

RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT

CEI
IEC

TR 62095

Première édition
First edition
2003-06

**Câbles électriques –
Calcul de la capacité de transport de courant –
Méthode des éléments finis**

**Electric cables –
Calculations for current ratings –
Finite element method**

© IEC 2003 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembe, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

V

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	6
1 Introduction.....	8
1.1 Généralités	8
1.2 Champ d'application	10
1.3 Informations obtenues par la méthode des éléments finis	12
1.4 Méthodes alternatives.....	12
2 Synthèse sur la méthode des éléments finis	14
3 Considérations pratiques pour l'application de la méthode des éléments finis aux calculs de capacité de transport des câbles	22
3.1 Sélection de la région à discrétiser	24
3.2 Taille des éléments.....	24
3.3 Conditions aux limites.....	28
3.4 Représentation des pertes du câble.....	30
3.5 Sélection du pas de temps.....	30
4 Exemples d'application de la méthode des éléments finis pour l'évaluation des capacités de transport des câbles.....	32
4.1 Exemple 1	32
4.2 Exemple 2	34
4.3 Exemple 3	36
Annexe A Développement des équations	40
A.1 Equations de transfert de la chaleur.....	40
A.2 Approximation des équations polynomiales.....	42
A.3 Equations de base de la méthode des éléments finis	44
A.4 Exemples.....	52
Bibliographie.....	66
Figure 1 – Répartition de la température dans un aileron unidimensionnel	16
Figure 2 – Les points nodaux et les valeurs supposées de $\theta(x)$	16
Figure 3 – Division du domaine en éléments	18
Figure 4 – Modèle discrétisé d'une distribution de température unidimensionnelle	20
Figure 5 – Modélisation d'une fonction scalaire bi-dimensionnelle par l'utilisation d'éléments triangulaires ou quadrilatéraux	22
Figure 6 – Modélisation d'une fonction scalaire bi-dimensionnelle par l'utilisation d'un élément triangulaire quadratique	22
Figure 7(a) – Exemple de 6 câbles dans un bloc de fourreaux enrobés de béton, installation	26
Figure 7(b) – Exemple de 6 câbles dans un bloc de fourreaux enrobés de béton, maillage grossier.....	26
Figure 7(c) – Exemple de 6 câbles dans un bloc de fourreaux enrobés de béton, maillage fin	28
Figure 7 – Exemple de maillage dans un modèle d'élément fini	28

CONTENTS

FOREWORD	7
1 Introduction.....	9
1.1 General	9
1.2 Field of application	11
1.3 Information obtained from the finite element method.....	13
1.4 Alternative methods.....	13
2 Overview of the finite element method	15
3 Practical considerations when applying the finite element method for cable rating calculations.....	23
3.1 Selection of the region to be discretised	25
3.2 Element sizes	25
3.3 Boundary conditions	29
3.4 Representation of cable losses	31
3.5 Selection of a time step	31
4 Examples of application of the finite element method for cable rating calculations	33
4.1 Example 1	33
4.2 Example 2	35
4.3 Example 3	37
Annex A Development of equations.....	41
A.1 Heat transfer equations.....	41
A.2 Approximating polynomials	43
A.3 Finite element equations.....	45
A.4 Examples.....	53
Bibliography.....	67
Figure 1 – Temperature distribution in a one dimensional fin.....	17
Figure 2 – The nodal points and the assumed values of $\theta(x)$	17
Figure 3 – Division of the domain into elements	19
Figure 4 – Discrete models for one-dimensional temperature distribution	21
Figure 5 – Modelling of a two-dimensional scalar function using triangular or quadrilateral elements.....	23
Figure 6 – Modelling of a two-dimensional scalar function using a quadratic triangular element.....	23
Figure 7(a) – Example of 6 cables in a concrete duct bank, installation	27
Figure 7(b) – Example of 6 cables in a concrete duct bank, coarse mesh.....	27
Figure 7(c) – Example of 6 cables in a concrete duct bank, fine mesh.....	29
Figure 7 – Example of meshing a finite element model.....	29

Figure 8 – Relation entre le pas de temps, la courbe de charge et le temps écoulé depuis le début du transitoire	32
Figure 9 – Conditions de pose pour l'étude par éléments finis, exemple 1	34
Figure 10 – Installation de l'exemple 2	36
Figure 11 – Isothermes pour l'installation de la Figure 10.....	36
Figure 12 – Câbles de forte section posés dans un caniveau à faible profondeur	38
Figure A.1 – Coordonnées locales.....	42
Figure A.2 – Illustration de l'exemple A1	52
Figure A.3 – Isotherme 41°C	54
Figure A.4 – Illustration de l'exemple 3	56
Figure A.5 – Illustration de l'exemple 4	58
Figure A.6 – Configuration du circuit thermique de l'exemple 5	62
Figure A.7 – Structure du réseau d'éléments finis pour une couche extérieure à un bloc de fourreaux	62
Tableau 1 – Comparaison des résultats obtenus à l'aide de la CEI 60287 et avec la méthode des éléments finis pour les câbles de l'exemple 1.....	34
Tableau 2 – Température de l'âme du câble obtenue avec la CEI 60287 et avec des méthodes aux éléments finis	38

Figure 8 – Relationship between the time step, the load curve and the time elapsed from the beginning of the transient	33
Figure 9 – Laying conditions for the finite element study in example 1.....	35
Figure 10 – Installation for example 2.....	37
Figure 11 – Isotherms for the system in Figure 10.....	37
Figure 12 – Large cables located in a shallow through	39
Figure A.1 – Area co-ordinates.....	43
Figure A.2 – Illustration for example A1.....	53
Figure A.3 – 41°C isothermal contour.....	55
Figure A.4 – Illustration for example 3.....	57
Figure A.5 – Illustration to example 4	59
Figure A.6 – Thermal circuit configuration in example 5	63
Figure A.7 – Finite element grid structure for a outer layer of a duct bank	63
Table 1 – Comparison of the IEC 60287 and the finite element results for cables in example 1	35
Table 2 – Conductor temperature of the middle cable obtained with the IEC 60287 and the finite element methods	39

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CÂBLES ÉLECTRIQUES – CALCUL DE LA CAPACITÉ DE TRANSPORT DE COURANT – MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Électrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La tâche principale des comités d'études de la CEI est l'élaboration des Normes internationales. Toutefois, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique lorsqu'il a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales, cela pouvant comprendre, par exemple, des informations sur l'état de la technique.

La CEI 62095, qui est un rapport technique, a été établie par le comité d'études 20 de la CEI: Câbles électriques.

Le texte de ce rapport technique est issu des documents suivants:

Projet d'enquête	Rapport de vote
20/600/DTR	20/634/RVC

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2014. A cette date, la publication sera

- reconduite;
- supprimée;
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ELECTRIC CABLES –
CALCULATIONS FOR CURRENT RATINGS –
FINITE ELEMENT METHOD**
FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this technical report may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. However, a technical committee may propose the publication of a technical report when it has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example "state of the art".

IEC 62095, which is a technical report, has been prepared by IEC technical committee 20: Electric cables.

The text of this technical report is based on the following documents:

Enquiry draft	Report on voting
20/600/DTR	20/634/RVC

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

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2014. At this date, the publication will be

- reconfirmed;
- withdrawn;
- replaced by a revised edition, or
- amended.

CÂBLES ÉLECTRIQUES – CALCUL DE LA CAPACITÉ DE TRANSPORT DE COURANT – MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS

1 Introduction

1.1 Généralités

Dans les calculs de capacité de transport des câbles, les aspects les plus importants sont la détermination de la température de l'âme du câble lorsqu'il est soumis à une charge donnée ou, inversement, l'évaluation de l'intensité du courant admissible pour une température d'âme donnée. Il faut donc déterminer la chaleur produite à l'intérieur du câble et sa dissipation à l'extérieur, pour un matériau d'âme et un courant de charge donné. La capacité du milieu environnant le câble à dissiper la chaleur est un élément de toute première importance pour ces calculs; elle est susceptible de varier largement en raison de différents facteurs tels que la composition et le taux d'humidité du sol ou la température ambiante et les conditions de vent. Les modes de transfert de chaleur du câble vers son environnement sont multiples. Pour les liaisons souterraines, le transfert de chaleur à partir de l'âme, l'isolation, les écrans et autres parties métalliques, se fait par conduction. Les modalités de dissipation de la chaleur sont quantifiables grâce à l'équation de transmission de la chaleur décrite à l'Annexe A (équation A.1).

Les calculs de capacité de transport des câbles de puissance demandent la résolution des équations de transmission de la chaleur, qui constituent une relation fonctionnelle entre l'intensité du courant écoulé par le câble et la température à l'intérieur du câble et dans son environnement. La résolution analytique de ces équations se heurte souvent à la difficulté du calcul de la distribution des températures dans le sol entourant le câble. Une résolution satisfaisante est possible analytiquement lorsque le câble est assimilé à une source à section nulle placée dans un milieu homogène et infini. Cette hypothèse n'étant pas vérifiée dans les configurations d'installation réelles, une hypothèse alternative est souvent soulevée, à savoir celle de l'isothermie de la surface du sol. En pratique, la profondeur de pose est de l'ordre d'une dizaine de fois le diamètre des câbles, et, dans la plage habituelle de températures atteintes par les câbles, l'hypothèse de l'isothermie de la surface du sol est acceptable. Pour les cas où cette hypothèse n'est pas réalisée, notamment pour les câbles à fort diamètre ou les câbles enterrés à faible profondeur, il est nécessaire d'appliquer des coefficients correctifs ou d'utiliser les méthodes de calcul numérique.

Lorsque la surface du sol est supposée isotherme, les équations de conduction de la chaleur en régime permanent peuvent être résolues en admettant que le câble est posé dans un milieu homogène semi-infini.

Les méthodes de résolution des équations de conduction de la chaleur sont décrites dans la CEI 60287 (régime permanent)¹ et la CEI 60853 (régime cyclique), et permettent de résoudre la plupart des problèmes posés dans la pratique. Lorsque ces méthodes sont inapplicables, les équations de conduction de la chaleur peuvent être résolues par des approches numériques. Parmi ces approches, la méthode des éléments finis présentée dans ce document, se prête particulièrement bien à l'analyse des câbles souterrains. Les cas où il est recommandé d'utiliser la méthode des éléments finis sont présentés ci-dessous.

¹ La CEI 60287 a été retirée et remplacée par une série de publications (voir [2] de la Bibliographie).

ELECTRIC CABLES – CALCULATIONS FOR CURRENT RATINGS – FINITE ELEMENT METHOD

1 Introduction

1.1 General

The most important tasks in cable current rating calculations are the determination of the conductor temperature for a given current loading or, conversely, the determination of the tolerable load current for a given conductor temperature. In order to perform these tasks the heat generated within the cable and the rate of its dissipation away from the conductor, for a given conductor material and given load, must be calculated. The ability of the surrounding medium to dissipate heat plays a very important role in these determinations and varies widely because of factors such as soil composition, moisture content, ambient temperature and wind conditions. The heat is transferred through the cable and its surroundings in several ways. For underground installations the heat is transferred by conduction from the conductor, insulation, screens and other metallic parts. It is possible to quantify the heat transfer processes in terms of the appropriate heat transfer equation as shown in Annex A (equation A.1).

Current rating calculations for power cables require a solution of the heat transfer equations which define a functional relationship between the conductor current and the temperature within the cable and its surroundings. The challenge in solving these equations analytically often stems from the difficulty of computing the temperature distribution in the soil surrounding the cable. An analytical solution can be obtained when a cable is represented as a line source placed in an infinite homogenous surrounding medium. Since this is not a practical assumption for cable installations, another assumption is often used; namely, that the earth surface is an isotherm. In practical cases, the depth of burial of the cables is in the order of ten times their external diameter, and for the usual temperature range reached by such cables, the assumption of an isothermal earth surface is a reasonable one. In cases where this hypothesis does not hold; namely, for large cable diameters and cables located close to the ground surface, a correction to the solution has to be used or numerical methods should be applied.

With the isothermal surface boundary, the steady-state heat conduction equations can be solved assuming that the cable is located in a uniform semi-infinite medium.

Methods of solving the heat conduction equations are described in IEC 60287 (steady-state conditions)¹ and IEC 60853 (cyclic conditions), for most practical applications. When these methods cannot be applied, the heat conduction equations can be solved using numerical approaches. One such approach, particularly suitable for the analysis of underground cables, is the finite element method presented in this document. The cases when the use of the finite element method is recommended are discussed next.

¹ IEC 60287 has been withdrawn and replaced by a series of publications (see item 2 of the Bibliography).