marked *. $T.Q$ is the thermal time constant of the cable.

For three-core cables the transient temperature response for durations between the two limits, $T.Q$ for the core and $\frac{1}{2} T.Q$ for the whole cable, is assumed to be given by a straight line interpolation on linear temperature rise/logarithmic time axes.

Pour des durées supérieures à 1 h environ (et pour les régimes de charge cycliques), les formules données au paragraphe 4.2 conviennent généralement, tandis que celles qui sont données au paragraphe 4.3 peuvent être utilisées pour des durées comprises entre 10 min et 1 h environ.

4.2 Calcul des réponses transitoires partielles pour les longues durées ($> \frac{1}{3}T_1 Q$) et les régimes de charge cycliques

Ces formules conviennent habituellement pour des durées supérieures à 1 h environ: voir paragraphe 4.1.4 pour les durées précises.

4.2.1 Représentation de l'isolant

4.2.1.1 Câbles unipolaires

L'isolant est représenté par des constantes thermiques localisées. La capacité thermique totale de l'isolant (Q_i) est répartie entre l'âme et la gaine, de telle façon que la chaleur totale emmagasinée dans l'isolant demeure inchangée.

L'isolant est alors représenté par les éléments indiqués en trait plein sur la figure 1, où:

$$p = \frac{1}{2 \ln \left(\frac{D_i}{d_c} \right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_i}{d_c} \right)^2 - 1} \quad (4-1)$$

T_1 = résistance thermique totale de l'isolant par conducteur (ou par conducteur unipolaire équivalent dans le cas d'un câble tripolaire, voir paragraphe 4.2.1.2)

Q_i = capacité thermique totale de l'isolant par conducteur (ou par conducteur unipolaire équivalent dans le cas d'un câble tripolaire, voir paragraphe 4.2.1.2)

Q_c = capacité thermique de l'âme (ou de l'âme du conducteur unipolaire équivalent dans le cas d'un câble tripolaire, voir paragraphe 4.2.1.2)

D_i = diamètre extérieur de l'enveloppe isolante

d_c = diamètre extérieur de l'âme.

Note. — Dans le calcul des caractéristiques thermiques, lorsque le câble comporte des écrans: les rubans métalliques sont considérés comme faisant partie de l'âme ou de la gaine, tandis que les couches semi-conductrices (y compris les rubans en papier de carbone métallisé) sont considérés comme faisant partie de l'isolant. Les dimensions des constituants concernés devront être modifiées en conséquence.

4.2.1.2 Câbles tripolaires

Le câble tripolaire est remplacé par une structure équivalente unipolaire dissipant au total les mêmes pertes Joule. L'âme du conducteur unipolaire équivalent a un diamètre:

$$d_c = D_i e - \frac{2 \pi T_1}{\rho_i} \quad (4-2)$$

où D_i a pour valeur celle du diamètre extérieur de l'enveloppe isolante (sous la gaine) du câble tripolaire et T_1 est la résistance thermique du conducteur unipolaire équivalent. T_1 est égal au tiers de la valeur de celle d'une des phases d'un câble tripolaire telle quelle est donnée par la Publication 287 de la CEI. ρ_i est la résistivité thermique de l'isolant.

Les capacités thermiques sont calculées avec les hypothèses suivantes:

- Les âmes réelles sont considérées comme étant complètement situées à l'intérieur du diamètre de l'âme du conducteur unipolaire équivalent, le reste de ce conducteur étant occupé par l'isolation.

In general Sub-clause 4.2 can be used for durations greater than about 1 h (and for cyclic ratings) while Sub-clause 4.3 can be used for durations of about 1 h down to 10 min.

4.2 Calculation of partial transients for long durations ($> \frac{1}{3}T_1 Q$) and cyclic rating

These formulae are usually suitable for time durations greater than about 1 h: see Sub-clause 4.1.4 for exact durations.

4.2.1 Representation of the dielectric

4.2.1.1 Single-core cables

The dielectric is represented by lumped thermal constants. The total thermal capacity of the dielectric (Q_i) is divided between the conductor and the sheath, so that the total heat stored in the dielectric is unchanged.

The dielectric is then represented by the components shown in full lines in Figure 1, where:

$$p = \frac{1}{2 \ln \left(\frac{D_i}{d_c} \right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_i}{d_c} \right)^2 - 1} \quad (4-1)$$

T_1 = total thermal resistance of dielectric per conductor (or equivalent single-core conductor of a three-core cable, see Sub-clause 4.2.1.2)

Q_i = total thermal capacitance of dielectric per conductor (or equivalent single-core conductor of a three-core cable, see Sub-clause 4.2.1.2)

Q_c = thermal capacitance of conductor (or equivalent single-core conductor of a three-core cable, see Sub-clause 4.2.1.2)

D_i = external diameter of dielectric

d_c = external diameter of conductor

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

4.2.1.2 Three-core cables

The three-core cable is replaced by an equivalent single-core construction dissipating the same total conductor losses. The equivalent single-core conductor has a diameter:

$$d_c = D_i e - \frac{2 \pi T_1}{\rho_i} \quad (4-2)$$

where D_i is the same value of diameter over dielectric (under the sheath) as for the three-core cable and T_1 is the thermal resistance of the equivalent single-core cable. T_1 is one-third of the value for one of the cores of the three-core cable as given in IEC Publication 287, ρ_i is the thermal resistivity of the dielectric.

Thermal capacitances are calculated on the following assumptions:

- a) The actual conductors are considered to be completely inside the diameter of the equivalent single-core conductor, the remainder of the equivalent conductor being occupied by insulation.

- b) L'espace entre l'âme du conducteur unipolaire équivalent et la gaine est considéré comme complètement occupé par l'isolation (pour les câbles à huile fluide, cet espace est en partie rempli par le volume d'huile total inclus dans les conduits, le reste étant du papier imprégné d'huile).

Le facteur p est calculé en utilisant les dimensions du câble unipolaire équivalent et est appliqué à la capacité thermique de l'isolation fondée sur l'hypothèse b) ci-dessus.

4.2.2 Représentation du câble

4.2.2.1 Généralités

La première partie du circuit thermique qui simule le câble est toujours représentée par un réseau à deux cellules (voir figure 2). La première cellule comprend la capacité thermique de l'âme et la portion intérieure de l'isolant avec la résistance thermique de celui-ci, alors que la deuxième cellule comprend la capacité thermique et la résistance thermique du reste du câble. Un exemple typique fondé sur les câbles cités au point a) du paragraphe 4.2.2.2 ci-dessous est donné dans la figure 3. Il faut noter que toute capacité thermique extérieure à T_B a été négligée, la paire de bornes de droite étant mise en court-circuit lors du calcul du régime transitoire.

Les formules des constantes de la figure 2 pour les types les plus courants de câbles et d'installations sont données dans le paragraphe suivant.

4.2.2.2 Représentation des types courants de câbles

Note. — Les symboles sont définis uniquement lorsqu'ils sont utilisés pour la première fois.

- a) *Câbles isolés au papier imprégné de matière visqueuse ou d'huile fluide sous gaine métallique, câbles à isolant extrudé et autres structures analogues du point de vue thermique*

$$T_A = T_1 \quad (4-3)$$

$$T_B = q_s T_3 \quad (4-4)$$

$$Q_A = Q_c + p Q_i \quad (4-5)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_s + p' Q_j}{q_s} \quad (4-6)$$

où:

T_1 , Q_i et p sont définis au paragraphe 4.2.1.1

T_3 = résistance thermique du revêtement extérieur

Q_c = capacité thermique de l'âme ou de l'âme du conducteur unipolaire équivalent

Q_s = capacité thermique de la gaine et du fretage

Q_j = capacité thermique du revêtement extérieur

q_s = rapport: $\frac{\text{pertes dans (âme + gaine)}}{\text{pertes dans l'âme}}$: il sert à tenir compte des pertes supplémentaires se produisant dans la gaine

Dans les câbles tripolaires, l'âme est celle du conducteur unipolaire équivalent.

p' est un facteur utilisé pour répartir la capacité thermique du revêtement extérieur de manière analogue à celle utilisée pour l'isolant.

$$p' = \frac{1}{2 \ln \left(\frac{D_e}{D_s} \right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_e}{D_s} \right)^2 - 1} \quad (4-7)$$

D_e et D_s sont les diamètres extérieur et intérieur du revêtement.

Note. — La partie extérieure de la capacité thermique du revêtement a été négligée, car il a été vérifié qu'elle ne jouait qu'un rôle insignifiant dans la détermination du régime transitoire de température de l'âme.

- b) The space between the equivalent single-core conductor and the sheath is considered to be completely occupied by insulation (for oil-filled cables this space is filled partly by the total volume of oil in the ducts and the remainder is oil-impregnated paper).

The factor p is then calculated using the dimensions of the equivalent single-core cable and is applied to the thermal capacitance of the insulation based on assumption b) above.

4.2.2 Representation of the cable

4.2.2.1 General

The first part of the thermal circuit simulates the cable, and is always represented by a two-section network (see Figure 2). The first section includes the thermal capacitance of the conductor and the inner portion of the dielectric along with the thermal resistance of the dielectric while the second section includes thermal capacitance and thermal resistance of the remainder of the cable. A typical example, based on the cables in Item a) of Sub-clause 4.2.2.2 below is given in Figure 3. Note that any thermal capacitance outside T_B is omitted, as the right-hand pair of terminals is short-circuited when calculating the transient.

Formulae for the constants in Figure 2 for the more common types of cables and installations are given in the following sub-clause.

4.2.2.2 Representation of common types of cable

Note. — Symbols are defined only where they are first used.

- a) *Solid and self-contained oil-filled paper insulated cables, extruded cables and thermally similar constructions*

$$T_A = T_1 \quad (4-3)$$

$$T_B = q_s T_3 \quad (4-4)$$

$$Q_A = Q_c + pQ_i \quad (4-5)$$

$$Q_B = (1 - p)Q_i + \frac{Q_s + p'Q_j}{q_s} \quad (4-6)$$

where:

T_1 , Q_i and p are defined in Sub-clause 4.2.1.1

T_3 = thermal resistance of outer covering

Q_c = thermal capacitance of conductor or equivalent single-core conductor

Q_s = thermal capacitance of sheath and reinforcement

Q_j = thermal capacitance of outer covering

q_s = ratio: $\frac{\text{losses in (conductor + sheath)}}{\text{losses in conductor}}$ and is used to take account of the extra losses occurring in the sheath

In three-core cables, the conductor is the equivalent single-core conductor.

p' is a factor used to allocate the thermal capacitance of the outer covering in a similar manner to that used for the dielectric.

$$p' = \frac{1}{2 \ln \left(\frac{D_e}{D_s} \right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_e}{D_s} \right)^2 - 1} \quad (4-7)$$

D_e and D_s are the outer and inner diameters of the covering.

Note. — The outer part of the thermal capacitance of the covering is omitted because it has been found to play only an insignificant part in determining the conductor temperature transient.

b) Câbles en tuyau (à huile fluide sous forte pression)

$$T_A = T_1 + \frac{1}{2} q_s T_o \quad (4-8)$$

$$T_B = \frac{1}{2} q_s T_o + q_e T_3 \quad (4-9)$$

$$Q_A = Q_c + p Q_i \quad (4-10)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_o}{q_s} \quad (4-11)$$

où:

T_1 , Q_i et p sont définis au paragraphe 4.2.1.1

q_s = rapport: $\frac{\text{pertes dans (âmes + écrans)}}{\text{pertes dans les âmes}}$

T_o = résistance thermique de l'huile dans le tuyau

T_3 = résistance thermique du revêtement dans le tuyau

Q_o = résistance thermique de l'huile dans le tuyau

q_e = rapport: $\frac{\text{pertes dans (âmes + écrans + tuyau)}}{\text{pertes dans les âmes}}$

c) Câbles en tuyau (à pression de gaz, câbles assemblés, à remplissage et armés)

$$T_A = T_1 \quad (4-12)$$

$$T_B = q_s T_f + q_a T_2 + q_j T_3 \quad (4-13)$$

$$Q_A = Q_c + p Q_i \quad (4-14)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_s + Q_f}{q_s} + \frac{Q_a}{q_a} + \frac{0,5 Q_p}{q_j} \quad (4-15)$$

où:

q_a = rapport: $\frac{\text{pertes dans (âmes + gaines + armure)}}{\text{pertes dans les âmes}}$

q_j = rapport: $\frac{\text{pertes dans (âmes + gaines + armure + tuyau)}}{\text{pertes dans les âmes}}$

T_2 = résistance thermique du gaz dans le tuyau

T_f = résistance thermique de la matière de remplissage

Q_a = capacité thermique de l'armure

Q_f = capacité thermique de la matière de remplissage

Q_p = capacité thermique du tuyau

d) Câbles en tuyau (à pression de gaz, sans matière de remplissage ni armure)

$$T_A = T_1 \quad (4-16)$$

$$T_B = q_s T_2 + q_e T_3 \quad (4-17)$$

$$Q_A = Q_c + p Q_i \quad (4-18)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_s}{q_s} + \frac{0,5 Q_p}{q_e} \quad (4-19)$$

où:

q_e = rapport: $\frac{\text{pertes dans (âmes + gaine + tuyau)}}{\text{pertes dans les âmes}}$

b) *Pipe-type cables (high pressure oil-filled)*

$$T_A = T_1 + \frac{1}{2} q_s T_o \quad (4-8)$$

$$T_B = \frac{1}{2} q_s T_o + q_e T_3 \quad (4-9)$$

$$Q_A = Q_c + p Q_i \quad (4-10)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_o}{q_s} \quad (4-11)$$

where:

T_1 , Q_i and p are defined in Sub-clause 4.2.1.1,

q_s = ratio: $\frac{\text{losses in (conductors and screens)}}{\text{losses in conductors}}$

T_o = thermal resistance of the oil in the pipe

T_3 = thermal resistance of covering on pipe

Q_o = thermal capacitance of the oil in the pipe

q_e = ratio: $\frac{\text{losses in (conductors + screens + pipe)}}{\text{losses in conductors}}$

c) *Pipe-type cables (gas pressure, cables laid up, filled and armoured)*

$$T_A = T_1 \quad (4-12)$$

$$T_B = q_s T_f + q_a T_2 + q_j T_3 \quad (4-13)$$

$$Q_A = Q_c + p Q_i \quad (4-14)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_s + Q_f}{q_s} + \frac{Q_a}{q_a} + \frac{0.5 Q_p}{q_j} \quad (4-15)$$

where:

q_a = ratio: $\frac{\text{losses in (conductors + sheaths + armour)}}{\text{losses in conductors}}$

q_j = ratio: $\frac{\text{losses in (conductors + sheaths + armour + pipe)}}{\text{losses in conductors}}$

T_2 = thermal resistance of gas in the pipe

T_f = thermal resistance of filling

Q_a = thermal capacitance of armour

Q_f = thermal capacitance of filling

Q_p = thermal capacitance of pipe

d) *Pipe-type cables (gas pressure, no filling material or armour)*

$$T_A = T_1 \quad (4-16)$$

$$T_B = q_s T_2 + q_e T_3 \quad (4-17)$$

$$Q_A = Q_c + p Q_i \quad (4-18)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_s}{q_s} + \frac{0.5 Q_p}{q_e} \quad (4-19)$$

where:

q_e = ratio: $\frac{\text{losses in (conductors + sheaths + pipe)}}{\text{losses in conductors}}$

e) Câbles en fourreau

$$T_A = T_1 \quad (4-20)$$

$$T_B = q_s (T_3 + T'_4 + T''_4) \quad (4-21)$$

$$Q_A = Q_c + pQ_i \quad (4-22)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_s + Q_j + 0,5 Q_d}{q_s} \quad (4-23)$$

où:

T'_4 = résistance thermique de l'espace d'air dans le fourreau

T''_4 = résistance thermique du fourreau

Q_d = capacité thermique du fourreau

f) Câbles triplomb armés

$$T_A = T_1 \quad (4-24)$$

$$T_B = q_s T_f + q_a T_3 \quad (4-25)$$

$$Q_A = Q_c + pQ_i \quad (4-26)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_s + 0,5 Q_f}{q_s} + \left(\frac{q_a T_3}{q_s T_2 + q_a T_3} \right)^2 \left(\frac{0,5 Q_f}{q_s} + \frac{Q_a + Q_j}{q_a} \right) \quad (4-27)$$

4.2.2.3 Représentation des câbles et d'installations de types non spécifiés au paragraphe précédent

Le paragraphe précédent propose des circuits correspondant à la plupart des types de câbles. Néanmoins, afin de faire face aux imprévus, la méthode suivante est recommandée pour les cas qui ne sont pas traités spécifiquement dans la présente norme.

- a) Construire un bipôle en échelle représentant les résistances thermiques et capacités thermiques du câble. A cet effet, il convient de considérer le câble comme s'étendant jusqu'à la surface intérieure du sol pour câbles enterrés jusqu'à l'air libre pour les câbles posés à l'air.

Les résistances thermiques sont calculées par les méthodes utilisées par la détermination des capacités de transport en régime permanent (voir Publication 287 de la CEI).

Les capacités thermiques des parties métalliques sont représentées pour des grandeurs localisées correspondant à leur emplacement physique dans le câble. La capacité thermique des matériaux de haute résistivité thermique (par exemple l'isolation et les revêtements) est répartie selon la technique décrite au paragraphe 4.2.1 (par exemple comme pour le revêtement au point a) du paragraphe 4.2.2.2). Il est important que l'isolant soit traité exactement de la manière spécifiée au paragraphe 4.2.1.

- b) Le réseau peut comprendre parfois plus de deux cellules et il doit, pour permettre de trouver la solution, être réduit au schéma à deux cellules représenté par la figure 2. Quand le circuit thermique d'un câble ne peut pas être facilement réduit à ces deux cellules, la seconde cellule et les suivantes doivent être combinées en une seule, en employant la méthode donnée dans l'annexe A. Il est extrêmement important que la première cellule conserve la forme originale décrite au paragraphe 4.2.1.

e) Cables in ducts

$$T_A = T_1 \quad (4-20)$$

$$T_B = q_s (T_3 + T'_4 + T''_4) \quad (4-21)$$

$$Q_A = Q_c + pQ_i \quad (4-22)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_s + Q_j + 0.5 Q_d}{q_s} \quad (4-23)$$

where:

T'_4 = thermal resistance of the air space in the duct

T''_4 = thermal resistance of the duct

Q_d = thermal capacitance of the duct

f) Armoured cables with each core in a separate lead sheath (SL type)

$$T_A = T_1 \quad (4-24)$$

$$T_B = q_s T_f + q_a T_3 \quad (4-25)$$

$$Q_A = Q_c + pQ_i \quad (4-26)$$

$$Q_B = (1 - p) Q_i + \frac{Q_s + 0.5 Q_f}{q_s} + \left(\frac{q_a T_3}{q_s T_2 + q_a T_3} \right)^2 \left(\frac{0.5 Q_f}{q_s} + \frac{Q_a + Q_j}{q_a} \right) \quad (4-27)$$

4.2.2.3 Representation of cables and installations of types not specified in previous sub-clause

The previous sub-clause provides circuits for most cable types. However, to cover contingencies, the following method is recommended for cases not specifically dealt with in this standard.

- a) Build up a ladder network representing the thermal resistances and capacitances of the cable. For this purpose the cable should be considered to extend as far as the inner surface of the soil for buried cables, and to free air for cables in air.

Thermal resistances are calculated by the methods used to determine the steady-state ratings. (See IEC Publication 287.)

Thermal capacitances of metallic parts are placed as lumped quantities corresponding to their physical position in the cable. The thermal capacitance of materials with a high thermal resistivity (e.g. insulation and coverings) is allocated by the technique described in Sub-clause 4.2.1 (e.g. the covering in Item a) of Sub-clause 4.2.2.2). It is important that the dielectric be treated exactly as specified in Sub-clause 4.2.1.

- b) Sometimes this network may contain more than two sections and to allow the solution to be found shall be reduced to the two section form shown in Figure 2. Where the thermal circuit of a cable is not easily reduced to two sections, then the second and subsequent sections are combined into one, using the method given in Appendix A. It is more important that the first section is left in the original form as derived in Sub-clause 4.2.1.

4.2.3 Calcul de la réponse transitoire partielle du câble

La réponse transitoire d'un circuit de câble à échelon de courant de charge, considéré isolément, c'est-à-dire avec la paire de bornes de droite de la figure 2 mise en court-circuit, s'obtient de la façon suivante:

$$M_o = \frac{1}{2} \left(Q_A \{T_A + T_B\} + Q_B T_B \right) \quad (4-28)$$

$$N_o = Q_A T_A Q_B T_B \quad (4-29)$$

$$a = \frac{M_o + \sqrt{M_o^2 - N_o}}{N_o} \quad (4-30)$$

$$b = \frac{M_o - \sqrt{M_o^2 - N_o}}{N_o} \quad (4-31)$$

$$T_a = \frac{1}{a - b} \left[\frac{1}{Q_A} - b (T_A + T_B) \right] \quad (4-32)$$

$$T_b = T_A + T_B - T_a \quad (4-33)$$

et l'échauffement transitoire $\theta_c(t)$ de l'âme au-dessus de la température de la surface extérieure du câble est:

$$\theta_c(t) = W_c \left[T_a (1 - e^{-at}) + T_b (1 - e^{-bt}) \right] \quad (4-34)$$

où W_c représente les pertes linéiques dans une âme ou dans l'âme d'un conducteur équivalent, calculées à la température maximale atteinte par l'âme. On suppose ces pertes constantes pendant le régime transitoire.

Le facteur d'approche $a(t)$ relatif à l'échauffement de l'âme par rapport à la surface extérieure du câble est alors donné par:

$$a(t) = \theta_c(t) / \left[W_c (T_A + T_B) \right] \quad (4-35)$$

4.2.4 Calcul de la réponse transitoire partielle de l'environnement des câbles

L'environnement des câbles constitue la deuxième partie du circuit thermique. Les méthodes de calcul du régime transitoire thermique partiel sont définies dans les paragraphes suivants.

4.2.4.1 Câbles enterrés (directement ou en fourreaux)

La réponse transitoire de l'environnement des câbles se calcule à l'aide de la fonction exponentielle intégrale qui est l'équivalent direct en régime transitoire de la procédure adoptée dans la Publication 287 de la CEI pour le régime permanent, dans le cas d'un groupe de câbles séparés.

L'échauffement transitoire, $\theta_e(t)$, au-dessus de la température ambiante, de la surface extérieure du câble le plus chaud d'un groupe de câbles également chargés est:

$$\theta_e(t) = \frac{\rho_T W_1}{4\pi} \left\{ \left[-Ei \left(\frac{-D_e^2}{16t\delta} \right) - \left[-Ei \left(\frac{-L^2}{t\delta} \right) \right] \right] + \sum_{k=1}^{N-1} \left[-Ei \left(\frac{-(d_{pk})^2}{4t\delta} \right) - \left[-Ei \left(\frac{(d_{pk})^2}{4t\delta} \right) \right] \right] \right\} \quad (4-36)$$

4.2.3 Calculation of cable partial transient

The transient response of a cable circuit to a step function of load current, considered in isolation, that is with the right-hand pair of terminals in Figure 2 short-circuited, is found as follows:

$$M_o = \frac{1}{2} \left(Q_A \{T_A + T_B\} + Q_B T_B \right) \quad (4-28)$$

$$N_o = Q_A T_A Q_B T_B \quad (4-29)$$

$$a = \frac{M_o + \sqrt{M_o^2 - N_o}}{N_o} \quad (4-30)$$

$$b = \frac{M_o - \sqrt{M_o^2 - N_o}}{N_o} \quad (4-31)$$

$$T_a = \frac{1}{a - b} \left[\frac{1}{Q_A} - b (T_A + T_B) \right] \quad (4-32)$$

$$T_b = T_A + T_B - T_a \quad (4-33)$$

and the transient temperature rise, $\theta_c(t)$, of the conductor above the outer surface of the cable is:

$$\theta_c(t) = W_c \left[T_a (1 - e^{-at}) + T_b (1 - e^{-bt}) \right] \quad (4-34)$$

where W_c is the power loss per unit length in a conductor or an equivalent conductor based on the maximum conductor temperature attained. The power loss is assumed to be constant during the transient.

The conductor to cable surface attainment factor $a(t)$ is then obtained from:

$$a(t) = \theta_c(t) / \left[W_c (T_A + T_B) \right] \quad (4-35)$$

4.2.4 Calculation of cable environment partial transient

The cable environment is the second part of the thermal circuit. The methods for calculating the partial thermal transient are set out in the following sub-clauses.

4.2.4.1 Buried cables (directly or in ducts)

The transient response of the cable environment is calculated by an exponential integral formula which is the direct transient equivalent of the steady-state procedure adopted in IEC Publication 287, for groups of separate cables.

The transient temperature rise, $\theta_e(t)$, above ambient of the outer surface of the hottest cable of a group of cables, and similarly loaded, is:

$$\theta_e(t) = \frac{\rho_T W_1}{4\pi} \left\{ \left[-Ei \left(\frac{-D_e^2}{16t\delta} \right) - \left[-Ei \left(\frac{-L^2}{t\delta} \right) \right] \right] + \sum_{k=1}^{N-1} \left[-Ei \left(\frac{-(d_{pk})^2}{4t\delta} \right) - \left[-Ei \left(\frac{(d_{pk})^2}{4t\delta} \right) \right] \right] \right\} \quad (4-36)$$

où:

W_1	= puissance totale dissipée par effet Joule, par unité de longueur de chaque câble du groupe
$-Ei(-x)$	= fonction exponentielle intégrale. L'évaluation de cette fonction est facilitée par l'utilisation, soit des axes à double échelle de l'exponentielle intégrale fournis dans les figures 6 et 7, soit des formules des notes explicatives de ces figures
ρ_T	= résistivité thermique du sol
D_e	= diamètre de la surface extérieure du câble
δ	= diffusivité thermique du sol
t	= temps écoulé depuis l'instant d'application de l'échauffement
L	= profondeur de pose mesurée au centre du câble le plus chaud
d_{pk}	= distance du centre du câble k au centre du câble le plus chaud p
d'_{pk}	= distance de l'image du centre du câble k au centre du câble le plus chaud p
N	= nombre de câbles

La sommation s'étend à tous les câbles du groupe, à l'exception du câble le plus chaud, et ce terme est supprimé si l'on ne considère qu'un câble unique.

Cette formule a été simplifiée à l'article 7 pour les calculs concernant les capacités de transport en régime cyclique.

4.2.4.2 Câble posé à l'air libre

Pour les câbles posés à l'air libre, il n'est pas nécessaire de calculer une réponse séparée pour l'environnement des câbles. Le régime transitoire complet $\theta(t)$ s'obtient en remplaçant T_B par $(T_B + T_C)$ dans les termes de la formule donnant $\theta_c(t)$ au paragraphe 4.2.3. Tous les détails sont donnés au paragraphe 4.4.1.2.

4.3 Calcul des réponses transitoires partielles pour les courtes durées ($\leq \frac{1}{3} T.Q$)

Ces formules conviennent généralement pour des durées comprises entre 10 min et 1 h environ: voir le paragraphe 4.1.4 pour les durées exactes.

4.3.1 Représentation de l'isolant (câbles unipolaires et tripolaires)

La méthode est la même qu'au paragraphe 4.2.1, excepté que l'enveloppe isolante du câble est divisée en deux parties d'égales résistances thermiques, comme indiqué à la figure 4, par un cercle de diamètre: $d_x = \sqrt{D_i \cdot d_c}$

Sur cette figure:

T_i = résistance thermique de l'isolant donnée dans la Publication 287 de la CEI

p^* = facteur pour chaque partie de l'isolant ainsi divisé

$$p^* = \frac{1}{\ln \left(\frac{D_i}{d_c} \right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_i}{d_c} \right) - 1} \quad (4-37)$$

Note. — Cette formule diffère de celle du paragraphe 4.2.1.1 du fait du remplacement de d_x par $\sqrt{D_i \cdot d_c}$.

D_i = diamètre extérieur de l'isolant

d_c = diamètre extérieur de l'âme

Q_c = capacité thermique de l'âme ou de l'âme du conducteur unipolaire équivalent

$Q_{i1} = \sigma \frac{\pi}{4} d_c(D_i - d_c)$ = capacité thermique de la première partie de l'isolant

$Q_{i2} = \sigma \frac{\pi}{4} D_i(D_i - d_c)$ = capacité thermique de la deuxième partie de l'isolant

σ = capacité thermique volumique de l'isolant

where:

- W_1 = the total power loss per unit length of each cable in the group
 $-Ei(-x)$ = the exponential integral function. Evaluation of this function is facilitated by using either the exponential integral scales provided in Figures 6 and 7 or the formulae in the notes to those figures
 ρ_T = soil thermal resistivity
 D_e = external surface diameter of cable
 δ = soil thermal diffusivity
 t = time from moment of application of heating
 L = axial depth of burial of hottest cable
 d_{pk} = distance from centre of cable k to centre of hottest cable p
 d'_{pk} = distance from image of centre of cable k to the centre of hottest cable p
 N = number of cables

The summation extends over all the cables in the group except the hottest, and this summation term is not needed if only a single cable is being considered.

This formula has been simplified for cyclic rating purposes in Clause 7.

4.2.4.2 Cables in air

For cables in air it is unnecessary to calculate a separate response for the cable environment. The complete transient $\theta(t)$ is obtained by replacing T_B by $(T_B + T_C)$ in the constituent terms of the formula for $\theta_c(t)$ in Sub-clause 4.2.3. Full details are set out in Sub-clause 4.4.1.2.

4.3 Calculation of partial transients for short duration ($\leq \frac{1}{3} T_Q$)

These formulae are usually suitable for times from 10 min to about 1 h; see Sub-clause 4.1.4 for exact durations.

4.3.1 Representation of the dielectric (single and three-core cables)

The method is the same as in Sub-clause 4.2.1 except that the cable insulation is divided at a diameter of $d_x = \sqrt{D_i \cdot d_c}$ giving two portions having equal thermal resistances, as shown in Figure 4.

In this figure:

T_i = thermal resistance of insulation, given in IEC Publication 287

p^* = factor for each portion of the divided insulation

$$p^* = \frac{1}{\ln \left(\frac{D_i}{d_c} \right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_i}{d_c} \right) - 1} \quad (4-37)$$

Note. — This formula differs from that in Sub-clause 4.2.1.1 because of the substitution of $d_x = \sqrt{D_i \cdot d_c}$.

D_i = external diameter of insulation

d_c = external diameter of conductor

Q_c = thermal capacitance of conductor or equivalent single-core conductor

$Q_{i1} = \sigma \frac{\pi}{4} d_c (D_i - d_c)$ = thermal capacitance of first portion of insulation

$Q_{i2} = \sigma \frac{\pi}{4} D_i (D_i - d_c)$ = thermal capacitance of second portion of insulation

σ = volumetric specific heat of insulation

La résistance thermique et la capacité thermique sont calculées pour une âme ou une âme d'un conducteur unipolaire équivalent ainsi qu'il est indiqué au paragraphe 4.2.1.

4.3.2 Représentation du câble

4.3.2.1 Généralités

La première partie du circuit thermique qui simule le câble est toujours représentée par un réseau à deux cellules (voir figure 2). La première cellule comprend la capacité thermique de l'âme et la partie interne de la portion intérieure de l'isolant, plus la moitié de la résistance thermique de cet isolant. La seconde cellule comprend la partie restante de la cellule en π avec le reste du câble représenté comme indiqué au paragraphe 4.2.2.1. Généralement, cela donnera une représentation d'un câble consistant en plus de deux cellules. On trouve dans la figure 5 un exemple de ce cas, illustrant les câbles du point a) du paragraphe 4.3.2.2.

Ces cellules sont alors réduites à deux, ainsi qu'il est indiqué au paragraphe 4.2.2.3 et dans l'annexe A, en prenant soin de garder intacte la première cellule.

Les formules des constantes de la figure 2 pour les types les plus courants de câbles et d'installations sont données dans les paragraphes suivants.

4.3.2.2 Représentation de types courant de câbles

Note. — Les symboles sont définis uniquement lorsqu'ils sont utilisés pour la première fois.

a) *Câbles isolés au papier imprégné de matière visqueuse ou d'huile fluide sous gaine métallique, câbles à isolant extrudé et autres structures analogues du point de vue thermique*

$$T_A = \frac{1}{2} T_1 \quad (4-38)$$

$$T_B = \frac{1}{2} T_1 + q_s T_3 \quad (4-39)$$

$$Q_A = Q_c + p^* Q_{i1} \quad (4-40)$$

$$Q_B = p^* Q_{i2} + (1 - p^*) Q_{i1} + \left[(1 - p^*) Q_{i2} + \frac{Q_s + p' Q_j}{q_s} \right] \left(\frac{q_s T_3}{\frac{1}{2} T_1 + q_s T_3} \right)^2 \quad (4-41)$$

Les symboles sont définis au point a) du paragraphe 4.2.2.2 et au paragraphe 4.3.1.

L'élément terminal $(1 - p') Q_j / q_s$ (voir figure 5) est supprimé du fait que la réponse thermique transitoire du câble est calculée en supposant que les bornes de sortie côté droit sont court-circuitées.

b) *Câbles en tuyau (à huile fluide sous forte pression)*

$$T_A = \frac{1}{2} T_1 \quad (4-42)$$

$$T_B = \frac{1}{2} T_1 + q_s T_o + q_e T_3 \quad (4-43)$$

$$Q_A = Q_c + p^* Q_{i1} \quad (4-44)$$

$$Q_B = (1 - p^*) Q_{i1} + Q_{i2} \quad (4-45)$$

Les symboles sont définis au point b) du paragraphe 4.2.2.2 et au paragraphe 4.3.1.

Thermal resistance and capacitance are reckoned for one conductor or equivalent single-core conductor as in Sub-clause 4.2.1.

4.3.2 Representation of the cable

4.3.2.1 General

The first part of the thermal circuit simulates the cable and is always represented by a two-section network (see Figure 2). The first section includes the thermal capacitance of the conductor and the inner part of the inside portion of the dielectric plus half the thermal resistance of the dielectric. The second section contains the remaining π section along with the remainder of the cable represented as in Sub-clause 4.2.2.1. In general this will give a representation of a cable which consists of more than two sections. A typical example of this, based on the cables in Item a) of Sub-clause 4.3.2.2 below, is given in Figure 5.

These sections are then reduced to two sections as shown in Sub-clause 4.2.2.3 and Appendix A, being careful to keep the first section unaltered.

Formulae for the constants in Figure 2 for the more common types of cables and installations are given in the following sub-clauses.

4.3.2.2 Representation of common types of cable

Note. — Symbols are defined only where they are first used.

a) *Solid and self-contained oil-filled paper insulated cables, extruded cables and thermally similar constructions*

$$T_A = \frac{1}{2} T_1 \quad (4-38)$$

$$T_B = \frac{1}{2} T_1 + q_s T_3 \quad (4-39)$$

$$Q_A = Q_c + p^* Q_{i1} \quad (4-40)$$

$$Q_B = p^* Q_{i2} + (1 - p^*) Q_{i1} + \left[(1 - p^*) Q_{i2} + \frac{Q_s + p' Q_j}{q_s} \right] \left(\frac{q_s T_3}{\frac{1}{2} T_1 + q_s T_3} \right)^2 \quad (4-41)$$

The symbols are defined in Item a) of Sub-clause 4.2.2.2 and Sub-clause 4.3.1.

The final element $(1 - p^*) Q_j / q_s$ (see Figure 5) is omitted because the transient for the cable response is calculated on the assumption that the output terminals on the right-hand side are short-circuited.

b) *Pipe-type cables (high pressure oil-filled)*

$$T_A = \frac{1}{2} T_1 \quad (4-42)$$

$$T_B = \frac{1}{2} T_1 + q_s T_o + q_e T_3 \quad (4-43)$$

$$Q_A = Q_c + p^* Q_{i1} \quad (4-44)$$

$$Q_B = (1 - p^*) Q_{i1} + Q_{i2} \quad (4-45)$$

The symbols are defined in Item b) of Sub-clause 4.2.2.2 and Sub-clause 4.3.1.

c) Câbles en tuyau (à pression de gaz, câbles assemblés, à remplissage et armés)

$$T_A = \frac{1}{2} T_1 \quad (4-46)$$

$$T_B = \frac{1}{2} T_1 + q_s T_f + Q_a T_2 + q_j T_3 \quad (4-47)$$

$$Q_A = Q_c + p^* Q_{i1} \quad (4-48)$$

$$Q_B = (1 - p^*) Q_{i1} + Q_{i2} \quad (4-49)$$

Les symboles sont définis au point c) du paragraphe 4.2.2.2 et au paragraphe 4.3.1.

d) Câbles en tuyau (à pression de gaz, sans matière de remplissage ni armure)

$$T_A = \frac{1}{2} T_1 \quad (4-50)$$

$$T_B = \frac{1}{2} T_1 + q_s T_2 + q_e T_3 \quad (4-51)$$

$$Q_A = Q_c + p^* Q_{i1} \quad (4-52)$$

$$Q_B = (1 - p^*) Q_{i1} + 0,3 Q_{i2} \quad (4-53)$$

Les symboles sont définis aux points b), c) et d) du paragraphe 4.2.2.2 et au paragraphe 4.3.1.

e) Câbles en fourreaux

$$T_A = \frac{1}{2} T_1 \quad (4-54)$$

$$T_B = \frac{1}{2} T_1 + q_s (T_3 + T_4 + T_5) \quad (4-55)$$

$$Q_A = Q_c + p^* Q_{i1} \quad (4-56)$$

$$Q_B = (1 - p^*) Q_{i1} + 0,3 Q_{i2} \quad (4-57)$$

Les symboles sont définis aux points b), c) et e) du paragraphe 4.2.2.2 et au paragraphe 4.3.1.

4.3.2.3 Câbles tripolaires de tous types en fourreaux ou enterrés directement dans le sol

a) Pour le tout début du régime transitoire, c'est-à-dire pour des durées jusqu'à la valeur du produit $T.Q$ (où T est la résistance thermique d'un conducteur isolé et Q sa capacité thermique) la méthode consiste à calculer la chute de température dans l'isolant du conducteur. Les quantités à introduire dans les équations du paragraphe 4.3.3 sont:

$$T_A = \frac{1}{2} T_1 \quad (4-58)$$

$$T_B = \frac{1}{2} T_1 \quad (4-59)$$

$$Q_A = Q_c + p^* Q_{i1} \quad (4-60)$$

$$Q_B = (1 - p^*) Q_{i1} + Q_{i2} \quad (4-61)$$

où les quantités T_1 , Q_c , Q_{i1} et Q_{i2} se rapportent à un seul conducteur isolé. On peut ici négliger l'échauffement mutuel entre conducteurs.

c) *Pipe-type cables (gas pressure, cables laid up, filled and armoured)*

$$T_A = \frac{1}{2} T_1 \quad (4-46)$$

$$T_B = \frac{1}{2} T_1 + q_s T_f + Q_a T_2 + q_j T_3 \quad (4-47)$$

$$Q_A = Q_c + p^* Q_{i1} \quad (4-48)$$

$$Q_B = (1 - p^*) Q_{i1} + Q_{i2} \quad (4-49)$$

The symbols are defined in Item c) of Sub-clause 4.2.2.2 and Sub-clause 4.3.1.

d) *Pipe-type cables (gas pressure, no filling material or armour)*

$$T_A = \frac{1}{2} T_1 \quad (4-50)$$

$$T_B = \frac{1}{2} T_1 + q_s T_2 + q_e T_3 \quad (4-51)$$

$$Q_A = Q_c + p^* Q_{i1} \quad (4-52)$$

$$Q_B = (1 - p^*) Q_{i1} + 0.3 Q_{i2} \quad (4-53)$$

The symbols are defined in Items b), c) and d) of Sub-clause 4.2.2.2 and Sub-clause 4.3.1.

e) *Cables in ducts*

$$T_A = \frac{1}{2} T_1 \quad (4-54)$$

$$T_B = \frac{1}{2} T_1 + q_s (T_3 + T_4 + T_4') \quad (4-55)$$

$$Q_A = Q_c + p^* Q_{i1} \quad (4-56)$$

$$Q_B = (1 - p^*) Q_{i1} + 0.3 Q_{i2} \quad (4-57)$$

The symbols are defined in Items b), c) and e) of Sub-clause 4.2.2.2 and Sub-clause 4.3.1.

4.3.2.3 *Three-core cables of all types, in ducts or buried directly in the ground*

a) For the very early part of the transient, i.e. for durations up to the value of the product TQ (where T is the thermal resistance of a core and Q is its thermal capacitance) the method is to calculate the temperature difference across the core insulation only. The quantities to be entered into the equations of Sub-clause 4.3.3 are:

$$T_A = \frac{1}{2} T_1 \quad (4-58)$$

$$T_B = \frac{1}{2} T_1 \quad (4-59)$$

$$Q_A = Q_c + p^* Q_{i1} \quad (4-60)$$

$$Q_B = (1 - p^*) Q_{i1} + Q_{i2} \quad (4-61)$$

where the quantities T_1 , Q_c , Q_{i1} and Q_{i2} refer to one core. Mutual heating between the cores can be ignored.

- b) Pour les durées de l'ordre de $\frac{1}{2} T.Q$ et au-delà (les quantités T et Q se rapportent maintenant à l'ensemble du câble), le régime transitoire est calculé d'après le paragraphe 4.2, en y incluant, si nécessaire, l'influence du sol telle qu'indiquée au paragraphe 4.2.4.
- c) Pour les durées comprises entre ces deux limites, $T.Q$ pour un conducteur isolé et $\frac{1}{2} T.Q$ pour l'ensemble du câble, on admet que le régime transitoire est donné par interpolation linéaire de la courbe d'échauffement en coordonnées semi-logarithmiques (échauffement linéaire et temps logarithmique).

4.3.2.4 Représentation des câbles et d'installations de types non spécifiés au paragraphe précédent

Le paragraphe précédent donne les circuits appropriés à la plupart des types de câbles. Néanmoins, afin de faire face aux imprévus, la méthode détaillée au paragraphe 4.2.2.3 est recommandée dans les cas non traités d'une façon spécifique par la présente norme.

4.3.3 Calcul de la réponse transitoire partielle du câble

La réponse transitoire en température d'un circuit thermique, comme indiqué au paragraphe 4.3.2, à l'application d'un échelon de courant de charge, considéré isolément, c'est-à-dire avec la paire de bornes du côté droit de la figure 2 mise en court-circuit, s'obtient de la façon suivante:

$$M_o = \frac{1}{2} \left(Q_A \{ T_A + T_B \} + Q_B T_B \right) \quad (4-62)$$

$$N_o = Q_A T_A Q_B T_B \quad (4-63)$$

$$a = \frac{M_o + \sqrt{M_o^2 - N_o}}{N_o} \quad (4-64)$$

$$b = \frac{M_o - \sqrt{M_o^2 - N_o}}{N_o} \quad (4-65)$$

$$T_a = \frac{1}{a - b} \left[\frac{1}{Q_A} - b(T_A + T_B) \right] \quad (4-66)$$

$$T_b = (T_A + T_B) - T_a \quad (4-67)$$

et l'échauffement transitoire $\theta_c(t)$ de l'âme par rapport à la surface du câble est:

$$\theta_c(t) = W_c \left[T_a (1 - e^{-at}) + T_b (1 - e^{-bt}) \right] \quad (4-68)$$

où W_c représente les pertes Joule par unité de longueur dissipée dans une âme à sa température maximale. Ces pertes sont supposées constantes pendant le phénomène transitoire.

Le facteur d'approche $a(t)$ relatif à l'échauffement transitoire de l'âme par rapport à la surface extérieure du câble est déterminé à partir de:

$$a(t) = \theta_c(t) / \left[W_c (T_A + T_B) \right] \quad (4-69)$$

- b) For durations of about $\frac{1}{2} T.Q$ (the quantities T and Q now refer to the whole cable) and greater, the transient is calculated according to Sub-clause 4.2 including if appropriate the influence of the ground given in Sub-clause 4.2.4.
- c) For durations between these two limits, $T.Q$ for one core and $\frac{1}{2} T.Q$ for the whole cable, the transient is assumed to be given by straight line interpolation on linear temperature rise/logarithmic time axes.

4.3.2.4 Representation of cables and installations of types not specified in previous sub-clause

The previous sub-clause provides circuits for most cable types. However, to cover contingencies, the method of Sub-clause 4.2.2.3 is recommended for cases not specifically dealt with in this standard.

4.3.3 Calculation of cable partial transient

The transient temperature response of a thermal circuit of Sub-clause 4.3.2, to a step function of load current, considered in isolation, that is with the right-hand pair of terminals in Figure 2 short-circuited, is found as follows:

$$M_o = \frac{1}{2} \left(Q_A \{ T_A + T_B \} + Q_B T_B \right) \quad (4-62)$$

$$N_o = Q_A T_A Q_B T_B \quad (4-63)$$

$$a = \frac{M_o + \sqrt{M_o^2 - N_o}}{N_o} \quad (4-64)$$

$$b = \frac{M_o - \sqrt{M_o^2 - N_o}}{N_o} \quad (4-65)$$

$$T_a = \frac{1}{a - b} \left[\frac{1}{Q_A} - b(T_A + T_B) \right] \quad (4-66)$$

$$T_b = (T_A + T_B) - T_a \quad (4-67)$$

and the transient temperature rise $\theta_c(t)$ of the conductor above the surface of the cable is:

$$\theta_c(t) = W_c \left[T_a (1 - e^{-at}) + T_b (1 - e^{-bt}) \right] \quad (4-68)$$

where W_c is the power loss per unit length in a conductor, based on the maximum conductor temperature. The power loss is assumed to be constant during the transient.

The conductor to cable surface attainment factor $a(t)$ for the transient temperature rise between the conductor and outside surface of the cable is then obtained from:

$$a(t) = \theta_c(t) / \left[W_c (T_A + T_B) \right] \quad (4-69)$$

4.3.4 Calcul de la réponse transitoire partielle de l'environnement des câbles

L'environnement des câbles constitue la deuxième partie du circuit thermique. Les méthodes de calcul du régime transitoire thermique partiel sont énoncées aux paragraphes suivants.

4.3.4.1 Câbles enterrés directement

a) Câbles unipolaires

Pour les câbles unipolaires enterrés directement, l'influence du sol autour du câble augmente avec le temps et peut être sensible, même pendant la période $\frac{1}{3} T.Q.$

Dans la méthode de calcul décrite ici, la contribution du sol suit la même règle que pour les durées plus longues traitées dans le paragraphe 4.2.4, mais des simplifications sont possibles du fait que les termes de l'image sont négligeables.

L'échauffement transitoire $\theta_c(t)$ de la surface extérieure du câble le plus chaud d'un groupe de câbles également chargés est:

$$\theta_c(t) = \frac{\rho_T W_1}{4 \pi} \left\{ \left[-Ei \left(\frac{-D_c^2}{16t\delta} \right) \right] + \sum_{k=1}^{N-1} \left[-Ei \left(\frac{-(d_{pk})^2}{4t\delta} \right) \right] \right\} \quad (4-70)$$

Sauf si les câbles se touchent ou sont très faiblement espacés, les termes sous le signe de sommation peuvent devenir négligeables pour les courtes périodes de temps considérées.

b) Câbles tripolaires

Pour les câbles tripolaires enterrés directement, la contribution du sol est négligeable pour des durées allant jusqu'à $\frac{1}{3} T.Q.$

4.3.4.2 Câbles en fourreaux

Pour tous types de câbles installés en fourreaux, la contribution du sol est négligeable pour des durées allant jusqu'à $\frac{1}{3} T.Q.$

4.3.4.3 Câbles posés à l'air libre

Pour tous types de câbles installés à l'air libre, il convient d'utiliser la méthode donnée au paragraphe 4.2.4.2.

4.4 Calcul de la réponse transitoire complète en température

4.4.1 Réponse transitoire en température

Après avoir calculé séparément les deux régimes transitoires partiels et le facteur d'approche relatif à l'âme par rapport à la surface du câble (voir paragraphe 4.2 ou 4.3), l'échauffement total transitoire ($\theta(t)$) au-dessus de la température ambiante s'obtient:

- pour les câbles enterrés, par simple addition de la réponse transitoire partielle du câble et de celle de l'environnement;
- pour les câbles posés à l'air libre, par modification de la réponse transitoire partielle du câble.

4.4.1.1 Câbles enterrés (directement ou en fourreaux)

$$\theta(t) = \theta_c(t) + a(t) \cdot \theta_e(t) \quad (4-71)$$

où:

$\theta(t)$ = échauffement transitoire de l'âme au-dessus de la température ambiante

$\theta_c(t)$ = échauffement transitoire de l'âme au-dessus de la température de la surface du câble

$\theta_e(t)$ = échauffement transitoire de la surface du câble au-dessus de la température ambiante à partir de $t = 0$, en supposant que les pertes totales (W_1) proviennent de la surface du câble

$a(t)$ = facteur d'approche relatif à l'échauffement transitoire de l'âme par rapport à la surface extérieure du câble

4.3.4 Calculation of cable environment partial transient

The cable environment is the second part of the thermal circuit. The methods for calculating the partial thermal transient are set out in the following sub-clauses.

4.3.4.1 Directly buried cables

a) Single-core cables

For single-core directly buried cables the influence of the ground around the cable increases with time and it may be significant even within the time period $\frac{1}{3} T.Q$.

With the present method of calculation the contribution of the ground follows the same lines as for the longer durations dealt with in Sub-clause 4.2.4 but some simplification is possible since the image terms are negligible.

The transient temperature rise $\theta_c(t)$ of the outer surface of the hottest cable of a group of cables loaded in the same manner is:

$$\theta_c(t) = \frac{\rho_T W_1}{4 \pi} \left\{ \left[- Ei \left(\frac{- D_c^2}{16 t \delta} \right) \right] + \sum_{k=1}^{N-1} \left[- Ei \left(\frac{- (d_{pk})^2}{4 t \delta} \right) \right] \right\} \quad (4-70)$$

Unless cables are touching or are very closely spaced the term inside the summation sign is likely to be negligible for the short periods of time involved.

b) Three-core cables

For three-core directly buried cables the contribution of the ground is negligible for durations up to $\frac{1}{3} T.Q$.

4.3.4.2 Cables in ducts

For all types of cables installed in ducts the contribution of the ground is negligible for durations up to $\frac{1}{3} T.Q$.

4.3.4.3 Cables in air

For all types of cables installed in air, use the method set out in Sub-clause 4.2.4.2.

4.4 Calculation of the complete temperature transient

4.4.1 Transient temperature response

After calculating separately the two partial transients and the conductor to cable surface attainment factor (see Sub-clause 4.2 or 4.3) the total transient rise ($\theta(t)$) above ambient temperature is obtained:

- a) for buried configurations by simple addition of the cable and modified environment partial transients;
- b) for cables in air by modification of the cable partial transient.

4.4.1.1 Buried cables (directly or in ducts)

$$\theta(t) = \theta_c(t) + \alpha(t) \cdot \theta_e(t) \quad (4-71)$$

where:

- $\theta(t)$ = transient temperature rise of conductor above ambient
- $\theta_c(t)$ = transient temperature rise of conductor above cable surface
- $\theta_e(t)$ = transient temperature rise of cable surface above ambient from $t = 0$, assuming total losses (W_1) from cable surface
- $\alpha(t)$ = attainment factor for the transient temperature rise between the conductor and the outside surface of the cable

4.4.1.2 Câbles posés à l'air libre

Dans ce cas:

$$\theta(t) = \theta_c(t) \quad (4-72)$$

et $\theta_c(t)$ s'obtient en remplaçant T_B par $(T_B + T_C)$ dans la formule du paragraphe 4.3.3,

où:

$T_C = q_s.T_4$ pour les câbles unipolaires, à isolant papier imprégné de matière visqueuse ou d'huile fluide

$T_C = q_e.T_4$ pour les câbles en tuyau à huile fluide ou à pression de gaz

$T_C = q_j.T_4$ pour les câbles en tuyau remplis de gaz

$T_C = q_a.T_4$ pour les câbles tripolaires; pour ces câbles, lorsque la durée du régime transitoire est inférieure au produit $T.Q$ calculé pour un seul conducteur isolé (voir paragraphes 4.1.4 et 4.3.2.3), alors $T_C = 0$

q_s , q_e , q_j et q_a sont définis dans la liste des symboles

T_4 est la résistance thermique extérieure due à l'air en régime permanent, calculée selon le paragraphe 9.1 de la Publication 287 de la CEI et doit se rapporter à un conducteur ou à un conducteur équivalent.

4.4.2 Correction à la réponse transitoire en température pour tenir compte de la variation des pertes dans l'âme avec la température (régimes de secours seulement)

La variation de résistance de l'âme avec la température pendant le régime transitoire a pour conséquence une variation des pertes dans l'âme en fonction du temps. En tenant compte de la variation des pertes dans l'âme avec la température, on obtient l'échauffement corrigé:

$$\theta_a(t) = \frac{\theta(t)}{1 + a (\theta(\infty) - \theta(t))} \quad (4-73)$$

où:

$\theta(t)$ = échauffement transitoire de l'âme au-dessus de la température ambiante sans correction pour la variation des pertes dans l'âme, fondée sur la résistance de l'âme à la fin du régime transitoire

$\theta(\infty)$ = échauffement de l'âme au-dessus de la température ambiante en régime permanent

a = coefficient de température de la résistivité électrique du matériau de l'âme au début du régime transitoire

Note. — $a = \frac{1}{\beta + \theta_i}$

où:

β = inverse du coefficient de température à 0 °C (voir tableau E2)

θ_i = température de l'âme au début du régime transitoire

4.4.3 Réponse transitoire en température causée par l'application brusque de tension (régime transitoire dû aux pertes diélectriques)

Dans les paragraphes précédents, on a supposé que l'échauffement de l'âme dû aux pertes diélectriques avait atteint son état stationnaire et que la température totale à un instant quelconque du régime transitoire pouvait s'obtenir par simple addition de l'échauffement constant dû aux pertes diélectriques et de l'échauffement transitoire dû au courant de charge.

Si l'application du courant de charge et de la tension du réseau ont lieu simultanément, il faut calculer l'échauffement transitoire additionnel dû aux pertes diélectriques.

4.4.3.1 Câbles de tensions inférieures ou égales à 275 kV

a) Longues durées ($> \frac{1}{3} T.Q$)

Dans ce cas, il suffit d'admettre que la moitié des pertes diélectriques est produite au niveau de l'âme et l'autre moitié au niveau de l'écran sur l'enveloppe isolante ou de la gaine. Le circuit

4.4.1.2 *Cables in air*

For this case:

$$\theta(t) = \theta_c(t) \quad (4-72)$$

and $\theta_c(t)$ is obtained by replacing T_B by $(T_B + T_C)$ in the formula of Sub-clause 4.3.3.

where:

$T_C = q_s.T_4$ for single-core cables, solid type and oil-filled paper insulated cables

$T_C = q_c.T_4$ for pipe-type oil-filled and gas pressure cables

$T_C = q_j.T_4$ for pipe-type gas-filled cables

$T_C = q_a.T_4$ for three-core cables: for three-core cables, when the duration of the transient is less than the product $T.Q$ of one core (see Sub-clauses 4.1.4 and 4.3.2.3) then $T_C = 0$

q_s , q_c , q_j and q_a are defined in the list of symbols

T_4 is the external thermal resistance due to air in the steady-state, calculated according to Sub-clause 9.1 of IEC Publication 287, and shall be expressed as a quantity per conductor or equivalent conductor.

4.4.2 *Correction to transient temperature response for variation in conductor losses with temperature (emergency ratings only)*

The change in conductor resistance with temperature during the transient results in conductor losses being variable with time. Allowance for the variation of conductor loss with temperature gives the corrected temperature rise:

$$\theta_a(t) = \frac{\theta(t)}{1 + a(\theta(\infty) - \theta(t))} \quad (4-73)$$

where:

$\theta(t)$ = is the conductor transient temperature rise above ambient without correction for variation in conductor loss, and is based on the conductor resistance at the end of the transient

$\theta(\infty)$ = is the conductor steady-state temperature rise above ambient

a = is the temperature coefficient of electrical resistivity of the conductor material at the start of the transient

Note. — $a = \frac{1}{\beta + \theta_i}$

where:

β = reciprocal of temperature coefficient at 0 °C (see Table E2)

θ_i = conductor temperature at start of the transient

4.4.3 *Transient temperature response caused by sudden application of voltage (transient due to dielectric loss)*

In the preceding sub-clauses it has been assumed that the temperature rise of the conductor due to the dielectric loss has reached its steady state, and that the total temperature at any time during the transient can be obtained simply by adding the constant rise due to the dielectric loss to the transient value due to the load current.

If the application of load current and system voltage occur at the same time, then an additional transient temperature rise due to the dielectric loss has to be calculated.

4.4.3.1 *Cables at voltages up to and including 275 kV*a) *Long durations ($> \frac{1}{3} T.Q$)*

In this case, it is sufficient to assume that half the dielectric loss is produced at the conductor and the other half at the core-screen or sheath. The cable thermal circuit is derived by the method

thermique du câble s'obtient selon la méthode donnée au paragraphe 4.2, c'est-à-dire que le coefficient p , attribuant à l'âme une fraction de la capacité thermique de l'isolant, est le même que celui utilisé pour le calcul des régimes transitoires dus aux pertes joule. Par rapport au régime transitoire dû aux pertes joule, les seules différences résident dans le fait que les pertes diélectriques partant de l'âme sont égales à $\frac{1}{2}W_d$ et que les coefficients q_s , q_e , q_a et q_j sont toujours égaux à 2.

b) Courtes durées ($\leq \frac{1}{3} T.Q$)

L'approche est la même que celle donnée au point *a*) ci-dessus, mais le coefficient p répartissant les différentes fractions de la capacité thermique de l'isolant doit être celui indiqué au paragraphe 4.3.

4.4.3.2 Câbles de tension supérieure à 275 kV

Dans ce cas, les pertes diélectriques peuvent représenter une fraction importante des pertes totales (c'est-à-dire câbles isolés au papier) et le coefficient p donné aux paragraphes 4.2.1 et 4.3.1, servant à répartir la capacité thermique de l'isolant entre l'âme et la gaine, doit être remplacé par:

$$p_d = \frac{\left[\left(\frac{D_i}{d_c} \right)^2 \ln \frac{D_i}{d_c} \right] - \left[\ln \frac{D_i}{d_c} \right]^2 - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{D_i}{d_c} \right)^2 - 1 \right]}{\left[\left(\frac{D_i}{d_c} \right)^2 - 1 \right] \left[\ln \frac{D_i}{d_c} \right]^2} \quad (4-74)$$

où:

D_i = diamètre extérieur de l'enveloppe isolante

d_c = diamètre extérieur de l'âme

Le reste du circuit thermique, en dehors de la gaine, est le même que pour le cas des pertes dans l'âme.

La fraction des pertes diélectriques partant de l'âme est toujours prise égale à $\frac{1}{2} W_d$, et les coefficients q_s , q_e , q_a et q_j sont égaux à 2.

SECTION TROIS — CAPACITÉS DE TRANSPORT EN RÉGIME CYCLIQUE

5. Calcul du facteur de capacité de transport cyclique (M)

5.1 Généralités

Le facteur de capacité de transport cyclique est désigné par M et représente le facteur par lequel le courant nominal admissible en régime permanent (facteur de charge 100%) peut être multiplié pour obtenir la valeur de pointe du courant au cours d'un cycle journalier (24 h), de sorte qu'au cours de ce cycle, l'âme atteigne, sans la dépasser, la température maximale admissible prescrite. Défini de cette manière, un facteur de capacité de transport cyclique a pour référence la température en régime permanent, qui est habituellement la température maximale admissible. Ce facteur dépend seulement de la forme du cycle de charge journalier et est ainsi indépendant des amplitudes réelles du courant.

Le facteur de charge des pertes (μ) de cycle journalier de courant est d'abord déterminé (voir article 6) en décomposant le cycle en créneaux horaires. Les réponses thermiques du câble et du sol au cycle entier de pertes peuvent s'obtenir en ajoutant la réponse de chaque créneau horaire, en tenant compte de la durée entre chaque impulsion et du temps où la température est maximale.

given in Sub-clause 4.2, i.e. the coefficient p which apportions to the conductor a fraction of the dielectric thermal capacitance is the same as that used when calculating transient due to joule losses. In comparison with the transients due to joule loss, the only differences are that a dielectric loss of $\frac{1}{2} W_d$ starts from the conductor and that the coefficients q_s , q_e , q_a and q_j are always equal to 2.

b) Short durations ($\leq \frac{1}{3} T.Q$)

The approach is the same as in Item *a*) above, but the coefficient p apportioning the different fractions of the dielectric thermal capacitance shall be that given in Sub-clause 4.3.

4.4.3.2 Cables at voltages higher than 275 kV

In this case, the dielectric loss can be an important fraction of the total loss (i.e. paper insulated cables) and the coefficient p in Sub-clauses 4.2.1 and 4.3.1, used to apportion the thermal capacitance of the dielectric to the conductor and sheath, shall be replaced by:

$$p_d = \frac{\left[\left(\frac{D_i}{d_c} \right)^2 \ln \frac{D_i}{d_c} \right] - \left[\ln \frac{D_i}{d_c} \right]^2 - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{D_i}{d_c} \right)^2 - 1 \right]}{\left[\left(\frac{D_i}{d_c} \right)^2 - 1 \right] \left[\ln \frac{D_i}{d_c} \right]^2} \quad (4-74)$$

where:

D_i = external diameter of insulation

d_c = external diameter of conductor

The rest of the thermal circuit, outside the sheath, is the same as for the case of the conductor loss.

The fraction of the dielectric loss starting from the conductor is still reckoned as $\frac{1}{2} W_d$, and the coefficients q_s , q_e , q_a and q_j are equal to 2.

SECTION THREE — CYCLIC RATINGS

5. Computation of the cyclic rating factor (M)

5.1 General

The cyclic rating factor is denoted by M , and is the factor by which the permissible steady-state rated current (100% load factor) may be multiplied to obtain the permissible peak value of current during a daily (24 h) cycle such that the conductor attains, but does not exceed, the standard permissible maximum temperature during this cycle. A factor defined in this way has the steady-state temperature, which is usually the permitted maximum temperature, as its reference. The cyclic rating factor depends only on the shape of the daily cycle and is thus independent of the actual magnitudes of the current.

The loss-load factor (μ) of the daily current cycle is determined first (see Clause 6) by decomposing the cycle into hourly rectangular pulses. The temperature responses of the cable and soil to the complete cycle of losses can be found by adding together the response to each hourly rectangular pulse, having regard to the time period between each pulse and the time of maximum temperature.

Il est nécessaire de connaître avec précision le cycle de charge pendant une période de 6 h seulement avant le temps où la température atteint sa valeur maximale, les valeurs précédentes pouvant être représentées avec une précision suffisante par une valeur moyenne. Le facteur de charge des pertes μ fournit cette moyenne. La détermination du temps où la température atteint sa valeur maximale est faite par examen en se rappelant que, bien que ce maximum apparaisse généralement à la fin de la période où le courant est le plus élevé, cela n'est pas toujours le cas.

Soit $\theta_R(i)$ l'échauffement de l'âme au bout de i heures après l'application d'un échelon de pertes correspondant au courant nominal I_R . L'échauffement maximal de l'âme au-dessus de la température ambiante, pour un courant cyclique journalier dont la valeur de pointe est le courant nominal, est:

$$\theta_{\max} = Y_0 \theta_R(1) + Y_1 [\theta_R(2) - \theta_R(1)] + Y_2 [\theta_R(3) - \theta_R(2)] + Y_5 [\theta_R(6) - \theta_R(5)] + \mu [\theta_R(\infty) - \theta_R(6)] \quad (5-1)$$

$$M = \sqrt{\frac{\theta_R(\infty)}{\theta_{\max}}} \quad (5-2)$$

où $Y_0, Y_1 \dots Y_5$ sont les ordonnées du cycle de charge des pertes pour la période de 6 h précédant la période où la température atteint sa valeur maximale (voir article 6).

Les formules spécifiques à différentes formes de cycles de charge sont données dans les paragraphes suivants.

5.2 Calcul du facteur de capacité de transport cyclique (en tenant compte de la capacité thermique du câble)

5.2.1 Cycle de charge quelconque de forme connue

Le facteur de capacité de transport cyclique est donné par:

$$M = \frac{1}{\sum_{i=0}^5 Y_i \left[\frac{\theta_R(i+1)}{\theta_R(\infty)} - \frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)} \right] + \mu \left[1 - \frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)} \right]^{1/2}} \quad (5-3)$$

$$\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)} = [1 - k + k \beta(i)] a(i) \quad (5-4)$$

$$\theta_R(0) = 0$$

$\beta(i)$ représente ici le facteur d'approche relatif à la surface extérieure du câble ou du fourreau, à savoir le rapport de l'échauffement au temps i à l'échauffement en régime permanent (équation (7-2)). $a(i)$ est le facteur d'approche relatif à l'échauffement de l'âme par rapport à la surface extérieure du câble (équation (7-1)).

Les formules servant au calcul de $\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)}$ sont données dans l'article 7.

Detail of the load cycle is needed over a period of only 6 h before the time of maximum temperature, and earlier values can be represented with sufficient accuracy by using an average. The loss-load factor μ provides this average. Location of the time of maximum temperature is done by inspection, bearing in mind that although it usually occurs at the end of the period of maximum current this may not always be the case.

Let the conductor temperature rise at time i hours after the application of a step function of losses corresponding to the rated current I_R be $\theta_R(i)$. Then the maximum conductor temperature rise above ambient for a daily cyclic current whose peak value is the rated current is:

$$\begin{aligned} \theta_{\max} = & Y_0 \theta_R(1) + Y_1 [\theta_R(2) - \theta_R(1)] + Y_2 [\theta_R(3) - \theta_R(2)] \\ & + Y_5 [\theta_R(6) - \theta_R(5)] + \mu [\theta_R(\infty) - \theta_R(6)] \end{aligned} \quad (5-1)$$

$$M = \sqrt{\frac{\theta_R(\infty)}{\theta_{\max}}} \quad (5-2)$$

where $Y_0, Y_1, \dots, Y_5$ are the ordinates of the loss-load cycle for the 6 h before the time of maximum temperature (see Clause 6).

Specific formulae for various forms of load cycle are given in the following sub-clauses.

5.2 Calculation of cyclic rating factor (including cable thermal capacitance)

5.2.1 Any load cycle of known shape

The cyclic rating factor is given by:

$$M = \frac{1}{\sum_{i=0}^5 Y_i \left[\frac{\theta_R(i+1)}{\theta_R(\infty)} - \frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)} \right] + \mu \left[1 - \frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)} \right]^{1/2}} \quad (5-3)$$

$$\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)} = \left[1 - k + k \beta(i) \right] a(i) \quad (5-4)$$

$$\theta_R(0) = 0$$

Here $\beta(i)$ is the attainment factor for the cable or duct external surface, i.e. the ratio of the temperature rise at time i to the rise in the steady state (equation (7-2)). $a(i)$ is the attainment factor for the temperature rise of the conductor above the outside surface of the cable (equation (7-1)).

Formulae for calculating $\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)}$ are given in Clause 7.

5.2.2 Cycle de charge plafonné à une valeur constante

Un cycle de charge de valeur constante est un cycle dont le courant est maintenu à sa valeur maximale pendant une durée minimale de 6 h, sans restriction aucune quant à la forme du reste du cycle, excepté que l'échauffement maximal de l'âme se produit à la fin de la durée du palier au maximum de courant.

a) Pour un câble tripolaire seul, le facteur de charge cyclique est donné par:

$$M = \frac{1}{\left(1 - (1 - \mu) \left[1 - a(6) + ka(6) \{1 - \beta(6)\}\right]\right)^{1/2}} \quad (5-5)$$

où $a(6)$ est donné par l'équation (7-1), i étant exprimé en heures, et $1 - \beta(6)$ peut s'obtenir en utilisant le tableau 1 ou, si nécessaire, en se référant à l'annexe C.

k peut aussi s'obtenir par les formules de l'article 7.

b) Pour les groupes de câbles avec pertes égales, câbles ou fourreaux non jointifs.

Le facteur de capacité de transport cyclique est donné par:

$$M = \frac{1}{\left(\frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)} + \mu \left[1 - \frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)}\right]\right)^{1/2}} \quad (5-6)$$

où $\theta_R(6)/\theta_R(\infty)$ est donné par l'équation (7-6).

5.2.3 Cycle de charge de forme inconnue mais dont le facteur de charge des pertes (μ) est connu

Ce cycle peut être considéré comme un cycle de charge plafonné à une valeur constante et les formules du paragraphe 5.2.2 conviennent.

6. Calcul du facteur de charge des pertes (μ)

- Le cycle de charge journalier est tout d'abord exprimé en 24 valeurs horaires en graduant son échelle de manière que sa valeur maximale soit égale à l'unité (voir figure 8a).
- L'amplitude de chaque valeur horaire est ensuite élevée au carré pour donner 24 valeurs représentant le cycle des pertes par effet Joule du câble (voir figure 8b).
- Cette courbe est alors exprimée en une série de variations en échelons conduisant à une courbe discontinue en créneaux ayant approximativement la valeur moyenne de la courbe originale (voir figure 8c).
- On désigne par $Y_0, Y_1, Y_2, \dots, Y_5$ les ordonnées de la courbe en créneaux par les six périodes horaires précédant l'instant où la température atteint sa valeur maximale (voir figure 8c). La détermination de l'instant où la température atteint sa valeur maximale est faite par examen, en se rappelant que ce maximum apparaît généralement à la fin de la période où le courant est le plus élevé, mais que cela n'est pas toujours le cas. La température dépend également du niveau général de courant précédant cette période. Ainsi, dans l'exemple donné dans l'annexe F et à la figure 8, la température la plus élevée se produit à 17,5 h, bien que le courant soit passé par sa valeur maximale à 8 h. Il convient de noter que la méthode particulière adoptée pour le tracé des courbes de charge et des pertes de la figure 8 présuppose que les valeurs mesurées, données au tableau F4 de l'annexe F, s'appliquent à des durées s'étendant une demi-heure avant et après chaque période d'observation.
- Les autres ordonnées sont alors désignées par $Y_6, Y_7, \dots, Y_{23}$, d'une manière cyclique, de sorte que Y_{23} est adjacent à Y_0 .

5.2.2 Flat top load cycle

A flat top load cycle is a cycle with a sustained maximum current for a minimum duration of 6 h, without any restriction on the shape of the remainder of the cycle except that the maximum conductor temperature rise occurs at the end of the duration of the sustained maximum current.

a) For an isolated three-core cable, the cyclic rating factor is given by:

$$M = \frac{1}{\left(1 - (1 - \mu) \left[1 - a(6) + ka(6) \{1 - \beta(6)\}\right]\right)^{1/2}} \quad (5-5)$$

where $a(6)$ is given by equation (7-1), with i expressed in hours, and $1 - \beta(6)$ may be obtained from Table I, or if necessary from Appendix C.

Formulae for calculating k are given in Clause 7.

b) For groups of cables with equal losses, cables or ducts not touching.

The cyclic rating factor is given by:

$$M = \frac{1}{\left(\frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)} + \mu \left\{1 - \frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)}\right\}\right)^{1/2}} \quad (5-6)$$

where $\theta_R(6)/\theta_R(\infty)$ is given by equation (7-6).

5.2.3 Load cycle of unknown shape but with a known loss-load factor (μ)

This cycle may be considered as a flat top cycle and the formulae of Sub-clause 5.2.2 used.

6. Calculation of loss-load factor (μ)

- The daily load cycle is first expressed as 24 hourly values by scaling the whole cycle so that its maximum value is equal to unity (see Figure 8a).
- The magnitude of each hourly value is then squared to give 24 values representing the cycle of cable joule losses (see Figure 8b).
- This curve is then expressed as a series of step function changes so as to give a stepped curve having approximately the same average value as the original one (see Figure 8c).
- Denote the ordinates of the stepped curve for the six hourly periods before the occurrence of the highest temperature by $Y_0, Y_1, Y_2, \dots, Y_5$ (see Figure 8c). Location of the time of the highest temperature is done by inspection, bearing in mind that although it usually occurs at the end of the period of highest current, this may not always be the case. The temperature also depends on the general level of current preceding that period. Thus, in the example given in Appendix F and Figure 8, the highest temperature occurs at 17.5 h although the highest value of current was at 8 h. It should be noted that the particular way in which the load and loss-load curves of Figure 8 have been drawn assumes that the measured values in Table F4 apply to periods of time which extend half an hour before and after each observation time.
- The remaining ordinates are then designated by $Y_6, Y_7, \dots, Y_{23}$ in a cyclic manner so that Y_{23} is adjacent to Y_0 .

f) Le facteur de charge des pertes (μ) est donné par:

$$\mu = \frac{1}{24} \sum_{i=0}^{23} Y_i \quad (6-1)$$

7. Calcul de $\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)}$

7.1 Un seul câble tripolaire

Un câble tripolaire posé directement dans le sol ou en fourreau.

$$a(t) = \frac{T_a (1 - e^{-at}) + T_b (1 - e^{-bt})}{T_A + T_B} \quad (7-1)$$

$$\beta(t) = \frac{-Ei \left(-\frac{D_c^2}{16t\delta} \right) - \left[-Ei \left(-\frac{L^2}{t\delta} \right) \right]}{2 \ln \left(\frac{4L}{D_c} \right)} \quad (7-2)$$

$$k = \frac{W_1 T_4}{W_c (T_A + T_B) + W_1 T_4} \quad (7-3)$$

où:

D_c = diamètre du câble ou diamètre extérieur du fourreau

t = 3 600 i

T_a, T_b, T_A, T_B a et b sont calculés de la même façon qu'aux paragraphes 4.3.2 et 4.3.3, après évaluation des paramètres du câble unipolaire équivalent conformément au paragraphe 4.2.1.2

W_1 = pertes joule totales dans le câble par unité de longueur, à la température nominale

W_c = pertes joule dans une âme par unité de longueur, à la température nominale

T_4 = résistance thermique extérieure du câble unique ou du fourreau

$$= \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \frac{4L}{D_c} \quad (7-3a)$$

$-Ei(-x)$ est la fonction exponentielle intégrale. L'évaluation de cette formule est facilitée par l'utilisation soit des axes à double échelle de l'exponentielle intégrale donnés aux figures 6 et 7, soit des formules des notes accompagnant ces figures

Note. — Pour les temps inférieurs ou égaux à 6 h, le terme «image» (second terme du numérateur de l'équation (7-2)) peut être négligé.

Alors:

$$\frac{\theta(t)}{\theta(\infty)} = \left[1 - k + k \beta(t) \right] a(t) \quad (7-4)$$

et avec t exprimé en heure par i :

$$\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)} = \left[1 - k + k \beta(i) \right] a(i) \quad (7-5)$$

Cette expression est évaluée pour $i = 1, 2, 3... 6$.

t = secondes

i = heures

f) The loss-load factor (μ) is given by:

$$\mu = \frac{1}{24} \sum_{i=0}^{23} Y_i \quad (6-1)$$

7. Calculation of $\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)}$

7.1 Single isolated three-core cable

One three-core cable laid directly or in a duct.

$$a(t) = \frac{T_a (1 - e^{-at}) + T_b (1 - e^{-bt})}{T_A + T_B} \quad (7-1)$$

$$\beta(t) = \frac{-Ei \left(-\frac{D_c^2}{16t\delta} \right) - \left[-Ei \left(-\frac{L^2}{t\delta} \right) \right]}{2 \ln \left(\frac{4L}{D_c} \right)} \quad (7-2)$$

$$k = \frac{W_1 T_4}{W_c (T_A + T_B) + W_1 T_4} \quad (7-3)$$

where:

D_c = diameter of cable or external diameter of duct

t = 3 600 i

T_a, T_b, T_A, T_B, a and b are calculated as in Sub-clauses 4.3.2 and 4.3.3 after evaluating the parameters of the equivalent single-core cable according to Sub-clause 4.2.1.2

W_1 = total joule power loss in the cable per unit length at rated temperature

W_c = joule power loss in one conductor per unit length at rated temperature

T_4 = external thermal resistance of a single isolated cable or duct

$$= \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \frac{4L}{D_c} \quad (7-3a)$$

$-Ei(-x)$ is the exponential integral function. Evaluation of this formula is facilitated by using either the exponential integral scales provided in Figures 6 and 7 or the formulae in the notes to those figures

Note. — For times up to and including 6 h the “image” term (second term in the numerator of equation (7-2)) can be ignored.

Then:

$$\frac{\theta(t)}{\theta(\infty)} = \left[1 - k + k \beta(t) \right] a(t) \quad (7-4)$$

and with t expressed in hours by i :

$$\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)} = \left[1 - k + k \beta(i) \right] a(i) \quad (7-5)$$

This expression is evaluated for $i = 1, 2, 3 \dots 6$.

t = seconds

i = hours

7.2 Un seul circuit

- Trois câbles unipolaires jointifs, disposés en trèfle ou en nappe.
- Trois câbles unipolaires placés dans des fourreaux jointifs, disposés en trèfle ou en nappe.
- Câble en tuyau.

La méthode est la même qu'au paragraphe 7.1, excepté que:

- La résistance thermique extérieure (T_4) à utiliser est celle calculée pour les câbles en fourreaux jointifs, disposés en trèfle ou en nappe, à partir de la formule appropriée tirée de la Publication 287 de la CEI.
- W_1 représente les pertes totales par unité de longueur pour un seul câble ou un seul fourreau.
- La valeur du diamètre de câble ou fourreau utilisé est celle d'un seul câble ou fourreau.

7.3 Groupe de «N» câbles ayant des pertes égales; câbles ou fourreaux non jointifs

Dans ce cas, $\theta_R(i)$ est l'échauffement de l'âme du câble le plus chaud du groupe.

$$\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)} = \left[1 - k_1 + k_1 \gamma(i) \right] a(i) \quad (7-6)$$

où:

k_1 est le rapport de l'échauffement de la surface du câble (ou fourreau) au-dessus de la température ambiante à l'échauffement de l'âme au-dessus de la température ambiante en régime permanent, tous les câbles du groupe ayant des pertes identiques

$a(i)$ est donné par l'équation (7-1) avec i exprimé en heures ($t = 3600 i$)

$\gamma(i)$ est donné par l'équation suivante avec i exprimé en heures

Note. — Pour les temps inférieurs ou égaux à 6 h, les termes «images» (second et quatrième termes du numérateur de l'équation (7-7) suivante) peuvent être négligés.

$$\gamma(i) = \frac{-Ei \left(-\frac{D_c^2}{16t\delta} \right) - \left[-Ei \left(-\frac{L^2}{t\delta} \right) \right] + (N-1) \left\{ -Ei \left(-\frac{d_f^2}{16t\delta} \right) - \left[-Ei \left(-\frac{L^2}{t\delta} \right) \right] \right\}}{2 \ln \left(\frac{4LF}{D_c} \right)} \quad (7-7)$$

où:

$t = 3600 i$

$$F = \frac{d'_{p1} \cdot d'_{p2} \dots d'_{pk} \dots d'_{pN}}{d_{p1} \cdot d_{p2} \dots d_{pk} \dots d_{pN}} \quad (7-8)$$

avec $(N-1)$ termes, le terme d'_{pp}/d_{pp} étant exclu.

$$d_f = \frac{4L}{F^{1/(N-1)}} \quad (7-9)$$

et les distances d_{pk} et d'_{pk} sont définies dans la figure 9. Les valeurs de D_c et L à utiliser pour le calcul de $a(i)$ et $\gamma(i)$ se rapportent au câble le plus chaud ou au fourreau contenant le câble le plus chaud d'un groupe.

$$k_1 = \frac{W_1 (T_4 + \Delta T_4)}{W_c (T_A + T_B) + W_1 (T_4 + \Delta T_4)} \quad (7-10)$$

Dans cette formule, T_4 est la résistance thermique extérieure du câble le plus chaud du groupe s'il est seul; $T_4 + \Delta T_4$ est la résistance thermique extérieure du câble le plus chaud du groupe en tenant

7.2 Single isolated circuit

- Three single-core cables, laid touching, in trefoil or flat formation.
- Three single-core cables laid in touching ducts, in trefoil or flat formation.
- Pipe-type cable.

The method is the same as in Sub-clause 7.1, except that:

- The external thermal resistance (T_4) to be used is that for cables in ducts, in trefoil or flat touching formation calculated from the appropriate formula in the current edition of IEC Publication 287.
- W_1 is the total power loss per unit length per single cable or duct.
- The value of cable or duct diameter used is that of an isolated cable or duct.

7.3 Group of "N" cables with equal losses; cables or ducts not touching

In this case, $\theta_R(i)$ is the conductor temperature rise of the hottest cable in the group.

$$\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)} = \left[1 - k_1 + k_1 \gamma(i) \right] a(i) \quad (7-6)$$

where:

k_1 is the ratio of cable (or duct) surface temperature rise above ambient to conductor temperature rise above ambient under steady conditions, and with all cables of the group having equal losses

$a(i)$ is given by equation (7-1) with i expressed in hours ($t = 3600 i$)

$\gamma(i)$ is given by the following equation with i expressed in hours

Note. — For times up to and including 6 h, the image terms (second and fourth terms in the numerator of equation (7-7)) may be ignored.

$$\gamma(i) = \frac{-Ei \left(-\frac{D_e^2}{16t\delta} \right) - \left[-Ei \left(-\frac{L^2}{t\delta} \right) \right] + (N-1) \left\{ -Ei \left(-\frac{d_f^2}{16t\delta} \right) - \left[-Ei \left(-\frac{L^2}{t\delta} \right) \right] \right\}}{2 \ln \left(\frac{4LF}{D_e} \right)} \quad (7-7)$$

where:

$t = 3600 i$

$$F = \frac{d'_{p1} \cdot d'_{p2} \dots d'_{pk} \dots d'_{pN}}{d_{p1} \cdot d_{p2} \dots d_{pk} \dots d_{pN}} \quad (7-8)$$

with the term d'_{pp}/d_{pp} excluded, giving $(N-1)$ terms.

$$d_f = \frac{4L}{F^{1/(N-1)}} \quad (7-9)$$

and the distances d_{pk} and d'_{pk} are defined in Figure 9. The values of D_e and L to be used for the calculation of $a(i)$ and $\gamma(i)$ refer to the hottest cable, or the duct containing the hottest cable, of a group.

$$k_1 = \frac{W_1 (T_4 + \Delta T_4)}{W_c (T_A + T_B) + W_1 (T_4 + \Delta T_4)} \quad (7-10)$$

Where T_4 is the external thermal resistance of the hottest cable of the group if isolated, $T_4 + \Delta T_4$ is the external thermal resistance of the hottest cable of the group taking into account the losses,

compte des pertes de tous les câbles du groupe, supposées égales; les pertes Joule dans l'âme W_c et dans le câble W_1 par unité de longueur, pour le câble le plus chaud du groupe, correspondent à un fonctionnement de tous les câbles à 100% de leur charge.

$$\Delta T_4 = \frac{\rho_T \ln F}{2 \pi} \quad (7-11)$$

k_1 peut aussi être obtenu à partir de la formule:

$$k_1 = \frac{W_1 (T_4 + \Delta T_4)}{\theta(\infty)} \quad (7-12)$$

L'annexe C donne, en remplaçant k par k_1 , la relation entre k_1 et la résistivité thermique du sol.

7.4 Groupe de «N» circuits, composé chacun de trois câbles unipolaires ou fourreaux identiques et jointifs, tous les câbles ayant des pertes égales

Les méthodes sont les mêmes que celles données au paragraphe 7.3 ci-dessus, excepté que:

- a) La résistance thermique extérieure T_4 , dont dépend la valeur de k_1 , est celle d'un circuit isolé de trois câbles ou fourreaux jointifs (voir paragraphe 7.2).
- b) La valeur de N à utiliser dans le calcul de $\gamma(i)$, F et d_f par les équations (7-7), (7-8) et (7-9) est le nombre de circuits (de trois câbles unipolaires par circuit) et les valeurs de d_{pk} et d'_{pk} à employer sont données par:
 - d_{pk} = distance du centre du circuit k au centre du circuit contenant le câble le plus chaud
 - d'_{pk} = distance de l'image du centre du circuit k au centre du circuit contenant le câble le plus chaud.
- c) Le deuxième membre de l'équation (7-11) devra être multiplié par 3, F étant déterminé comme il est dit au point b) ci-dessus.
- d) W_1 représente les pertes Joule totales par unité de longueur d'un câble ou fourreau unique.
- e) La valeur du diamètre du câble ou du fourreau à faire intervenir dans le calcul de $\gamma(i)$ est celle d'un câble ou fourreau unique.

SECTION QUATRE — CAPACITÉS DE TRANSPORT EN RÉGIME DE SECOURS

8. Calcul des capacités de transport en régime de secours

8.1 Circuits thermiquement séparés

La procédure suivante de calcul de la capacité de transport en régime de courte durée des circuits uniques est fondée sur la connaissance de la température transitoire de l'âme calculée selon les méthodes développées dans l'article 4. La méthode particulière à utiliser fait appel aux critères donnés au paragraphe 4.1.4.

Considérons un circuit enterré unique transitant un courant constant I_1 , appliqué depuis un temps suffisamment long pour que les conditions du régime permanent soient effectivement atteintes. A un instant donné, défini par $t = 0$, on applique un courant de charge de secours I_2 (supérieur à I_1). I_2 étant appliqué pendant un temps donné t , la question est de savoir quelle peut être la valeur de I_2 pour que la température de l'âme ne dépasse pas une valeur spécifiée, compte tenu de la variation de la résistivité électrique de l'âme avec la température. Dans le développement ci-après, on néglige l'effet des pertes diélectriques, mais celles-ci sont considérées à la fin de ce paragraphe.

assumed to be equal, in all cables of the group, and the conductor losses W_c and cable joule losses W_1 per unit length of cable for the hottest cable of the group correspond to all cables working at a sustained 100% current.

$$\Delta T_4 = \frac{\rho_T \ln F}{2 \pi} \quad (7-11)$$

k_1 may also be found from the formula:

$$k_1 = \frac{W_1 (T_4 + \Delta T_4)}{\theta(\infty)} \quad (7-12)$$

The dependence of k_1 on soil thermal resistivity is given in Appendix C with k replaced by k_1 .

7.4 Group of “N” circuits, each of three single-core identical touching cables or ducts, all cables having equal losses

The methods are the same as those given in Sub-clause 7.3 above, except that:

- a) The external thermal resistance T_4 , on which the value of k_1 is dependent, relates to an isolated circuit of three touching cables or ducts (see Sub-clause 7.2).
- b) The value of N to be used for the calculation of $\gamma(i)$, F and d_f in equations (7-7), (7-8) and (7-9) is the number of circuits (of three single-core cables per circuit) and the values of d_{pk} and d'_{pk} are given by:

d_{pk} = distance from the centre of circuit k to centre of circuit containing the hottest cable

d'_{pk} = distance of image of centre of circuit k to centre of circuit containing the hottest cable.
- c) The right-hand side of equation (7-11) should be multiplied by 3, with F given by Item b) above.
- d) W_1 is the total joule loss per unit length per single cable or duct.
- e) The value of the cable or duct diameter to be assumed for the calculation of $\gamma(i)$ is that of an isolated cable or duct.

SECTION FOUR — EMERGENCY RATINGS

8. Calculation of emergency ratings

8.1 Thermally isolated circuits

The following procedure for calculating the short time rating of single circuits is based on a knowledge of the conductor temperature transient as derived by the methods set out in Clause 4. The particular method from Clause 4 to be used depends on the criteria given in Sub-clause 4.1.4.

Consider an isolated buried circuit carrying a constant current I_1 applied for a sufficiently long time for steady-state conditions to be effectively reached. Subsequently, from a time defined by $t = 0$, an emergency load current I_2 (greater than I_1) is applied. If I_2 is applied for any given time t , the question is how large may I_2 be so that conductor temperature does not exceed a specified value, taking into account the variation of the electrical resistivity of the conductor with temperature. The effect of dielectric loss is neglected in this treatment, but is taken into account at the end of this sub-clause.

Appelons:

- $r = \theta_{\max}/\theta_R(\infty)$
 $t =$ temps mesuré à partir de l'application du courant I_2
 $I_R =$ courant nominal permanent (facteur de charge de 100%) tel que l'âme atteigne, sans la dépasser, la température maximale admissible prescrite
 $I_1 =$ courant constant parcourant le câble avant l'application de la charge de secours
 $I_2 =$ courant de surcharge de secours qui, appliqué pendant le temps t , provoque à la fin de la période de secours un échauffement de l'âme au-dessus de la température ambiante, égal à $\theta_{\max}$
Note. — La méthode est valable seulement pour des valeurs de $I_2 \leq 2,5 I_R$.

- $h_1 = I_1/I_R$
 $R_1 =$ résistance de l'âme en courant alternatif avant l'application du courant de secours, c'est-à-dire à une température de l'âme correspondant au courant I_1
 $R_{\max} =$ résistance de l'âme en courant alternatif à la fin de la période de charge de secours
 $R_R =$ résistance de l'âme en courant alternatif sous le courant nominal permanent I_R , c'est-à-dire à la température maximale admissible prescrite
 $\theta_{\max} =$ échauffement maximal admissible au-dessus de la température ambiante à la fin de la période de charge de secours
 $\theta_R(t) =$ échauffement de l'âme au-dessus de la température ambiante après l'application du courant I_R , en négligeant la variation de résistance de l'âme
 Les méthodes pour calculer $\theta_R(t)$ sont données au paragraphe 4.4
 $\theta_R(\infty) =$ valeur de θ_R en régime permanent, c'est-à-dire l'échauffement maximal admissible prescrit

Le courant de secours I_R est donné par:

$$I_2 = I_R \left\{ \frac{h_1^2 R_1}{R_{\max}} + \frac{(R_R/R_{\max}) (r - h_1^2 [R_1/R_R])}{\theta_R(t)/\theta_R(\infty)} \right\}^{1/2} \quad (8-1)$$

On tiendra compte de l'échauffement dû aux pertes diélectriques, tout en négligeant toute variation de ces pertes avec la température, en calculant l'échauffement permanent de l'âme $\Delta\theta_d$ dû à ces pertes:

$$\Delta\theta_d = W_d [1/2 T_1 + n (T_2 + T_3 + T_4)] \quad (8-2)$$

(voir Publication 287 de la CEI, article 3)

et en soustrayant cette valeur de $\theta_{\max}$, $\theta_R(t)$ et $\theta_R(\infty)$. Le calcul de I_2 sera alors conduit comme ci-dessus, en utilisant les valeurs modifiées de $\theta_{\max}$, $\theta_R(t)$ et $\theta_R(\infty)$. Les valeurs de R_R , $R_{\max}$, R_1 et R_2 ne sont pas modifiées.

8.2 Groupes de circuits

Lorsque des groupes de circuits, non indépendants thermiquement, portent des charges évoluant de la même manière, on peut appliquer les méthodes décrites ici pour le calcul de leurs régimes transitoires et de leurs capacités de transport.

Lorsque les charges ne se comportent pas de la même manière, par exemple lorsque le premier circuit porte une charge croissante, tandis que le second est mis hors charge, la question doit être examinée avec soin. Dans la plupart des cas relatifs aux câbles enterrés, le retard lié à l'échauffement mutuel entre circuits est si long que toute réduction significative de température du premier circuit, due à la suppression de la charge sur le second, ne se fait sentir qu'après plusieurs heures.

La figure 10 indique le temps nécessaire pour qu'une baisse de température de 1 K ait lieu dans le premier circuit d'une installation comportant un double circuit de câbles de 400 kV, 1 935 mm², lorsque le second circuit est mis hors charge. De ce fait, tout accroissement de charge du premier

Denote:

- $r = \theta_{\max}/\theta_R(\infty)$
 $t =$ time measured from moment of application of current I_2
 $I_R =$ sustained (100% load factor) rated current for the conductor to attain, but not exceed, the standard maximum permissible temperature
 $I_1 =$ constant current applied to cable prior to emergency loading
 $I_2 =$ emergency load current which may subsequently be applied for time t so that the conductor temperature rise above ambient at the end of the period of emergency loading is $\theta_{\max}$

Note. — The method only holds for values of $I_2 \leq 2.5 I_R$.

- $h_1 = I_1/I_R$
 $R_1 =$ a.c. resistance of conductor before application of emergency current (i.e. at the conductor temperature corresponding to I_1)
 $R_{\max} =$ a.c. resistance of conductor at end of period of emergency loading
 $R_R =$ a.c. resistance of conductor with sustained application of rated current I_R , i.e. at standard maximum permissible temperature
 $\theta_{\max} =$ maximum permissible temperature rise above ambient at end of period of emergency loading
 $\theta_R(t) =$ conductor temperature rise above ambient after application of I_R , neglecting variation of conductor resistance
 $\theta_R(t)$ is calculated in Sub-clause 4.4
 $\theta_R(\infty) =$ value of θ_R in the steady-state, i.e. the standard maximum permissible temperature rise

The emergency current I_2 is given by:

$$I_2 = I_R \left\{ \frac{h_1^2 R_1}{R_{\max}} + \frac{(R_R/R_{\max}) (r - h_1^2 [R_1/R_R])}{\theta_R(t)/\theta_R(\infty)} \right\}^{1/2} \quad (8-1)$$

The effect of heating due to dielectric loss is taken into account, neglecting any change in dielectric loss with temperature, by calculating the steady-state conductor temperature rise $\Delta\theta_d$ due to the dielectric loss:

$$\Delta\theta_d = W_d [\frac{1}{2} T_1 + n (T_2 + T_3 + T_4)] \quad (8-2)$$

(See IEC Publication 287, Clause 3)

and subtracting this value from $\theta_{\max}$, $\theta_R(t)$ and $\theta_R(\infty)$. The calculation of I_2 then proceeds as above, using these modified values of $\theta_{\max}$, $\theta_R(t)$ and $\theta_R(\infty)$. The values of R_R , $R_{\max}$, R_1 and R_2 are not altered.

8.2 Groups of circuits

Where groups of circuits which are not thermally independent carry loads behaving in the same way, the methods for calculating the transients and the ratings given here can be applied.

When the loads do not behave in the same way, for example, the first circuit has an increased load while the second goes off load, the matter requires careful consideration. In most cases of buried cables the time lag associated with the mutual heating between circuits is so great that any worthwhile reduction in temperature of the first circuit due to the second going off load does not occur for many hours.

Figure 10 shows the time taken for a 1 K reduction in temperature of the first circuit of a double circuit 1 935 mm², 400 kV installation when the current in the second circuit is reduced to zero. Thus any increase in load for the first circuit during this period will depend entirely on what

circuit au cours de cette période dépendra entièrement de l'accroissement de température de l'âme que l'on peut accepter au-dessus de la valeur atteinte par le premier circuit avant la modification de charge.

9. Bibliographie

Les textes cités ci-dessous ne sont mentionnés qu'à titre indicatif; ils ne sont pas disponibles auprès du Bureau Central de la CEI.

- [1] Capacités de transport pour les régimes de charge cycliques et de secours d'urgence, Première partie: *ELECTRA* n° 24, octobre 1972, p. 63.
- [2] Méthode digitale de calcul de la réponse des câbles unipolaires à l'application d'un échelon thermique transitoire, *ELECTRA* n° 87, mars 1983, p. 41.
- [3] Capacités de transport pour les régimes de charge cycliques et de secours d'urgence, Deuxième partie: *ELECTRA* n° 44, janvier 1976, p. 3.
- [4] M. Abramowitz et I. Stegun: *Handbook of Mathematical Functions*, Dover Publications, New York.
- [5] Tables of the exponential integral for complex arguments, *National Bureau of Standards Applied Mathematics Series*, 51, 1958.

increase in conductor temperature can be permitted above the value the first circuit had attained before the change in load.

9. Bibliography

The references given below are quoted for information purposes only; they are not obtainable from the IEC Central Office.

- [1] Current ratings for cyclic and emergency loads, Part 1: *ELECTRA* No. 24, October 1972, p. 63.
 - [2] Computer method for the calculation of a single-core cable to a step function thermal transient: *ELECTRA* No. 87, March 1983, p. 41.
 - [3] Current ratings for cyclic and emergency loads, Part 2: *ELECTRA* No. 44, January 1976, p. 3.
 - [4] M. Abramowitz and I. Stegun: *Handbook of Mathematical Functions*. Dover Publications, New York.
 - [5] Tables of the exponential integral for complex arguments, *National Bureau of Standards Applied Mathematics Series*, 51, 1958.
-

ANNEXE A

RÉDUCTION D'UN CIRCUIT THERMIQUE MULTIPLE À UN CIRCUIT À DEUX CELLULES

Un circuit thermique équivalent nécessite beaucoup d'éléments pour représenter les différentes parties comprises entre l'âme et la surface extérieure de câbles de structure complexe, tels que les câbles triplomb, et la résolution des équations mathématiques qui leur correspondent demande de longs calculs. Afin de simplifier le calcul et de normaliser la procédure pour tous les types de câbles non traités dans la présente norme, la méthode suivante peut être utilisée pour combiner les différents éléments d'un tel circuit en demi-cellules.

Selon les instructions données dans l'article 4, les différents éléments d'un câble sont représentés soit par une capacité, soit par une résistance, ou par une cellule complète résistance-capacité, et ils sont associés dans un circuit série comme le montre la figure A1.

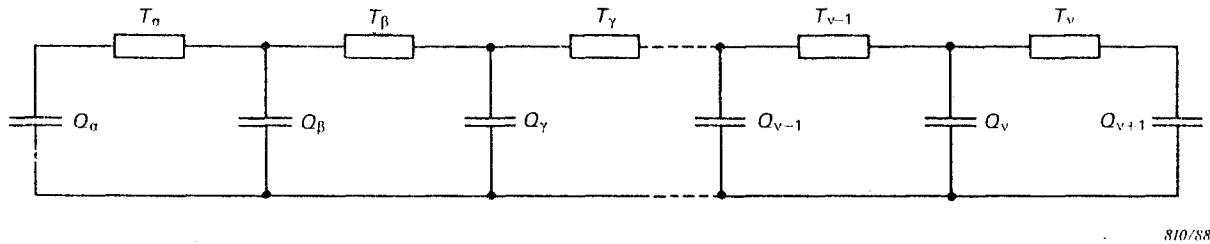


FIG. A1. — Réseau série général représentant un câble.

Il est possible de tirer du circuit précédent un circuit équivalent représentant le câble avec une précision suffisante et comportant seulement deux cellules $T_A Q_A$ et $T_B Q_B$ comme le montre la figure 2. La première cellule $T_A Q_A$ du circuit dérivé est constituée des éléments $T_A = T_\alpha = T_1$ et $Q_A = Q_\alpha = (Q_c + pQ_i)$ sans modification, afin de maintenir une réponse transitoire correcte pour des temps relativement courts.

La deuxième cellule $T_B Q_B$ du circuit dérivé est constituée à partir des cellules restantes $T_\beta Q_\beta$ à $T_v Q_v$.

Les constantes localisées du circuit dérivé peuvent alors être récapitulées de la façon suivante:

$$T_A = T_\alpha = T_1 \quad (\text{A-1})$$

$$Q_A = Q_\alpha = Q_c + pQ_i \quad (\text{A-2})$$

$$T_B = T_\beta + T_\gamma + T_\delta + \dots + T_{v-1} + T_v \quad (\text{A-3})$$

APPENDIX A

REDUCTION OF A MULTIPLE THERMAL CIRCUIT
TO ONE HAVING TWO SECTIONS

An equivalent thermal circuit requires many elements in order to represent parts between conductor and outer surface of cables of complex construction, for example SL type cables, and solution of the corresponding mathematical equations calls for lengthy calculation. In order to simplify the calculation, and to standardize the procedure for all cable types not dealt with in this standard, the following method for combining the several elements in such a circuit into two sections will be used.

Following the instructions given in Clause 4, the different elements of a cable are represented by either a capacitance or a resistance or a complete resistance-capacitance section, and are associated together in a series circuit as shown in Figure A1.

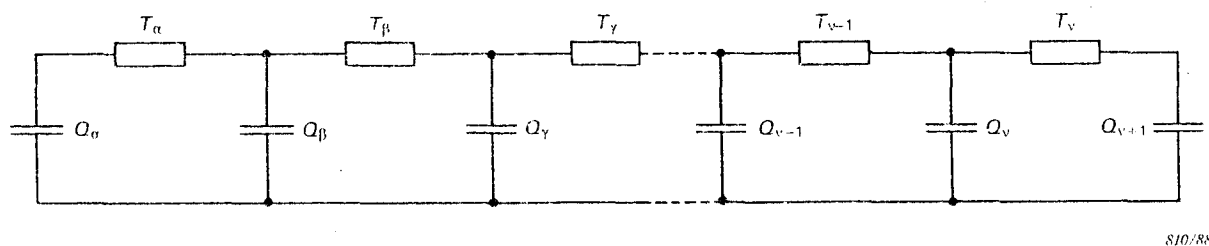


FIG. A1. — General series network representing a cable.

An equivalent circuit, which represents the cable with sufficient accuracy, can now be derived having two sections $T_A Q_A$ and $T_B Q_B$ as shown in Figure 2. The first section $T_A Q_A$ of the derived circuit is made up of $T_A = T_\alpha = T_1$ and $Q_A = Q_\alpha = (Q_c + pQ_i)$ without modification, in order to maintain the correct response for relatively short durations.

The second section $T_B Q_B$ of the derived circuit is made up from the remaining sections $T_\beta Q_\beta$ up to $T_v Q_v$.

The lumped constants for the derived circuit are summarized as follows:

$$T_A = T_\alpha = T_1 \quad (\text{A-1})$$

$$Q_A = Q_\alpha = Q_c + pQ_i \quad (\text{A-2})$$

$$T_B = T_\beta + T_\gamma + T_\delta + \dots + T_{v-1} + T_v \quad (\text{A-3})$$

$$\begin{aligned}
 Q_B = Q_\beta + \left(\frac{T_\gamma + T_\delta + \dots + T_v}{T_\beta + T_\gamma + \dots + T_v} \right)^2 Q_\gamma \\
 + \left(\frac{T_\delta + T_\epsilon + \dots + T_v}{T_\beta + T_\gamma + \dots + T_v} \right)^2 Q_\delta + \dots + \left(\frac{T_v}{T_\beta + T_\gamma + \dots + T_v} \right)^2 Q_v \quad (A-4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_B = Q_\beta + \left(\frac{T_\gamma + T_\delta + \dots + T_v}{T_\beta + T_\gamma + \dots + T_v} \right)^2 Q_\gamma \\
+ \left(\frac{T_\delta + T_\epsilon + \dots + T_v}{T_\beta + T_\gamma + \dots + T_v} \right)^2 Q_\delta + \dots + \left(\frac{T_v}{T_\beta + T_\gamma + \dots + T_v} \right)^2 Q_v \quad (A-4)
\end{aligned}$$

ANNEXE B

VARIATION DE TEMPÉRATURE TRANSITOIRE MOYENNE À TRAVERS L'ISOLANT OU À TRAVERS L'HUILE DE REMPLISSAGE DES TUYAUX

La variation transitoire de pression d'huile des câbles à huile fluide peut se calculer à partir des variations de la température moyenne de l'isolant et de la température de l'âme; des formules pour le calcul de l'échauffement moyen transitoire sont données ci-après dans l'article B1.

Pour des câbles à pression d'huile en tuyau, il est nécessaire de connaître la variation de la température moyenne de l'huile logée entre les câbles et le tuyau. La variation de température à calculer est celle qui se produit, non pas dans l'isolant, mais à l'extérieur de celui-ci. L'article B2 donne des formules pour le calcul de la température moyenne de l'huile.

Pour des régimes transitoires de très courte durée (en général inférieure ou égale à 1 h), ces méthodes ne conviennent pas.

B1. Câbles à huile fluide

- a) L'échauffement moyen spatial transitoire de l'isolant au-dessus de la température de la surface extérieure du câble, causée par les pertes dans l'âme, est:

$$\theta_d(t) = W_c [T'_a (1 - e^{-at}) + T'_b (1 - e^{-bt})] \quad (\text{B-1})$$

Cette formule est semblable à celle donnée au paragraphe 4.2.3, la seule différence résidant dans l'utilisation des résistances thermiques T'_a et T'_b au lieu de T_a et T_b . Les valeurs de T'_a et T'_b sont:

$$T'_a = \frac{1}{a - b} \left[\frac{p}{Q_A} - b (pT_A + T_B) \right] \quad (\text{B-2})$$

$$T'_b = pT_A + T_B - T'_a \quad (\text{B-3})$$

- b) L'échauffement moyen transitoire causé par les pertes diélectriques se calcule à l'aide d'une formule semblable à celle donnée au point a), mais avec:

W_c remplacé par $\frac{1}{2}W_d$ et le coefficient q_s à utiliser dans le calcul de T_B et de Q_B pris égal à 2.

Dans le cas de câbles de tensions supérieures à 275 kV, le coefficient p du paragraphe 4.2.1 doit être remplacé par le coefficient p_d du paragraphe 4.4.3.2.

B2. Câbles en tuyau à pression d'huile

- a) L'échauffement moyen transitoire de l'huile au-dessus de la température de la surface extérieure du tuyau (y compris le revêtement extérieur), causé par les pertes dans l'âme, est:

$$\theta_o(t) = W_c \frac{T_B}{a - b} \left[a (1 - e^{-bt}) - b (1 - e^{-at}) \right] \quad (\text{B-4})$$

Cette formule est fondée sur certaines hypothèses simplificatrices, y compris celles du point b) du paragraphe 4.2.2.2, et il est douteux que l'échauffement moyen ainsi déterminé puisse avec certitude se rapporter au volume d'huile global. Malheureusement, on n'est pas actuellement en mesure de proposer une formule meilleure.

APPENDIX B

TRANSIENT AVERAGE TEMPERATURE VARIATION THROUGH DIELECTRIC OR THROUGH OIL FILLING IN PIPES

The transient oil pressure variation of oil-filled cables may be calculated from a knowledge of the variation of both average dielectric temperature and conductor temperature, and formulae for calculating the transient average temperature rise are given below in Clause B1.

For oil-pressure pipe-type cables, it is necessary to know the variation of average temperature of the oil contained between cables and pipe. The temperature variation to be calculated is that which occurs not through the dielectric, but outside it. Clause B2 contains formulae for calculating the average temperature of the oil.

For very short duration transients (in general 1 h or less) these methods are not suitable.

B1. Oil-filled cables

- a) Due to the conductor loss, the transient spatial average temperature rise of the dielectric above the outer surface of the cable is:

$$\theta_d(t) = W_c [T'_a (1 - e^{-at}) + T'_b (1 - e^{-bt})] \quad (\text{B-1})$$

This formula is similar to that given in Sub-clause 4.2.3, the only difference being the use of thermal resistances T'_a and T'_b instead of T_a and T_b . The values of T'_a and T'_b are:

$$T'_a = \frac{1}{a - b} \left[\frac{p}{Q_A} - b (pT_A + T_B) \right] \quad (\text{B-2})$$

$$T'_b = pT_A + T_B - T'_a \quad (\text{B-3})$$

- b) Due to dielectric loss, the transient average temperature rise is calculated by means of a formula similar to that in Item a), but with:

W_c replaced by $\frac{1}{2} W_d$, and the coefficient q_s to be used in calculating T_B and Q_B equal to 2.

In the case of cables at voltages higher than 275 kV, the coefficient p of Sub-clause 4.2.1 shall be replaced by the coefficient p_d of Sub-clause 4.4.3.2.

B2. Oil-pressure pipe-type cables

- a) Due to conductor loss, the transient average temperature rise of the oil above the outer surface of the pipe (including its outer covering) is:

$$\theta_o(t) = W_c \frac{T_B}{a - b} \left[a (1 - e^{-bt}) - b (1 - e^{-at}) \right] \quad (\text{B-4})$$

This formula is based on some simplifying assumptions, including those of Item b) of Sub-clause 4.2.2.2, and it is doubtful whether the average temperature rise worked out in this way can be related with certainty to the whole volume of oil. Unfortunately no better formula can be suggested at present.

- b) L'échauffement moyen transitoire causé par les pertes diélectriques se calcule à l'aide d'une formule semblable à celle du point a) de l'article B1, mais avec:

W_c remplacé par $\frac{1}{2}W_d$ et les coefficients q_s et q_e utilisés dans le calcul de T_A , T_B et Q_B , pris tous deux égaux à 2.

- b) Due to dielectric loss, the transient average temperature rise is calculated by means of a formula similar to that in Item a) of Clause B1 but with:

W_c replaced by $\frac{1}{2}W_d$, and the coefficients q_s and q_e used in calculating T_A , T_B and Q_B , both equal to 2.

ANNEXE C

MÉTHODE APPLICABLE À DIFFÉRENTES VALEURS DE RÉSISTIVITÉ DU SOL, DIFFUSIVITÉ THERMIQUE DU SOL ET PROFONDEUR DE POSE

Le facteur $[1-\beta(6)]$ dépend des propriétés du sol et de la profondeur de pose, ainsi que du diamètre du câble ou du fourreau. Les valeurs données au tableau I sont relatives à une profondeur de pose de 1 m et une diffusivité thermique de $0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Ces valeurs peuvent être utilisées pour des profondeurs de câble ou de fourreau dans la gamme de 0,75 m à 1,5 m. Pour toute autre profondeur de pose ou valeur de diffusivité thermique du sol, la valeur numérique peut être obtenue à partir de:

$$[1 - \beta(6)] = 1 - \left[\frac{-Ei \left(-\frac{D_e^2}{16 t \delta} \right)}{2 \ln (4L/D_e)} \right] \quad (\text{C-1})$$

où:

$$t = 6 \times 3600 \text{ s}$$

Les facteurs k et k_1 (voir équations (7-3), (7-10) et (7-12)) dépendent de la profondeur de pose et de la résistivité du sol. Si les conditions de pose «a», pour lesquelles une valeur de k est connue, se modifient en conditions «b», la nouvelle valeur de k est donnée par:

$$k(b) = \frac{1}{1 + \frac{T_4}{T'_4} \left(\frac{1 - k(a)}{k(a)} \right)} \quad (\text{C-2})$$

où T_4 et T'_4 sont respectivement les résistances thermiques extérieures pour les conditions «a» et «b». Si la profondeur n'est pas modifiée, alors $T_4/T'_4 = \rho(a)/\rho(b)$.

Une nouvelle valeur de k_1 s'obtient de la même façon.

APPENDIX C

METHOD FOR DEALING WITH DIFFERENT SOIL RESISTIVITIES,
THERMAL DIFFUSIVITIES AND DEPTHS OF LAYING

The factor $[1 - \beta(6)]$ is dependent on soil properties and depth of laying as well as the cable or duct diameter. The values quoted in Table I are for a depth of burial of 1 m and a soil thermal diffusivity of $0.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. These values may be used for cable or duct depths within the range 0.75 to 1.5 m. For any other depth of burial or value of soil thermal diffusivity the numerical value may be obtained from:

$$[1 - \beta(6)] = 1 - \left[\frac{-Ei \left(-\frac{D_c^2}{16 t \delta} \right)}{2 \ln (4L/D_c)} \right] \quad (\text{C-1})$$

where:

$$t = 6 \times 3600 \text{ s}$$

The factors k and k_1 (see equations (7-3), (7-10) and (7-12)) are dependent on depth of laying and soil resistivity. If the laying conditions “a”, for which a value of k is known, change to conditions “b” then the new value of k is given by:

$$k(b) = \frac{1}{1 + \frac{T_4}{T'_4} \left(\frac{1 - k(a)}{k(a)} \right)} \quad (\text{C-2})$$

where T_4 and T'_4 are the external thermal resistances for conditions “a” and “b” respectively. If the depth is not changed then $T_4/T'_4 = \rho(a)/\rho(b)$.

A new value of k_1 is obtained in the same way.

ANNEXE D

DIFFUSIVITÉ DU SOL

Dans le calcul des facteurs de charge cyclique, il n'est pas nécessaire de connaître avec précision la valeur de la diffusivité, et il est en général satisfaisant d'utiliser les fonctions données dans la présente norme sous forme de tableau et calculées pour une valeur de diffusivité de $0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Cette valeur correspond en gros à un sol ayant une résistivité thermique de 1 K.m/W , ainsi qu'une teneur en humidité d'environ 7% de la masse sèche. Dans des cas exceptionnels et lorsque la teneur en humidité a une probabilité d'être plus faible, il est recommandé d'utiliser les méthodes données ci-dessous pour calculer d'autres valeurs de diffusivité.

- a) La diffusivité δ peut être estimée si l'on a pu mesurer les grandeurs suivantes: masse volumique, teneur massique en eau et résistivité thermique.

$$\delta = \frac{10^{-3}}{\rho_T d (0,82 + 0,042 \eta)} \text{ m}^2/\text{s} \quad (\text{D-1})$$

où:

- ρ_T = résistivité thermique, K.m/W
 d = masse volumique à sec, kg/m³
 η = teneur en humidité, % de la masse sèche

Il existe en variante des méthodes de laboratoire bien connues pour mesurer la diffusivité.

- b) Si l'on ne connaît que la résistivité thermique, la diffusivité peut être obtenue à partir du tableau suivant:

TABLEAU D1
Valeurs de la diffusivité du sol

Résistivité thermique (K.m/W)	Diffusivité (m ² /s)
0,5	$0,8 \times 10^{-6}$
0,6	$0,7 \times 10^{-6}$
0,7	$0,6 \times 10^{-6}$
0,8	$0,6 \times 10^{-6}$
0,9	$0,5 \times 10^{-6}$
1,0	$0,5 \times 10^{-6}$
1,2	$0,4 \times 10^{-6}$
1,5	$0,4 \times 10^{-6}$
2,0	$0,3 \times 10^{-6}$
2,5	$0,2 \times 10^{-6}$
3,0	$0,2 \times 10^{-6}$

Note. — Ces valeurs ont été obtenues à partir d'une relation empirique pour des sols homogènes et humides.

- c) Si l'on ne dispose d'aucune donnée sur le sol, prendre une valeur de diffusivité de $0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

APPENDIX D

DIFFUSIVITY OF SOIL

For calculation of cyclic rating factors it is not necessary to know accurately the value of diffusivity and it is generally satisfactory to use the tabulated functions given in this standard which are based on the value of $0.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, and correspond roughly to a soil having a thermal resistivity of 1 K.m/W, and a moisture content of around 7% of dry weight. For exceptional cases and where moisture content is likely to be lower, it is advisable to use the methods given below to calculate alternative values.

- a) The diffusivity δ can be estimated if the following quantities have been measured: density, moisture content by weight and thermal resistivity.

$$\delta = \frac{10^{-3}}{\rho_T d (0.82 + 0.042 \eta)} \text{ m}^2/\text{s} \quad (\text{D-1})$$

where:

ρ_T = thermal resistivity, K.m/W

d = dry density, kg/m³

η = moisture content, % of dry weight

Alternatively, there are well-known laboratory measures for measuring diffusivity.

- b) If only the thermal resistivity is known, then the diffusivity can be obtained from the following table:

TABLE D1
Values of diffusivity for soil

Thermal resistivity (K.m/W)	Diffusivity (m ² /s)
0.5	0.8×10^{-6}
0.6	0.7×10^{-6}
0.7	0.6×10^{-6}
0.8	0.6×10^{-6}
0.9	0.5×10^{-6}
1.0	0.5×10^{-6}
1.2	0.4×10^{-6}
1.5	0.4×10^{-6}
2.0	0.3×10^{-6}
2.5	0.2×10^{-6}
3.0	0.2×10^{-6}

Note. — These values were obtained from an empirical relationship for homogeneous and moist soils.

- c) If no data are available on the soil, use a value of diffusivity of $0.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

ANNEXE E

CONSTANTES PHYSIQUES DES MATÉRIAUX

TABLEAU E1

Propriétés thermiques de matériaux isolants

Matériau	Résistivité thermique (K.m/W)	Capacité thermique volumique*** (J/m³.K)
<i>Matériaux d'isolation*:</i>		
Papier dans les câbles à matière visqueuse	6,0	$2,0 \times 10^6$
Papier dans les câbles à huile fluide	5,0	$2,0 \times 10^6$
Papier dans les câbles à pression externe de gaz	5,5	$2,0 \times 10^6$
Papier dans les câbles à pression interne de gaz:		
a) préimprégné	5,5	$2,0 \times 10^6$
b) imprégné à masse	6,0	$2,0 \times 10^6$
Huile	7,0**	$1,7 \times 10^6$
Azote à 15 atmosphères	**	$0,017 \times 10^6$
PE	3,5	$2,4 \times 10^6$
PR	3,5	$2,4 \times 10^6$
Polychlorure de vinyle:		
câbles jusqu'à 3 kV inclus	5,0	$1,7 \times 10^6$
câbles de plus de 3 kV	6,0	$1,7 \times 10^6$
EPR:		
câbles jusqu'à 3 kV inclus	3,5	$2,0 \times 10^6$
câbles de plus de 3 kV	5,0	$2,0 \times 10^6$
Caoutchouc butyle	5,0	$2,0 \times 10^6$
Caoutchouc	5,0	$2,0 \times 10^6$
<i>Matériaux de revêtement:</i>		
Jute composé et matériaux fibreux	6,0	$2,0 \times 10^6$
Protection «rubber-sandwich»	6,0	$2,0 \times 10^6$
Polychloroprène	5,5	$2,0 \times 10^6$
PVC:		
câbles jusqu'à 35 kV inclus	5,0	$1,7 \times 10^6$
câbles de plus de 35 kV	6,0	$1,7 \times 10^6$
PVC/bitume sur gaines d'aluminium ondulées	6,0	$1,7 \times 10^6$
PE	3,5	$2,4 \times 10^6$
<i>Matériaux pour installation en fourreaux:</i>		
Béton	1,0	$1,9 \times 10^6$
Fibre	4,8	$2,0 \times 10^6$
Amiante	2,0	$2,0 \times 10^6$
Argile cuite	1,2	$1,7 \times 10^6$
PVC	6,0	$1,7 \times 10^6$
PE	3,5	$2,4 \times 10^6$

* Pour les calculs des intensités admissibles, on estime que les écrans semiconducteurs ont les mêmes propriétés thermiques que les matériaux isolants sur lesquels ils sont appliqués. Lorsque des matériaux plastiques ou élastomères sont utilisés comme revêtements de protection, les résistivités thermiques sont les mêmes que celles indiquées dans le tableau pour la catégorie «matériaux d'isolation».

** La résistance thermique de l'huile ou du gaz remplissant les câbles en tuyau est calculée par la méthode donnée au paragraphe 9.7.1 de la Publication 287 de la CEI.

*** Certains composés ont des valeurs différentes, mais il convient d'utiliser les valeurs indiquées par prudence.

APPENDIX E

PHYSICAL CONSTANTS OF MATERIALS

TABLE E1

Thermal properties of insulating materials

Material	Thermal resistivity (K.m/W)	Volumetric*** specific heat (J/m ³ .K)
<i>Insulating materials*:</i>		
Paper insulation in solid type cables	6.0	2.0×10^6
Paper insulation in oil-filled cables	5.0	2.0×10^6
Paper insulation in cables with external gas pressure	5.5	2.0×10^6
Paper insulation in cables with internal gas pressure:		
a) pre-impregnated	5.5	2.0×10^6
b) mass-impregnated	6.0	2.0×10^6
Oil	7.0**	1.7×10^6
Nitrogen at 15 atmospheres	**	0.017×10^6
PE	3.5	2.4×10^6
XLPE	3.5	2.4×10^6
Polyvinyl chloride:		
up to and including 3 kV cables	5.0	1.7×10^6
greater than 3 kV cables	6.0	1.7×10^6
EPR:		
up to and including 3 kV cables	3.5	2.0×10^6
greater than 3 kV cables	5.0	2.0×10^6
Butyl rubber	5.0	2.0×10^6
Rubber	5.0	2.0×10^6
<i>Protective coverings:</i>		
Compounded jute and fibrous materials	6.0	2.0×10^6
Rubber sandwich protection	6.0	2.0×10^6
Polychloroprene	5.5	2.0×10^6
PVC:		
up to and including 35 kV cables	5.0	1.7×10^6
greater than 35 kV cables	6.0	1.7×10^6
PVC/bitumen on corrugated aluminium sheaths	6.0	1.7×10^6
PE	3.5	2.4×10^6
<i>Materials for duct installations:</i>		
Concrete	1.0	1.9×10^6
Fibre	4.8	2.0×10^6
Asbestos	2.0	2.0×10^6
Earthenware	1.2	1.7×10^6
PVC	6.0	1.7×10^6
PE	3.5	2.4×10^6

* For the purposes of current rating calculations, the semi-conducting screening materials are assumed to have the same thermal properties as the adjacent dielectric materials. Where plastics or elastomeric materials are used for protective coverings, the thermal resistivities shall be taken to be the same as those for the insulating grades of the materials given in this table.

** The thermal resistance of oil or gas filling for pipe-type cables is calculated by the method given in Sub-clause 9.7.1 of IEC Publication 287.

*** Different compounds have different values, but the values quoted should be used for safety.

TABLEAU E2
Propriétés de matériaux conducteurs

Matériau	Inverse du coefficient de température de la résistivité à 0 °C (K)	Capacité thermique volumique (J/m ³ .K)	Résistivité à 20 °C (Ω.m)
<i>a) Ames</i>			
Cuivre	234,5	$3,45 \times 10^6$	$1,7241 \times 10^{-8}$
Aluminium	228	$2,5 \times 10^6$	$2,8264 \times 10^{-8}$
<i>b) Gaines, écrans et armure</i>			
Plomb ou alliage de plomb	230	$1,45 \times 10^6$	$21,4 \times 10^{-8}$
Acier	202	$3,8 \times 10^6$	$13,8 \times 10^{-8}$
Bronze	313	$3,4 \times 10^6$	$3,5 \times 10^{-8}$
Acier inoxydable	*	$3,8 \times 10^6$	70×10^{-8}
Aluminium	228	$2,5 \times 10^6$	$2,84 \times 10^{-8}$

* Le coefficient de température de la résistivité est négligeable, de sorte qu'il n'est pas nécessaire d'introduire de correction au paragraphe 4.4.2.

TABLE E2
Properties of conducting materials

Material	Reciprocal of temperature coefficient of resistance at 0 °C (K)	Volumetric specific heat (J/m ³ .K)	Resistivity at 20 °C (Ω.m)
<i>a) Conductors</i>			
Copper	234.5	3.45×10^6	1.7241×10^{-8}
Aluminium	228	2.5×10^6	2.8264×10^{-8}
<i>b) Sheaths, screens and armour</i>			
Lead or lead alloy	230	1.45×10^6	21.4×10^{-8}
Steel	202	3.8×10^6	13.8×10^{-8}
Bronze	313	3.4×10^6	3.5×10^{-8}
Stainless steel	*	3.8×10^6	70×10^{-8}
Aluminium	228	2.5×10^6	2.84×10^{-8}

* Temperature coefficient of resistance is negligible; thus, no correction is necessary in Sub-clause 4.4.2.

ANNEXE F

EXEMPLES

F1. Généralités

Les exemples de calcul sont donnés pour une liaison par câbles à un seul circuit constituée de trois câbles posés en nappe, non jointifs, et pour les cas suivants:

- la réponse transitoire en température du câble central pendant les premières 24 h après l'application d'un échelon du courant nominal; les câbles sont considérés avoir été mis sous tension pendant une durée suffisante pour que l'échauffement dû aux pertes diélectriques atteigne un état stationnaire;
- le courant en régime cyclique, lorsque le cycle de charge journalier de la figure 8 est appliqué sur une base quotidienne régulière;
- le courant en régime de secours pendant une période arbitrairement choisie de 6 h après que les câbles partiellement chargés ont atteint un état stable, la température limite étant la température normale de fonctionnement.

Ces hypothèses permettent d'utiliser la méthode la plus simple, appropriée à des temps supérieurs à 1 h, mais on peut considérer que les calculs présentés sont suffisamment complets et détaillés pour qu'ils puissent servir de guide dans n'importe quelles conditions.

F2. Détails concernant le câble et l'installation

Les exemples sont fondés sur le cas d'un seul circuit de 400 kV, comprenant un ensemble de trois câbles à huile fluide sous gaines métalliques, à âme en cuivre de 2 000 mm² de section, enterrés directement dans le sol à une profondeur de 1 000 mm et avec une distance de 300 mm entre les axes des câbles, les écrans étant connectés et permutés. Le courant nominal en régime permanent (facteur de charge 100%) est de 1 580 A, le fonctionnement étant caractérisé par une température de l'âme de 85 °C, dans un sol à une température ambiante de 10 °C.

Le circuit a été mis sous tension, mais non chargé, pendant une durée suffisante pour que l'échauffement de l'âme, dû aux pertes diélectriques, devienne stable à 19,3 K.

TABLEAU F1
Détails concernant le câble

Élément	Diamètre extérieur (mm)	Résistance thermique (K.m/W)	Capacité thermique (J/K.m)	Pertes (W/m)
<i>Âme:</i>				
cuivre	57,5	—	7 038	30,3
huile		—	946	
Ecran sur âme	59,0	0,021	275	
Isolant (papier/huile)	105,0	0,459	11 850	13,35
Ecran sur isolant	106	0,008	331	
Gaine (plomb)	114,0	—	2 004	2,1
Matelas extérieur (PE)	122,0	0,038	3 559	
Σ		0,526	26 003	45,75

APPENDIX F

EXAMPLES

F1. General

Example calculations are given for a single circuit cable system of three cables in flat formation, not touching, for the following cases:

- a) the transient temperature response of the centre cable for the first 24 h after the application of a step function of rated current, the cables being assumed to have been energized for a sufficient time for the temperature rise due to the dielectric losses to have reached a steady state;
- b) the cyclic rating when the daily load cycle of Figure 8 is applied on a regular daily basis;
- c) the emergency current rating for an arbitrary 6 h period after partly loaded cables have attained a steady state, the limiting temperature being the normal operating temperature.

These have been based on the simplest method appropriate for times greater than 1 h, but are considered comprehensive enough to provide guidance for the undertaking of calculations under any conditions.

F2. Cable and installation details

The examples are based on a single circuit 400 kV self-contained oil-filled cable system with a 2 000 mm² copper conductor, directly buried at a depth of 1 000 mm with a spacing of 300 mm between cable centres, crossbonded. The continuous rated current (100% load factor) is 1 580 A, operating at a conductor temperature of 85 °C, in a ground ambient temperature of 10 °C.

The circuit has been energized, but unloaded, for sufficient time for the conductor temperature rise due to dielectric losses to have become stable at 19.3 K.

TABLE F1

Cable details

Item	Outside diameter (mm)	Thermal resistance (K.m/W)	Thermal capacitance (J/K.m)	Losses (W/m)
<i>Conductor:</i>				
copper	57.5	—	7 038	30.3
oil		—	946	
Conductor screen	59.0	0.021	275	
Dielectric (paper/oil)	105.0	0.459	11 850	13.35
Core screen	106	0.008	331	
Sheath (lead)	114.0	—	2 004	2.1
Serving (PE)	122.0	0.038	3 559	
Σ		0.526	26 003	45.75

$$\text{Constante de temps} = T.Q = 0,526 \times 26\,003 = 13\,677 \text{ s} = 3,80 \text{ h}$$

Propriétés du sol

$$\text{Résistivité thermique} = 1,0 \text{ K.m/W}$$

$$\text{Diffusivité thermique} = 0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Température} = 10 \text{ °C}$$

Propriété des matériaux

$$\text{Résistivité thermique du matelas extérieur} = 3,5 \text{ K.m/W}$$

$$\text{Résistivité thermique de l'huile/papier} = 5,0 \text{ K.m/W}$$

Propriété de l'âme

$$\text{Résistance en courant alternatif à } 85 \text{ °C} = 12,612 \mu\Omega\text{m}$$

F3. Détermination du circuit thermique du câble

Les valeurs permettant de représenter l'isolant (voir fig. 1), à partir du tableau F1, sont obtenues de la façon suivante (voir paragraphe 4.2.1.1):

$$Q_c = 7\,038 + 946 = 7\,984 \text{ J/K.m}$$

$$Q_i = 275 + 11\,850 + 331 = 12\,456 \text{ J/K.m}$$

$$T_i = 0,021 + 0,459 + 0,008 = 0,488 \text{ K.m/W}$$

$$\rho = \frac{1}{2 \ln \left(\frac{106}{57,5} \right)} - \frac{1}{\left(\frac{106}{57,5} \right)^2 - 1} = 0,4 \quad (\text{en utilisant l'équation (4-1)})$$

Les valeurs permettant de représenter le câble (voir Fig. 2) sont déterminées à partir des équations du paragraphe 4.2.2.2, comme suit:

$$T_A = T_i = 0,488 \text{ K.m/W} \quad (\text{en utilisant l'équation (4-3)})$$

$$q_s = \frac{30,3 + 2,1}{30,3} = 1,069$$

$$T_B = 1,069 \frac{3,5}{2\pi} \ln \frac{122}{114} = 0,04 \text{ K.m/W} \quad (\text{en utilisant l'équation (4-4)})$$

$$Q_A = 7\,984 + (0,4 \times 12\,456) = 12\,966 \text{ J/K.m} \quad (\text{en utilisant l'équation (4-5)})$$

$$\rho' = \frac{1}{2 \ln \left(\frac{122}{114} \right)} - \frac{1}{\left(\frac{122}{114} \right)^2 - 1} = 0,489 \quad (\text{en utilisant l'équation (4-6)})$$

$$Q_B = (1 - 0,4) 12\,456 + \left[\frac{2\,004 + (0,489 \times 3\,559)}{1,069} \right] = 10\,976 \text{ J/K.m} \quad (\text{en utilisant l'équation (4-7)})$$

F4. Exemple de calcul de la réponse transitoire

Cet exemple donne la réponse transitoire de la liaison par câbles, conforme à l'article F2, pendant les premières 24 h après l'application d'un échelon de courant égal au courant nominal de pleine charge. On suppose, au préalable, que les câbles ont été mis sous tension, mais non chargés, pendant une durée suffisante pour que l'échauffement dû aux pertes diélectriques soit stabilisé.

$$\text{Time constant} = T.Q = 0.526 \times 26\,003 = 13\,677 \text{ s} = 3.80 \text{ h}$$

Soil properties

$$\text{Thermal resistivity} = 1.0 \text{ K.m/W}$$

$$\text{Thermal diffusivity} = 0.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Temperature} = 10^\circ\text{C}$$

Material properties

$$\text{Thermal resistivity of serving} = 3.5 \text{ K.m/W}$$

$$\text{Thermal resistivity of oil/paper} = 5.0 \text{ K.m/W}$$

Conductor properties

$$\text{A.C. resistance at } 85^\circ\text{C} = 12.612 \mu\Omega/\text{m}$$

F3. Derivation of thermal circuit of the cable

From Table F1 the values for representing the dielectric (see Figure 1) are obtained as follows (see Sub-clause 4.2.1.1):

$$Q_c = 7\,038 + 946 = 7\,984 \text{ J/K.m}$$

$$Q_i = 275 + 11\,850 + 331 = 12\,456 \text{ J/K.m}$$

$$T_i = 0.021 + 0.459 + 0.008 = 0.488 \text{ K.m/W}$$

$$\rho = \frac{1}{2 \ln \left(\frac{106}{57.5} \right)} - \frac{1}{\left(\frac{106}{57.5} \right)^2 - 1} = 0.4 \quad (\text{from equation (4-1)})$$

The values for representing the cable (see Figure 2) are determined using the equations in Sub-clause 4.2.2.2, as follows:

$$T_A = T_i = 0.488 \text{ K.m/W} \quad (\text{from equation (4-3)})$$

$$q_s = \frac{30.3 + 2.1}{30.3} = 1.069$$

$$T_B = 1.069 \frac{3.5}{2\pi} \ln \frac{122}{114} = 0.04 \text{ K.m/W} \quad (\text{from equation (4-4)})$$

$$Q_A = 7\,984 + (0.4 \times 12\,456) = 12\,966 \text{ J/K.m} \quad (\text{from equation (4-5)})$$

$$\rho' = \frac{1}{2 \ln \left(\frac{122}{114} \right)} - \frac{1}{\left(\frac{122}{114} \right)^2 - 1} = 0.489 \quad (\text{from equation (4-6)})$$

$$Q_B = (1 - 0.4) 12\,456 + \left[\frac{2\,004 + (0.489 \times 3\,559)}{1.069} \right] = 10\,976 \text{ J/K.m} \quad (\text{from equation (4-7)})$$

F4. Example of the calculation of the transient response

The example gives the transient response of the cable system in Clause F2 during the first 24 h after the application of a step function of current equal to the rated full load current. It has been assumed that the cables were energized, but unloaded, for sufficient time for the temperature rise due to the dielectric losses to have stabilized.

F4.1 Calcul de la réponse du circuit des câbles

La réponse du circuit des câbles est calculée avec les formules données au paragraphe 4.2.3; tenant compte des valeurs du circuit thermique obtenues dans l'article F3, il résulte:

$$M_o = \frac{1}{2} \left[12\,966 (0,488 + 0,04) + (10\,976 \times 0,04) \right] = 3\,643 \text{ s} \quad (\text{en utilisant l'équation (4-28)})$$

$$N_o = 12\,966 \times 0,488 \times 10\,976 \times 0,04 = 2\,778 \times 10^6 \text{ s}^2 \quad (\text{en utilisant l'équation (4-29)})$$

$$a = \frac{3\,643 + \sqrt{(3\,643)^2 - 2\,778 \times 10^6}}{2\,778 \times 10^6} = 2,48 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{s}} \quad (\text{en utilisant l'équation (4-30)})$$

$$b = \frac{3\,643 - \sqrt{(3\,643)^2 - 2\,778 \times 10^6}}{2\,778 \times 10^6} = 1,45 \times 10^{-4} \frac{1}{\text{s}} \quad (\text{en utilisant l'équation (4-31)})$$

$$T_a = \frac{1}{(2,48 \times 10^{-3} - 1,45 \times 10^{-4})} \left[\frac{1}{12\,966} - 1,45 \times 10^{-4} (0,488 \times 0,04) \right]$$

$$= 2,42 \times 10^{-4} \text{ K.m/W} \quad (\text{en utilisant l'équation (4-32)})$$

$$T_b = 0,488 + 0,04 - 2,42 \times 10^{-4} = 0,528 \text{ K.m/W} \quad (\text{en utilisant l'équation (4-33)})$$

L'échauffement transitoire pour chaque intervalle de temps est déterminée à partir de l'équation (4-34); un exemple pour 1 h (3 600 s) est donné ci-dessous, les valeurs pour cette durée et pour les autres durées étant données dans le tableau F3.

$$\theta_c(1) = 30,3 \left[2,42 \times 10^{-4} (1 - e^{-2,48 \times 10^{-3} \times 3\,600}) + 0,528 (1 - e^{-1,45 \times 10^{-4} \times 3\,600}) \right]$$

$$= 6,5 \text{ K}$$

Le facteur d'approche relatif à l'échauffement de l'âme par rapport à la surface de câble est déterminé pour chaque échelon de temps à partir de l'équation (4-35); un exemple pour 1 h (3 600 s) est donné ci-dessous, les valeurs pour cette durée et pour les autres durées étant données dans le tableau F3.

$$a(1) = \frac{6,5}{30,3 (0,488 + 0,04)} = 0,407$$

F4.2 Calcul de la réponse de l'environnement du câble

La réponse de l'environnement du câble est donnée par l'équation (4-36). Un exemple de calcul est donné pour la durée la plus longue (24 h) et, dans le tableau F2, on trouve les valeurs des termes $-Ei(-x)$ pour cette valeur et toutes les autres valeurs du temps.

La réponse de l'environnement du câble est résumée dans la colonne 4 du tableau F3.

$$D_e = 0,122 \text{ m}$$

$$L = 1,0 \text{ m}$$

$$d_{pk} = 0,3 \text{ m}$$

$$d'_{pk} = \sqrt{(0,3)^2 + (2,0)^2} = 2,022 \text{ m (voir figure 9)}$$

$$\rho_T = 1,0 \text{ K.m/W}$$

$$W_l = 30,3 + 2,1 = 32,4 \text{ W/m (les pertes diélectriques sont négligées)}$$

$$\delta = 0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$N = 3$$

F4.1 *Calculation of the response of the cable circuit*

The response of the cable circuit is calculated using the formulae in Sub-clause 4.2.3, based on the thermal circuit values in Clause F3, as follows:

$$M_o = \frac{1}{2} \left[12\,966 (0.488 + 0.04) + (10\,976 \times 0.04) \right] = 3\,643 \text{ s} \quad (\text{from equation (4-28)})$$

$$N_o = 12\,966 \times 0.488 \times 10\,976 \times 0.04 = 2\,778 \times 10^6 \text{ s}^2 \quad (\text{from equation (4-29)})$$

$$a = \frac{3\,643 + \sqrt{(3\,643)^2 - 2\,778 \times 10^6}}{2\,778 \times 10^6} = 2.48 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{s}} \quad (\text{from equation (4-30)})$$

$$b = \frac{3\,643 - \sqrt{(3\,643)^2 - 2\,778 \times 10^6}}{2\,778 \times 10^6} = 1.45 \times 10^{-4} \frac{1}{\text{s}} \quad (\text{from equation (4-31)})$$

$$T_a = \frac{1}{(2.48 \times 10^{-3} - 1.45 \times 10^{-4})} \left[\frac{1}{12\,966} - 1.45 \times 10^{-4} (0.488 \times 0.04) \right]$$

$$= 2.42 \times 10^{-4} \text{ K.m/W} \quad (\text{from equation (4-32)})$$

$$T_b = 0.488 + 0.04 - 2.42 \times 10^{-4} = 0.528 \text{ K.m/W} \quad (\text{from equation (4-33)})$$

The transient temperature rise for each time step is determined from equation (4-34); the example for 1 h (3 600 s) is given below, the values for this time and for the other times being set out in Table F3.

$$\theta_c(1) = 30.3 \left[2.42 \times 10^{-4} (1 - e^{-2.48 \times 10^{-3} \times 3\,600}) + 0.528 (1 - e^{-1.45 \times 10^{-4} \times 3\,600}) \right]$$

$$= 6.5 \text{ K}$$

The conductor to cable surface attainment factor is determined for each time step from equation (4-35); the example for 1 h (3 600 s) is given below, the value for this time and for the other times being set out in Table F3.

$$a(1) = \frac{6.5}{30.3 (0.488 + 0.04)} = 0.407$$

F4.2 *Calculation of the response of the cable environment*

The response of the cable environment is given by equation (4-36). An example calculation is given for the longest time period (24 h) and values of the $-Ei(-x)$ terms for this time and for all the other times are given in Table F2.

The response for the cable environment is summarized in column 4 of Table F3.

$$D_c = 0.122 \text{ m}$$

$$L = 1.0 \text{ m}$$

$$d_{pk} = 0.3 \text{ m}$$

$$d'_{pk} = \sqrt{(0.3)^2 + (2.0)^2} = 2.022 \text{ m (see Figure 9)}$$

$$\rho_T = 1.0 \text{ K.m/W}$$

$$W_1 = 30.3 + 2.1 = 32.4 \text{ W/m (dielectric loss is neglected)}$$

$$\delta = 0.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$N = 3$$

Le calcul est effectué terme par terme pour 24 h (86 400 s)

$$a) x = \frac{D_e^2}{16t\delta} = \frac{(0,122)^2}{16 \times 86\,400 \times 0,5 \times 10^{-6}} = 0,0215, - Ei(-x) = 3,28$$

$$b) x = \frac{L^2}{t\delta} = \frac{(1,0)^2}{86\,400 \times 0,5 \times 10^{-6}} = 23,2, - Ei(-x) = 0$$

$$c) x = \frac{(d_{pk})^2}{4t\delta} = \frac{(0,3)^2}{4 \times 86\,400 \times 0,5 \times 10^{-6}} = 0,521, - Ei(-x) = 0,535$$

$$d) x = \frac{(d'_{pk})^2}{4t\delta} = \frac{(2,022)^2}{4 \times 86\,400 \times 0,5 \times 10^{-6}} = 23,7, - Ei(-x) = 0$$

$$\theta_e(24) = \frac{1,0 \times 32,4}{4\pi} \left[(3,28 - 0) + 2(0,535 - 0) \right] = 11,22 \text{ K}$$

(en utilisant l'équation (4-36))

Les second et quatrième termes de l'équation (4-36) (points *b*) et *d*) ci-dessus) représentent l'effet des sources images et sont généralement négligeables pour des profondeurs normales de pose et des durées inférieures à 24 h.

TABLEAU F 2

Composants pour le régime transitoire partiel de l'environnement du câble

«x»	Temps (h)	1	2	3	4	5	6	12	24
	Fonction								
a) $\frac{D_e^2}{16t\delta}$	x	0,517	0,258	0,172	0,129	0,103	0,086	0,043	0,0215
	$-Ei(-x)$	0,54	1,02	1,35	1,59	1,79	1,96	2,61	3,28
c) $\frac{(d_{pk})^2}{4t\delta}$	x	12,5	6,25	4,167	3,125	2,5	2,083	1,042	0,521
	$-Ei(-x)$	0	0	0,003	0,011	0,025	0,044	0,205	0,535

F4.3 Calcul du régime transitoire de température complet

Le régime transitoire complet est calculé au paragraphe 4.4. Un exemple de calcul est donné ci-dessous pour une durée de 1 h, les valeurs pour cette durée et pour les autres durées faisant l'objet d'un résumé dans la colonne 5 du Tableau F3.

$$\theta(1) = 6,5 + 0,407 \times 1,4 = 7,1 \text{ K}$$

(en utilisant l'équation 4-71)

On a term-by-term basis for 24 h (86 400 s)

$$a) \ x = \frac{D_e^2}{16t\delta} = \frac{(0.122)^2}{16 \times 86\,400 \times 0.5 \times 10^{-6}} = 0.0215, \quad -Ei(-x) = 3.28$$

$$b) \ x = \frac{L^2}{t\delta} = \frac{(1.0)^2}{86\,400 \times 0.5 \times 10^{-6}} = 23.2, \quad -Ei(-x) = 0$$

$$c) \ x = \frac{(d_{pk})^2}{4t\delta} = \frac{(0.3)^2}{4 \times 86\,400 \times 0.5 \times 10^{-6}} = 0.521, \quad -Ei(-x) = 0.535$$

$$d) \ x = \frac{(d'_{pk})^2}{4t\delta} = \frac{(2.022)^2}{4 \times 86\,400 \times 0.5 \times 10^{-6}} = 23.7, \quad -Ei(-x) = 0$$

$$\theta_e(24) = \frac{1.0 \times 32.4}{4\pi} \left[(3.28 - 0) + 2(0.535 - 0) \right] = 11.22 \text{ K}$$

(from equation (4-36))

The second and fourth terms of equation (4-36) (items *b*) and *d*) above) represent the effect of the image sources and are usually negligible at normal depths of laying and duration of less than 24 h.

TABLE F 2

Components for cable environmental partial transient

Time (h)	Item	1	2	3	4	5	6	12	24
a) $\frac{D_e^2}{16t\delta}$	x	0.517	0.258	0.172	0.129	0.103	0.086	0.043	0.0215
	$-Ei(-x)$	0.54	1.02	1.35	1.59	1.79	1.96	2.61	3.28
c) $\frac{(d_{pk})^2}{4t\delta}$	x	12.5	6.25	4.167	3.125	2.5	2.083	1.042	0.521
	$-Ei(-x)$	0	0	0.003	0.011	0.025	0.044	0.205	0.535

F4.3 Calculation of the complete temperature transient

The complete transient is calculated by Sub-clause 4.4. An example calculation for 1 h is shown below, the values for this time and for the remainder being summarized in column 5 of Table F3.

$$\theta(1) = 6.5 + 0.407 \times 1.4 = 7.1 \text{ K}$$

(from equation (4-71))

Si l'on tient compte de la variation des pertes dans l'âme, l'échauffement est donné par l'équation (4-73):

$$\theta_a(1) = \frac{7,1}{1 + \frac{1}{234,5 + 29,9} (75 - 7,1)} = 5,6 \text{ K} \quad (\text{en utilisant l'équation (4-73)})$$

Note. — Température initiale = 29,3 °C due à une contribution de 19,3 K dues aux pertes diélectriques. Température réelle de l'âme = 29,3 + 5,6 = 34,9 °C.

Les valeurs corrigées de l'échauffement de l'âme sont résumées dans la colonne 6 du tableau F3, à côté des températures réelles de l'âme qui sont données dans la colonne 7.

TABLEAU F3

Résumé des composants du régime transitoire de température

Temps (h)	$\theta_c(t)$ (K)	$\alpha(t)$	$\theta_e(t)$ (K)	$\theta(t)$ (K)	$\theta_a(t)$ (K)	Température réelle de l'âme (°C)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	6,5	0,407	1,4	7,1	5,6	34,9
2	10,4	0,648	2,6	12,1	9,8	39,1
3	12,7	0,792	3,5	15,5	12,7	42,0
4	14,0	0,877	4,2	17,7	14,6	43,9
5	14,8	0,927	4,7	19,3	15,9	45,2
6	15,3	0,957	5,3	20,4	16,9	46,2
12	16,0	0,999	7,8	23,8	19,9	49,2
24	16,0	1,000	11,2	27,2	23,0	52,3

F5. Exemple de calcul d'une capacité de transport cyclique

F5.1 Détails sur le cycle de charge

Le cycle de charge journalier est donné au tableau F4 comme une fraction de la valeur maximale du courant. La figure 8 indique les relations entre le cycle de charge, le cycle de charge des pertes et la fonction échelon équivalente au cycle de charge des pertes.

Le facteur de charge des pertes est déterminé à partir de l'équation (6-1).

$$\mu = \frac{0,091 + 0,061 + 0,052 + \dots + 0,360}{24} = 0,504$$

F5.2 Calcul du facteur d'approche relatif à l'échauffement de l'âme par rapport à la surface du câble

Le facteur d'approche relatif à l'échauffement de l'âme par rapport à la surface du câble est obtenu par calculs du régime transitoire (voir paragraphe F4.1) dans le cas où ils ont été effectués, ou à partir de l'équation (7-1) en utilisant les paramètres du circuit thermique de l'article F3 comme indiqué ci-dessous pour la période de 6 h à des intervalles horaires.

$$a(1) = \frac{2,42 \times 10^{-4} (1 - e^{-2,48 \times 10^{-1} \times 3600}) + 0,528(1 - e^{-1,145 \times 10^{-1} \times 3600})}{0,488 + 0,04} = 0,407$$

Cette valeur et les cinq autres valeurs $a(t)$ sont données dans la colonne 2 du tableau F5.

Correcting for variation of conductor losses using equation (4-73):

$$\theta_a(1) = \frac{7.1}{1 + \frac{1}{234.5 + 29.9} (75 - 7.1)} = 5.6 \text{ K} \quad (\text{from equation (4-73)})$$

Note. — Initial temperature = 29.3 °C caused by 19.3 K dielectric loss contribution. Actual conductor temperature = 29.3 + 5.6 = 34.9 °C.

The corrected values of conductor temperature rise are summarized in column 6 of Table F3 along with the actual conductor temperatures in column 7.

TABLE F3
Summary of temperature transient components

Time (h)	$\theta_c(t)$ (K)	$\alpha(t)$	$\theta_e(t)$ (K)	$\theta(t)$ (K)	$\theta_a(t)$ (K)	Actual conductor temperature (°C)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	6.5	0.407	1.4	7.1	5.6	34.9
2	10.4	0.648	2.6	12.1	9.8	39.1
3	12.7	0.792	3.5	15.5	12.7	42.0
4	14.0	0.877	4.2	17.7	14.6	43.9
5	14.8	0.927	4.7	19.3	15.9	45.2
6	15.3	0.957	5.3	20.4	16.9	46.2
12	16.0	0.999	7.8	23.8	19.9	49.2
24	16.0	1.000	11.2	27.2	23.0	52.3

F5. Example of the calculation of a cyclic rating

F5.1 Cyclic load details

The daily load cycle is given as a fraction of the maximum current in Table F4. Figure 8 shows the relationship between the load cycle, the loss-load graph and the equivalent step function cyclic loss-load.

The loss-load factor is determined from equation (6-1).

$$\mu = \frac{0.091 + 0.061 + 0.052 + \dots + 0.360}{24} = 0.504$$

F5.2 Calculation of the conductor to cable surface attainment factor

The conductor to cable surface attainment factor is obtained from the transient calculations (see Sub-clause F4.1) if, in practice, this has been undertaken, or from equation (7-1), using the thermal circuit parameters of Clause F3, as set out below for the 6 h period at hourly intervals.

$$a(1) = \frac{2.42 \times 10^{-4} (1 - e^{-2.48 \times 10^{-1} \times 3600}) + 0.528(1 - e^{-1.145 \times 10^{-1} \times 3600})}{0.488 + 0.04} = 0.407$$

This value and the other five $a(t)$ values are as given in column 2 of Table F5.

TABLEAU F4
Exemple de charge cyclique journalière

Temps (h)	Charge Charge la plus élevée	Valeur de Y_i	Y_i
0	0,302	0,091	Y_{17}
1	0,247	0,061	Y_{16}
2	0,227	0,052	Y_{15}
3	0,232	0,054	Y_{14}
4	0,235	0,056	Y_{13}
5	0,246	0,061	Y_{12}
6	0,290	0,084	Y_{11}
7	0,600	0,360	Y_{10}
8	1,000	1,000	Y_9
9	0,950	0,902	Y_8
10	0,940	0,884	Y_7
11	0,910	0,828	Y_6
12	0,892	0,796	Y_5
13	0,770	0,593	Y_4
14	0,772	0,596	Y_3
15	0,800	0,640	Y_2
16	0,853	0,728	Y_1
17	0,996	0,992	Y_0
18	0,853	0,728	Y_{23}
19	0,790	0,624	Y_{22}
20	0,740	0,548	Y_{21}
21	0,740	0,548	Y_{20}
22	0,722	0,521	Y_{19}
23	0,600	0,360	Y_{18}

F5.3 Calculs du facteur d'approche relatif à l'échauffement de la surface du câble par rapport à la température ambiante

Le facteur d'approche $\gamma(t)$ relatif à l'échauffement de la surface du câble par rapport à la température ambiante s'obtient à partir de l'équation (7-7), où:

$$D_e = 0,122 \text{ m}$$

$$L = 1,0 \text{ m}$$

$$d_{pk} = 0,3 \text{ m}$$

$$d'_{pk} = \sqrt{(0,3)^2 + (2,0)^2} = 2,022 \text{ m (voir figure 9))}$$

$$\delta = 0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$N = 3$$

$$F = \frac{2,022 \times 2,022}{0,3 \times 0,3} = 45,4 \quad (\text{en utilisant l'équation (7-8)})$$

$$d_f = \frac{4 \times 1,0}{(45,4)^{1/2}} = 0,593 \quad (\text{en utilisant l'équation (7-9)})$$

Un exemple est détaillé ici pour la valeur à 6 h (21 600 s), les valeurs pour cette durée et les autres durées figurant dans la colonne 3 du tableau F5. Les second et quatrième termes du numérateur de l'équation (7-7) représentent l'effet des sources images (voir figure 9) et sont négligeables à des profondeurs normales de pose lorsque i est inférieur ou égal à 6 h.

TABLE F4
Daily cyclic load example

Time (h)	Load Highest Load	Value of Y_i	Y_i
0	0.302	0.091	Y_{17}
1	0.247	0.061	Y_{16}
2	0.227	0.052	Y_{15}
3	0.232	0.054	Y_{14}
4	0.235	0.056	Y_{13}
5	0.246	0.061	Y_{12}
6	0.290	0.084	Y_{11}
7	0.600	0.360	Y_{10}
8	1.000	1.000	Y_9
9	0.950	0.902	Y_8
10	0.940	0.884	Y_7
11	0.910	0.828	Y_6
12	0.892	0.796	Y_5
13	0.770	0.593	Y_4
14	0.772	0.596	Y_3
15	0.800	0.640	Y_2
16	0.853	0.728	Y_1
17	0.996	0.992	Y_0
18	0.853	0.728	Y_{23}
19	0.790	0.624	Y_{22}
20	0.740	0.548	Y_{21}
21	0.740	0.548	Y_{20}
22	0.722	0.521	Y_{19}
23	0.600	0.360	Y_{18}

F5.3 Calculations of the cable surface to ambient attainment factor

The cable surface attainment factor $\gamma(t)$ is calculated using equation (7-7) where:

$$D_e = 0.122 \text{ m}$$

$$L = 1.0 \text{ m}$$

$$d_{pk} = 0.3 \text{ m}$$

$$d'_{pk} = \sqrt{(0.3)^2 + (2.0)^2} = 2.022 \text{ m (see Figure 9)}$$

$$\delta = 0.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$N = 3$$

$$F = \frac{2.022 \times 2.022}{0.3 \times 0.3} = 45.4 \quad (\text{from equation (7-8)})$$

$$d_f = \frac{4 \times 1.0}{(45.4)^{1/2}} = 0.593 \quad (\text{from equation (7-9)})$$

An example is given for the value at 6 h (21 600 s) and the values for this time and for the remainder are listed in Table F5, column 3. The second and fourth terms in the numerator of equation (7-7) represent the effects of the image sources (see Figure 9) and at normal depths of laying are negligible when i is 6 h or less.

$$x = \left(\frac{D_e^2}{16t\delta} \right) = \frac{(0,122)^2}{16 \times 21\,600 \times 0,5 \times 10^{-6}} = 0,086, \quad -Ei(-x) = 1,96$$

$$x = \left(\frac{d_f^2}{16t\delta} \right) = \frac{(0,593)^2}{16 \times 21\,600 \times 0,5 \times 10^{-6}} = 2,03, \quad -Ei(-x) = 0,047$$

$$\gamma(6) = \frac{1,96 + (2 \times 0,047)}{2 \ln \left(\frac{4 \times 1,0 \times 45,4}{0,122} \right)} = 0,14 \quad (\text{en utilisant l'équation (7-7)})$$

F5.4 Calculs du facteur k_1

k_1 s'obtient à partir de l'équation (7-10) avec:

$$T_4 = \frac{1,0}{2\pi} \ln \left(\frac{4 \times 1,0}{0,122} \right) = 0,555 \text{ K.m/W} \quad (\text{en utilisant l'équation (7-3a)})$$

$$\Delta T_4 = \frac{1,0}{2\pi} \ln 45,4 = 0,607 \text{ K.m/W} \quad (\text{en utilisant l'équation (7-11)})$$

T_A et T_B figurant à l'article F3.

$$k_1 = \frac{32,4 (0,555 + 0,607)}{30,3 (0,488 + 0,04) + 32,4 (0,555 + 0,607)} = 0,702 \quad (\text{en utilisant l'équation (7-10)})$$

F5.5 Calcul de $\frac{\theta_R(1)}{\theta_R(\infty)}$

Ce rapport s'obtient à partir de l'équation (7-6). Les données d'entrée et les résultats sont résumés au tableau F5, avec un exemple pour $t = 1$ h donné ci-dessous.

$$\frac{\theta_R(1)}{\theta_R(\infty)} = [1 - 0,702 + (0,702 \times 0,037)] 0,407 = 0,132 \quad (\text{en utilisant l'équation (7-6)})$$

TABLEAU F5

Temps (h)	$a(i)$	$\gamma(i)$	$\theta_R(i)/\theta_R(\infty)$
(1)	(2)	(3)	(4)
1	0,407	0,037	0,132
2	0,648	0,070	0,225
3	0,792	0,093	0,288
4	0,877	0,110	0,329
5	0,927	0,126	0,358
6	0,957	0,140	0,379

$$x = \left(\frac{D_e^2}{16t\delta} \right) = \frac{(0.122)^2}{16 \times 21\,600 \times 0.5 \times 10^{-6}} = 0.086, -Ei(-x) = 1.96$$

$$x = \left(\frac{d_f^2}{16t\delta} \right) = \frac{(0.593)^2}{16 \times 21\,600 \times 0.5 \times 10^{-6}} = 2.03, -Ei(-x) = 0.047$$

$$\gamma(6) = \frac{1.96 + (2 \times 0.047)}{2 \ln \left(\frac{4 \times 1.0 \times 45.4}{0.122} \right)} = 0.14 \quad (\text{from equation (7-7)})$$

F5.4 Calculations of factor k_1

k_1 is calculated from equation (7-10) with:

$$T_4 = \frac{1.0}{2\pi} \ln \left(\frac{4 \times 1.0}{0.122} \right) = 0.555 \text{ K.m/W} \quad (\text{from equation (7-3a)})$$

$$\Delta T_4 = \frac{1.0}{2\pi} \ln 45.4 = 0.607 \text{ K.m/W} \quad (\text{from equation (7-11)})$$

T_A and T_B are taken from Clause F3.

$$k_1 = \frac{32.4 (0.555 + 0.607)}{30.3 (0.488 + 0.04) + 32.4 (0.555 + 0.607)} = 0.702 \quad (\text{from equation (7-10)})$$

F5.5 Calculation of $\frac{\theta_R(1)}{\theta_R(\infty)}$

This is calculated from equation (7-6). The input data and results are summarized in Table F5, with an example for $t = 1$ h set out below.

$$\frac{\theta_R(1)}{\theta_R(\infty)} = [1 - 0.702 + (0.702 \times 0.037)] 0.407 = 0.132 \quad (\text{from equation (7-6)})$$

TABLE F5

Time (h)	$a(i)$	$\gamma(i)$	$\theta_R(i)/\theta_R(\infty)$
(1)	(2)	(3)	(4)
1	0.407	0.037	0.132
2	0.648	0.070	0.225
3	0.792	0.093	0.288
4	0.877	0.110	0.329
5	0.927	0.126	0.358
6	0.957	0.140	0.379

F5.6 Facteur de capacité de transport cyclique M

Le facteur de capacité de transport cyclique s'obtient à partir de l'équation (5-3), en utilisant les valeurs définies dans le tableau suivant:

Temps (h)	Y_i	$\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)}$
0	0,992	0
1	0,728	0,132
2	0,640	0,225
3	0,596	0,288
4	0,593	0,329
5	0,796	0,358
6	—	0,379

$\mu = 0,504$ (voir paragraphe F5.1)

$$M = [0,922(0,132) + 0,728(0,225 - 0,132) + 0,64(0,288 - 0,225) + 0,596(0,329 - 0,288) + 0,593(0,358 - 0,329) + 0,796(0,379 - 0,358) + 0,504(1 - 0,379)]^{-1/2}$$

$$M = 1,28$$

Ainsi, la valeur admissible à la pointe du courant de charge cyclique est:

$$1,28 \times 1\,580 = 2\,022 \text{ A}$$

F6. Exemple de calcul d'un régime de secours

F6.1 Détails sur la charge de secours

La liaison par câbles est supposée fonctionner en continu à 1 195 A, ce qui donne une température permanente de l'âme de 60 °C. Il est nécessaire de déterminer le niveau de courant de secours qui peut être supporté pendant 6 h sans dépasser la température maximale de fonctionnement (85 °C).

F6.2 Capacité de transport de secours

D'après le paragraphe 8.1, les paramètres suivants sont nécessaires (il convient de noter que les paramètres de température ont été modifiés en tenant compte de l'échauffement dû aux pertes diélectriques):

$$r = 1$$

$$t = 6 \text{ h (21 600 s)}$$

$$I_R = 1\,580 \text{ A}$$

$$I_1 = 1\,195 \text{ A}$$

$$h_1 = \frac{1\,195}{1\,550} = 0,771$$

$$R_1 = 11,625 \mu\Omega/\text{m}, \text{ à savoir résistance en courant alternatif à } 60 \text{ °C}$$

$$R_{\max} = 12,612 \mu\Omega/\text{m}, \text{ à savoir résistance en courant alternatif à } 85 \text{ °C}$$

$$R_R = 12,612 \mu\Omega/\text{m}, \text{ à savoir résistance en courant alternatif à } 85 \text{ °C}$$

$$\text{Echauffement dû aux pertes diélectriques} = 19,3 \text{ K}$$

$$\text{Echauffement permanent dû aux pertes par effet Joule} = 85 - 10 - 19,3 = 55,7 \text{ K};$$

$$\theta_R(6) = \theta_\alpha(6) = 16,9 \text{ K (voir tableau F3, colonne 6) pour l'application d'un échelon de courant nominal.}$$

F5.6 Cyclic rating factor M

The cyclic rating factor is calculated from equation (5-3), using the values set out in the following table:

Time (h)	Y_i	$\frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)}$
0	0.992	0
1	0.728	0.132
2	0.640	0.225
3	0.596	0.288
4	0.593	0.329
5	0.796	0.358
6	—	0.379

$$\mu = 0.504 \text{ (see Sub-clause F5.1)}$$

$$M = [0.922(0.132) + 0.728(0.225 - 0.132) + 0.64(0.288 - 0.225) + 0.596(0.329 - 0.288) + 0.593(0.358 - 0.329) + 0.796(0.379 - 0.358) + 0.504(1 - 0.379)]^{-1/2}$$

$$M = 1.28$$

Thus the permissible peak value of the cyclic load current is:

$$1.28 \times 1580 = 2022 \text{ A}$$

F6. Example of an emergency rating calculation

F6.1 Emergency load details

The cable system is assumed to be operating at 1 195 A continuously which gives a steady-state conductor temperature of 60 °C. It is required to determine the emergency current level that can be carried for 6 h without exceeding the maximum operating temperature (85 °C).

F6.2 Emergency current rating

From Sub-clause 8.1 the following parameters are required (note that temperature parameters have been modified to allow for temperature rise due to dielectric loss):

$$r = 1$$

$$t = 6 \text{ h (21 600 s)}$$

$$I_R = 1\,580 \text{ A}$$

$$I_1 = 1\,195 \text{ A}$$

$$h_1 = \frac{1\,195}{1\,550} = 0.771$$

$$R_1 = 11.625 \mu\Omega/\text{m (a.c. resistance at 60 °C)}$$

$$R_{\max} = 12.612 \mu\Omega/\text{m (a.c. resistance at 85 °C)}$$

$$R_R = 12.612 \mu\Omega/\text{m (a.c. resistance at 85 °C)}$$

$$\text{Temperature rise due to dielectric loss} = 19.3 \text{ K}$$

$$\text{Steady-state temperature rise due to joule losses} = 85 - 10 - 19.3 = 55.7 \text{ K};$$

$$\theta_R(6) = \theta_a(6) = 16.9 \text{ K (see Table F3, column 6) for application of a step function of rated current.}$$

Le courant de secours I_2 est donc égal à:

$$I_2 = 1\,580 \left[(0,771)^2 \frac{11,625}{12,612} + \frac{1 \left[1 - \frac{(0,771)^2 11,625}{12,612} \right]}{(16,9/55,7)} \right]^{1/2} = 2\,247 \text{ A}$$

(en utilisant l'équation (8-1))

Thus the emergency current I_2 is:

$$I_2 = 1\,580 \left[\frac{(0.771)^2}{12.612} + \frac{1 \left[1 - \frac{(0.771)^2 \cdot 11.625}{12.612} \right]}{(16.9/55.7)} \right]^{1/2} = 2\,247 \text{ A}$$

(from equation (8-1))

TABLEAU 1 / TABLE 1

Valeurs de $1-\beta(6)$ pour une diffusivité thermique du sol de $0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Values of $1-\beta(6)$ for soil thermal diffusivity of $0.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

	Diamètre du câble ou diamètre extérieur du fourreau (m) / Cable diameter or outer duct diameter (m)														
	0,030	0,035	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060	0,065	0,070	0,075	0,080	0,085	0,090	0,095	0,100
$1-\beta(6)$	0,521	0,538	0,553	0,568	0,581	0,594	0,605	0,617	0,627	0,638	0,648	0,657	0,667	0,676	0,684

	Diamètre du câble ou diamètre extérieur du fourreau (m) / Cable diameter or outer duct diameter (m)														
	0,105	0,110	0,115	0,120	0,125	0,130	0,135	0,140	0,145	0,150	0,155	0,160	0,165	0,170	0,175
$1-\beta(6)$	0,693	0,701	0,709	0,716	0,724	0,731	0,738	0,745	0,752	0,758	0,765	0,771	0,777	0,783	0,789

	Diamètre du câble ou diamètre extérieur du fourreau (m) / Cable diameter or outer duct diameter (m)														
	0,180	0,185	0,190	0,195	0,200	0,205	0,210	0,215	0,220	0,225	0,230	0,235	0,240	0,245	0,250
$1-\beta(6)$	0,794	0,800	0,805	0,811	0,816	0,821	0,826	0,830	0,835	0,840	0,844	0,848	0,853	0,857	0,861

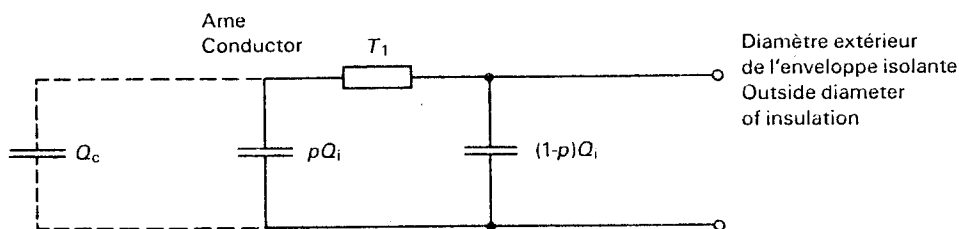


FIG. 1. — Représentation de l'isolant pour des durées supérieures à $\frac{1}{3} T.Q.$
Representation of the dielectric for times greater than $\frac{1}{3} T.Q.$

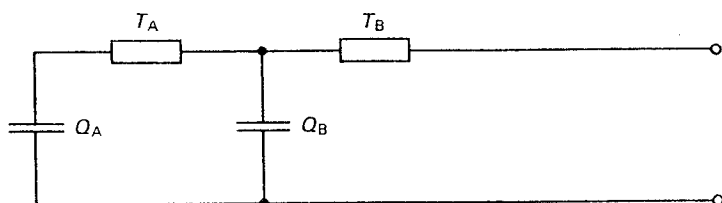


FIG. 2. — Réseau équivalent au câble pour les calculs de réponse transitoire.
Equivalent cable network for transient response calculations.

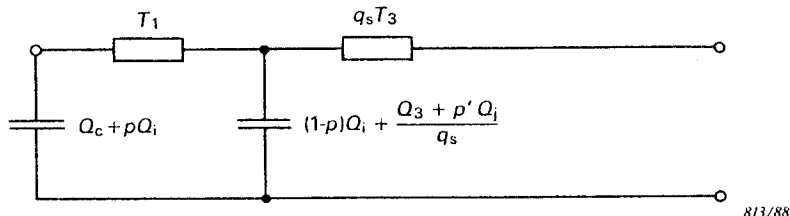


FIG. 3. — Représentation d'un cas typique de câble (voir paragraphe 4.2.2.2, point a) pour des durées supérieures à $\frac{1}{3} T.Q.$
Representation of a typical cable type (see Sub-clause 4.2.2.2, Item a) for times greater than $\frac{1}{3} T.Q.$

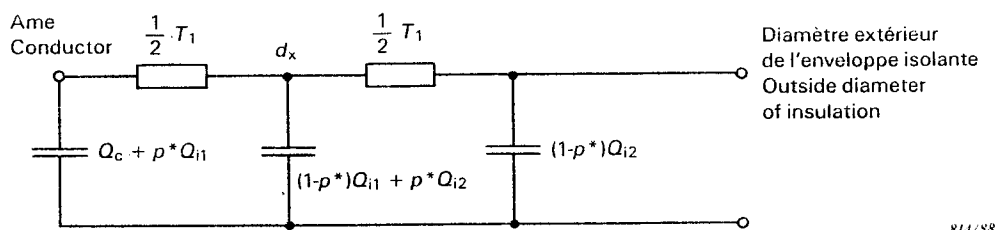


FIG. 4. — Représentation de l'isolant pour des durées inférieures ou égales à $\frac{1}{3} T.Q.$
Representation of the dielectric for times less than or equal to $\frac{1}{3} T.Q.$

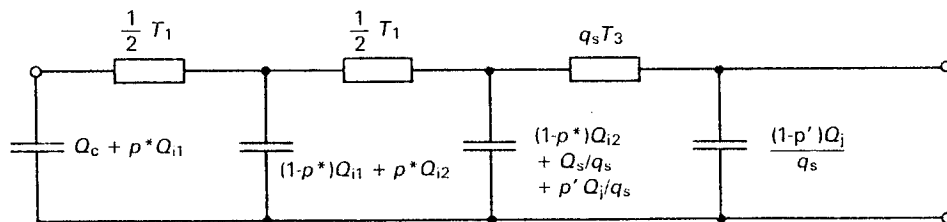


FIG. 5. — Représentation d'un cas typique de câble (voir paragraphe 4.3.2.2, point a) pour des durées inférieures ou égales à $\frac{1}{3} T.Q.$, avant réduction.
Representation of a typical cable type (see Sub-clause 4.3.2.2, Item a) for times less than or equal to $\frac{1}{3} T.Q.$, before reduction.

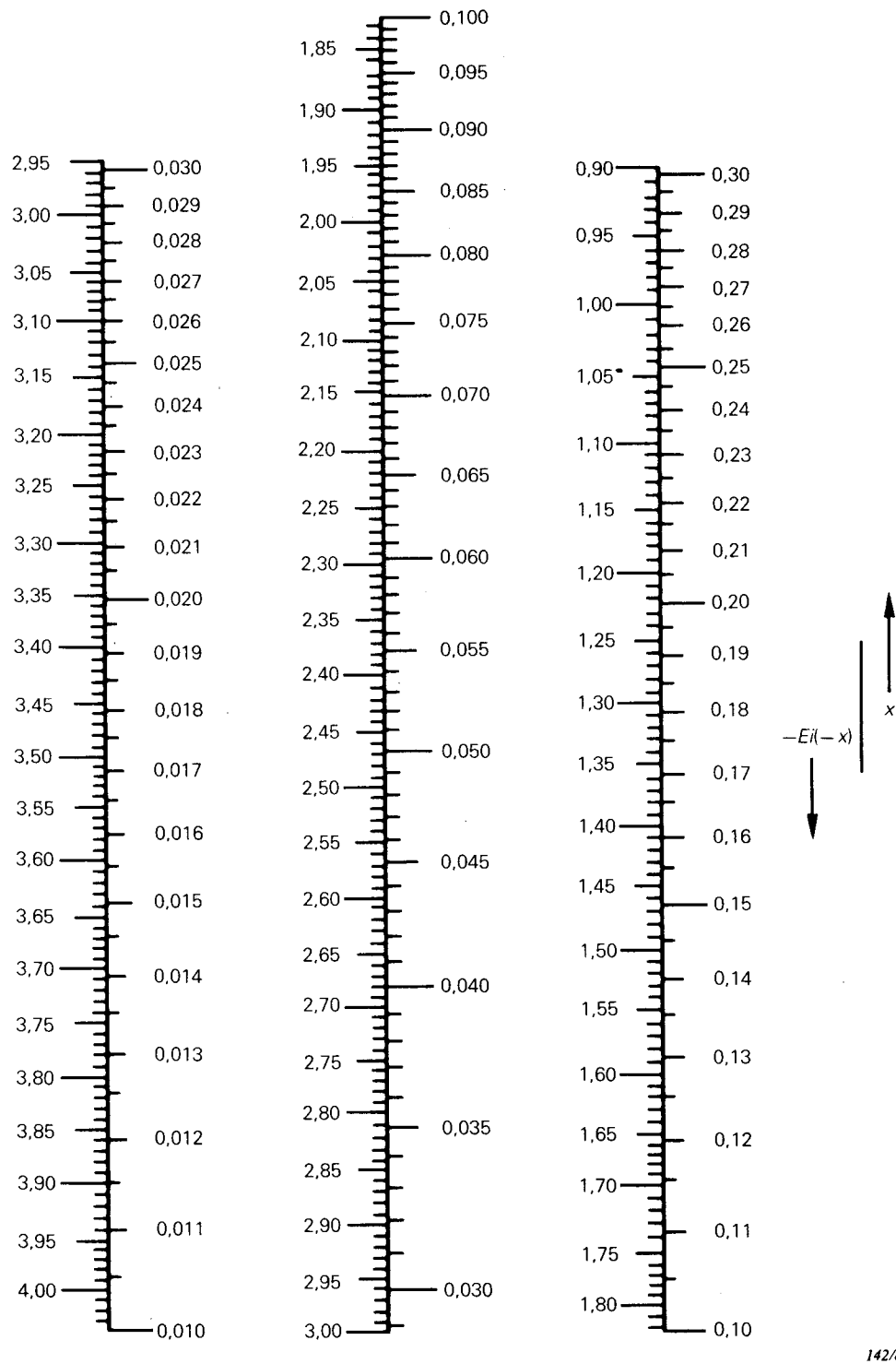
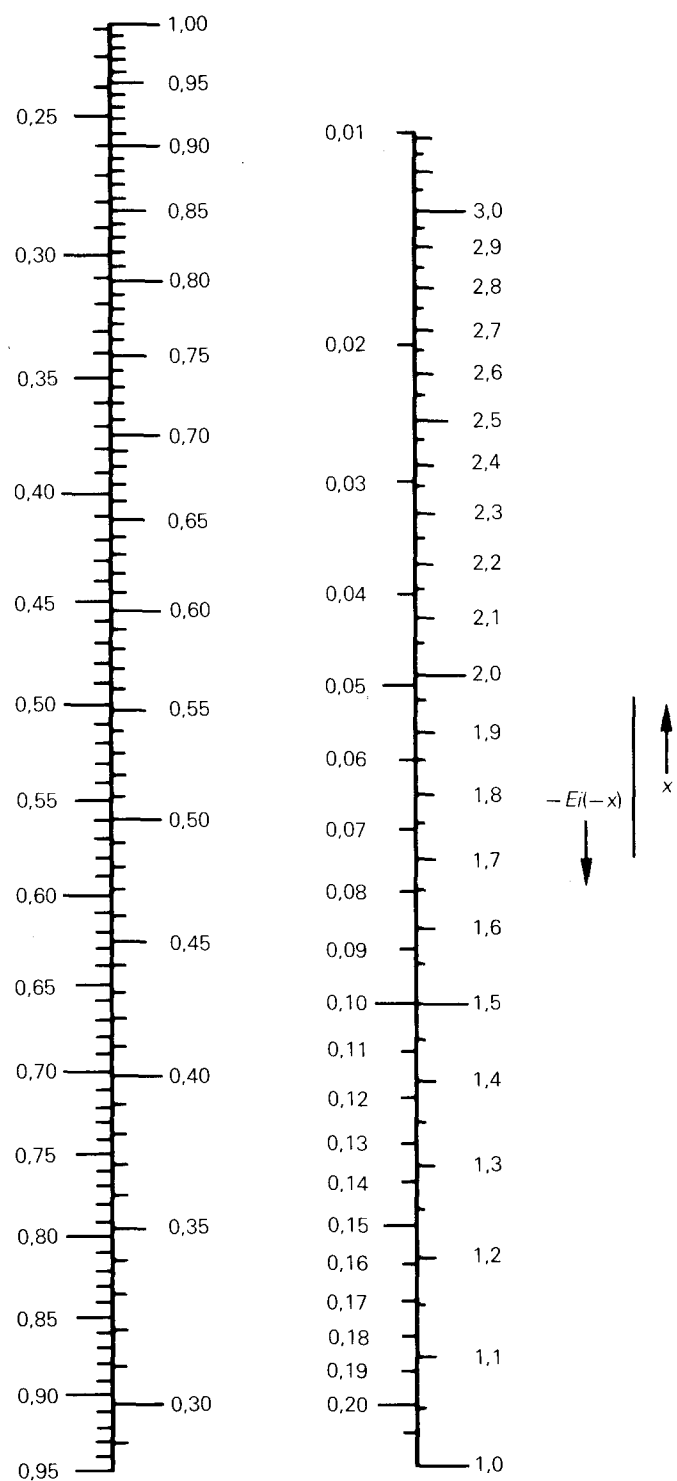


FIG. 6. — Nomogramme de l'exponentielle intégrale $0,30 \leq x \leq 0,1$.
Scales for exponential integral $0.30 \leq x \leq 0.1$.



143/85

FIG. 7. — Nomogramme de l'exponentielle intégrale $0,30 \leq x \leq 3,0$.
Scales for exponential integral $0,30 \leq x \leq 3,0$.

NOTES RELATIVES AUX FIGURES 6 ET 7 «NOMOGRAMMES DE L'EXPONENTIELLE INTÉGRALE»

L'exponentielle intégrale $-Ei(-x)$ est définie dans les ouvrages classiques de référence, par exemple dans l'ouvrage de référence [4], pp. 228-231. Les approximations rationnelles suivantes, donnant un résultat correct à quatre décimales, sont déduites de cet ouvrage.

Pour $0 \leq x \leq 1$

$$-Ei(-x) = -\ln(x) + \sum_{i=0}^5 a_i x^i$$

où:

$$\begin{aligned} a_0 &= -0,5772 \\ a_1 &= 1,0000 \\ a_2 &= -0,2499 \\ a_3 &= 0,0552 \\ a_4 &= 0,0098 \\ a_5 &= 0,0011 \end{aligned}$$

Pour $1 < x < \infty$

$$-Ei(-x) = \frac{1}{xe_x} \left[\frac{x^2 + a_1 x + a_2}{x^2 + b_1 x + b_2} \right]$$

où

$$\begin{aligned} a_1 &= 2,3347 & b_1 &= 3,3307 \\ a_2 &= 0,2506 & b_2 &= 1,6815 \end{aligned}$$

Les expressions données ci-dessus conviennent à des méthodes de calcul manuelles ou par calculateur. Cependant, l'expression unique suivante, fondée sur l'une de celles qui sont données dans [5], peut convenir à une utilisation en ordinateur, bien que le temps d'exécution soit quelquefois plus long.

Pour toutes les valeurs de $x > 0$

$$-Ei(-x) = -0,5772 - \ln(x) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n x^n}{n(n!)}$$

(Cela couvre les besoins de la présente norme si $-Ei(-x)$ est supposé égal à 0 pour les valeurs de $x \geq 8$, et égal à $-\ln(x) - 0,5772 + x$ pour $x < 0,01$.)

NOTES TO FIGURES 6 AND 7 "SCALES FOR EXPONENTIAL INTEGRAL"

The exponential integral $-Ei(-x)$ is defined in the standard reference books, e.g. reference [4] pp. 228-231, from which the following rational approximations, adequate to give a result correct to four places of decimals, have been derived:

For $0 \leq x \leq 1$

$$-Ei(-x) = -\ln(x) + \sum_{i=0}^5 a_i x^i$$

where:

$$a_0 = -0.5772$$

$$a_1 = 1.0000$$

$$a_2 = -0.2499$$

$$a_3 = 0.0552$$

$$a_4 = 0.0098$$

$$a_5 = 0.0011$$

For $1 < x < \infty$

$$-Ei(-x) = \frac{1}{xe_x} \left[\frac{x^2 + a_1 x + a_2}{x^2 + b_1 x + b_2} \right]$$

where

$$a_1 = 2.3347$$

$$b_1 = 3.3307$$

$$a_2 = 0.2506$$

$$b_2 = 1.6815$$

The expressions given above are convenient for manual or machine use. However, the following single expression, based on one given in [5] may be convenient for computer use although its execution time can be longer.

For all values of $x > 0$

$$-Ei(-x) = -0.5772 - \ln(x) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n x^n}{n(n!)}$$

(It is sufficient for the purposes of this standard if $-Ei(-x)$ is put equal to 0 for values of $x \geq 8$, and equal to $-\ln(x) - 0.5772 + x$ for $x < 0.01$.)

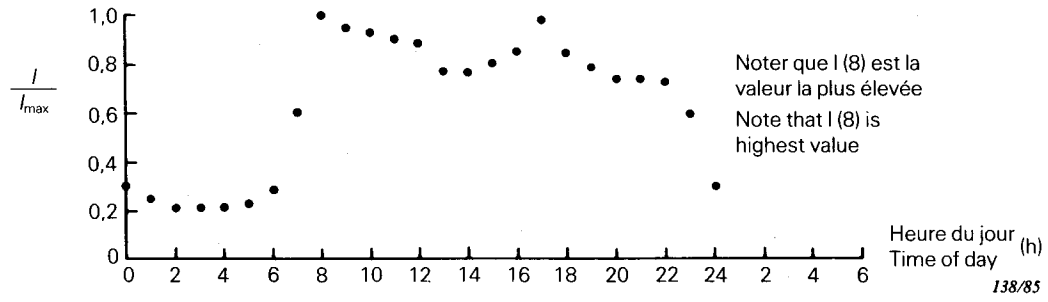


FIG. 8a. — Charge cyclique divisée par la charge la plus élevée.
Cyclic load divided by highest load.

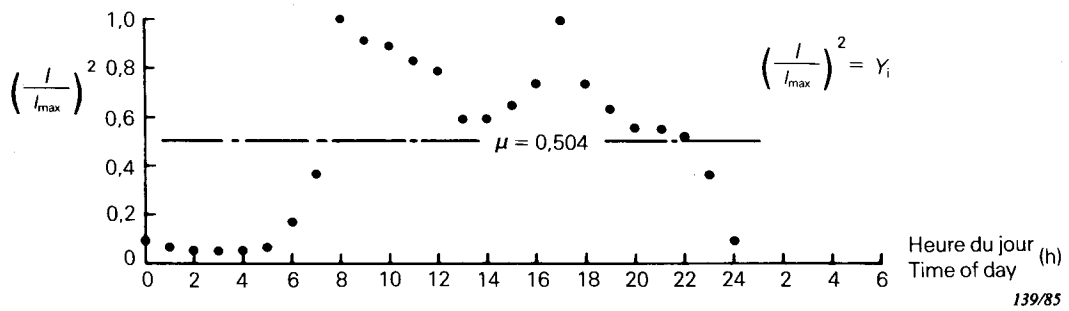


FIG. 8b. — Cycle de charge des pertes.
Loss-load graph.

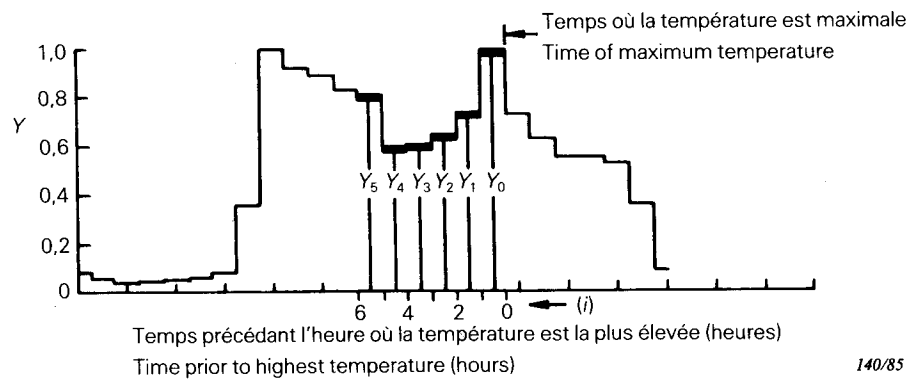
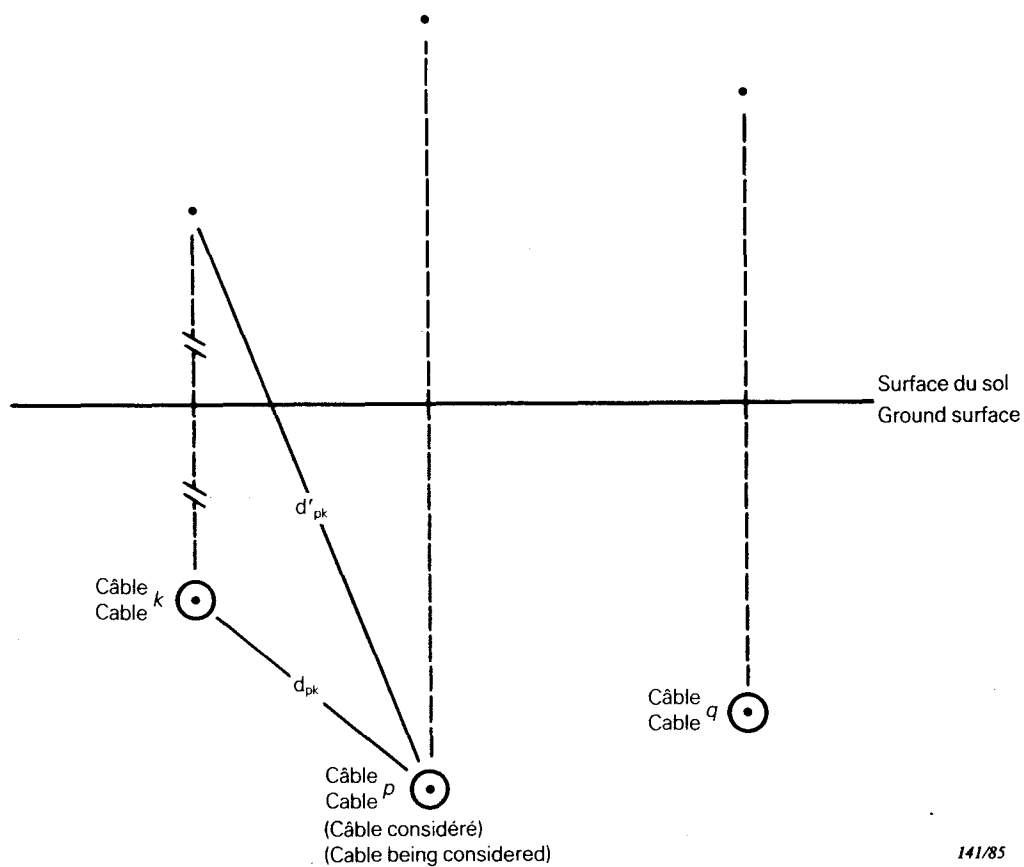


FIG. 8c. — Fonction échelon équivalente au cycle de charge des pertes.
Equivalent step function cyclic loss-load.

FIGURE 8



141/85

FIG. 9. — Câbles ou circuits de câbles jointifs et leurs images.
Cables, or circuits of touching cables, and their images.

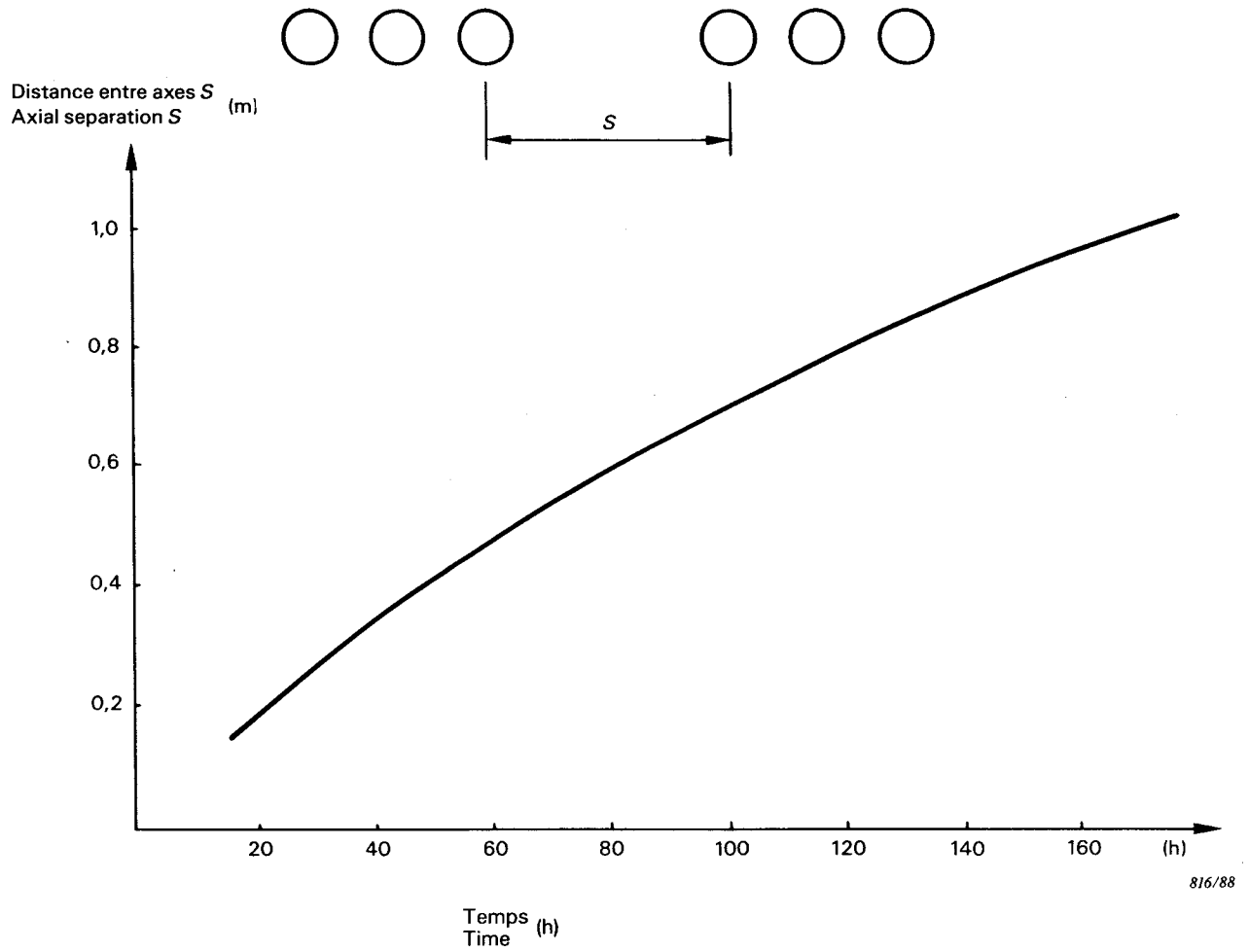


FIG. 10. — Temps nécessaire pour réduire de 1 K la température au niveau de l'axe du câble central du premier circuit lorsque la charge du second circuit est annulée (voir paragraphe 8.2).

Time for 1 K reduction in temperature at axis of central cable of first circuit due to current reduced to zero in second circuit (see Sub-clause 8.2).

ICS 29.060.20

Typeset and printed by the IEC Central Office
GENEVA, SWITZERLAND