

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 TR 62095:2003](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ed91c373-5e40-4615-be53-9be553e9ab5a/iec-tr-62095-2003)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ed91c373-5e40-4615-be53-9be553e9ab5a/iec-tr-62095-2003>



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC/TR 62095:2003

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions 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.

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

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 cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de :

- **Site web de la CEI** (www.iec.ch)
- **Catalogue des publications de la CEI**
Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (http://www.iec.ch/searchpub/cur_fut.htm) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.
- **IEC Just Published**
Ce résumé des dernières publications parues (http://www.iec.ch/online_news/justpub/jp_entry.htm) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.
- **Service clients**
Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:
Email: custserv@iec.ch
Tél: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. 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.

Further information on IEC publications

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 this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. 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 also available from the following:

- **IEC Web Site** (www.iec.ch)
- **Catalogue of IEC publications**
The on-line catalogue on the IEC web site (http://www.iec.ch/searchpub/cur_fut.htm) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.
- **IEC Just Published**
This summary of recently issued publications (http://www.iec.ch/online_news/justpub/jp_entry.htm) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.
- **Customer Service Centre**
If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:
Email: custserv@iec.ch
Tel: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

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 TR 62095:2003

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ed91c373-5e40-4615-be53-9be553e9ab5a/iec-tr-62095-2003>

© 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

iTech STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[IEC TR 62095:2003](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ed91c373-5e40-4615-be53-9bc553e9ab5a/iec-tr-62095-2003)

[https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ed91c373-5e40-4615-be53-](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ed91c373-5e40-4615-be53-9bc553e9ab5a/iec-tr-62095-2003)

[9bc553e9ab5a/iec-tr-62095-2003](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ed91c373-5e40-4615-be53-9bc553e9ab5a/iec-tr-62095-2003)

Figure 8 – Relation entre le pas de temps, la courbe de charge et le temps écoulé depuis le début du transitoire32

Figure 9 – Conditions de pose pour l'étude par éléments finis, exemple 134

Figure 10 – Installation de l'exemple 236

Figure 11 – Isothermes pour l'installation de la Figure 10.....36

Figure 12 – Câbles de forte section posés dans un caniveau à faible profondeur38

Figure A.1 – Coordonnées locales.....42

Figure A.2 – Illustration de l'exemple A152

Figure A.3 – Isotherme 41°C54

Figure A.4 – Illustration de l'exemple 356

Figure A.5 – Illustration de l'exemple 458

Figure A.6 – Configuration du circuit thermique de l'exemple 562

Figure A.7 – Structure du réseau d'éléments finis pour une couche extérieure à un bloc de fourreaux62

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

ITeH STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[IEC TR 62095:2003](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ed91c373-5e40-4615-be53-9be553e9ab5a/iec-tr-62095-2003)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ed91c373-5e40-4615-be53-9be553e9ab5a/iec-tr-62095-2003>

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

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[IEC TR 62095:2003](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ed91c373-5e40-4615-be53-9be553e9ab5a/iec-tr-62095-2003)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/ed91c373-5e40-4615-be53-9be553e9ab5a/iec-tr-62095-2003>

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).

1.2 Champ d'application

Pour les calculs classiques des capacités de transport des câbles, l'équation de conduction de la chaleur est résolue à l'aide de plusieurs hypothèses simplificatrices [1]², ce qui limite le champ d'applicabilité des méthodes analytiques. Quelques exemples suffisent à démontrer ces limites. Pour ce qui est des méthodes analytiques décrites dans la CEI 60287 [2], la CEI 60853-1 [3] et la CEI 60853-2 [4], le cas d'un groupe de câbles est traité en appliquant le principe restreint de superposition. Cela suppose que la présence d'un autre câble, même hors charge, ne perturbe pas le flux de chaleur du premier câble, ni la production de chaleur en son sein. Il est alors possible de mener des calculs séparés pour chaque câble: l'échauffement de chaque câble est la somme algébrique des échauffements qu'il génère lui-même et des échauffements dus aux autres câbles. Cette procédure donne des résultats acceptables lorsque les câbles ne sont pas en contact les uns avec les autres. Dans les cas où cette condition n'est pas réalisée, par exemple lorsque les câbles sont posés jointifs, l'échauffement provoqué par la charge simultanée de tous les câbles doit être prise en considération. La méthode des éléments finis, qui résout directement l'équation de conduction de la chaleur permet une telle possibilité.

Les méthodes numériques permettent également une modélisation plus précise des frontières entre différents milieux, par exemple la prise en compte d'échanges par convection à la surface du sol ou la spécification de flux de chaleur constants sur des surfaces circulaires pour les tuyaux de chaleur ou d'eau à proximité des câbles ou encore une surface isotherme correspondant au niveau de l'eau en fond de tranchée. Ainsi, en cas de non-vérification de l'hypothèse d'une limite isotherme, par exemple pour des câbles posés dans des caniveaux de surface ou enfouis à faible profondeur dans le sol, la méthode des éléments finis est un outil adapté aux besoins de l'analyse thermique.

L'inadaptation des approximations des méthodes analytiques est particulièrement évidente lorsque le milieu entourant le câble est constitué de plusieurs matériaux de résistances thermiques différentes. La Figure 2 en donne un exemple. Il s'agit d'une installation réelle caractérisée non seulement par la diversité des caractéristiques du sol, mais aussi par une limite convective verticale. Cette association de conditions complexes (sol non homogène et limites non isothermes) est aisément prise en compte par la méthode des éléments finis. L'efficacité de cette méthode de calcul est également très satisfaisante: la puissance de traitement des micro-ordinateurs du marché permet de résoudre en quelques minutes des problèmes portant sur des maillages comprenant plusieurs milliers de nœuds.

Il y a un autre avantage à employer la méthode des éléments finis pour l'analyse des transitoires. La démarche analytique appliquée aux transitoires est décrite dans la CEI 60853-1 et la CEI 60853-2: des calculs séparés sont effectués pour les composants internes du câble et pour son environnement. La relation entre les circuits thermiques interne et externe est établie en supposant que le flux de chaleur dans le sol est proportionnel au facteur de réalisation du transfert entre l'âme du câble et sa surface externe. La validité de ces méthodes ne repose pas sur un fondement théorique mais sur la simple concordance, empiriquement constatée, entre les réponses obtenues en utilisant la modélisation thermique recommandée, et les transitoires de température calculés par des méthodes de calcul par ordinateur, plus sophistiquées mais plus précises. La méthode des éléments finis propose, dans ce cas également, une solution qui demande un minimum d'hypothèses simplificatrices.

Il est à noter que les valeurs retenues pour la résistivité thermique du sol et de sa température ont une influence non négligeable sur tous les calculs de capacité de transport ou de température du câble. Dans de nombreux cas, il n'y a rien à gagner à utiliser une méthode de calcul "plus précise", en cas d'absence de données certaines concernant les caractéristiques réelles du sol.

² Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

1.2 Field of application

In classical cable rating calculations, the heat conduction equation is solved under several simplifying assumptions [1]². This limits the field of the applicability of the analytical methods. The limitations of the classical methods will be apparent from a few examples. In the analytical methods described in IEC 60287 [2], IEC 60853-1 [3] and IEC 60853-2 [4], the case of a group of cables is dealt with on the basis of the restricted application of superposition. To apply this principle, it must be assumed that the presence of another cable, even if it is not loaded, does not disturb the heat flux path from the first cable, nor the generation of heat within it. This allows separate computations to be performed for each cable with the final temperature rise being an algebraic sum of the temperature rises due to cable itself and the rise caused by the other cables. Such a procedure is reasonably correct when the cables are separated from each other. When this is not the case, for example for cables in touching formation, the temperature rise caused by simultaneous operation of all cables should be considered. A direct solution of the heat conduction equation employing the finite element method offers such a possibility.

Numerical methods also permit more accurate modelling of the region's boundaries for example, a convective boundary at the earth surface, constant heat flux circular boundaries for heat or water pipes in the vicinity of the cables, or an isothermal boundary at the water level at the bottom of a trench. Thus, when an isothermal boundary cannot be assumed, for example, for cables installed in shallow troughs or directly buried not far from the ground surface, the finite element method provides a suitable tool for the thermal analysis.

Perhaps the most obvious case when the analytical approximations fail is when the medium surrounding the cable is composed of several materials having different thermal resistivities. Figure 2 shows an example of such a situation. This is an actual cable installation where not only were several soil characteristics present, but also, a vertical convective boundary had to be dealt with. The non-uniform soil conditions and non-isothermal boundaries are handled easily by the finite element method. The computational efficiency of this approach is also quite satisfying. With presently available personal computers, calculations involving networks with several thousand nodes can be performed in a matter of minutes.

There are also advantages in using the finite element method in the transient analysis. The analytical approach for transient calculations is described in IEC 60853-1 and IEC 60853-2. In this document, separate computations are performed for the internal and the external parts of the cable. Coupling between internal and external circuits was achieved by assuming that the heat flow into the soil is proportional to the attainment factor of the transient between the conductor and the outer surface of the cable. The validity of the methods did not rest on an analytical proof, but on an empirical agreement of the responses given by the recommended circuits and the temperature transients calculated by more lengthy but more accurate computer-based methods. Here, again, the finite element method offers a solution with minimal simplifying assumptions.

It should be noted that the value selected for the thermal resistivity of the soil, and its temperature, will have a significant influence on any calculated current rating or cable temperature. In many cases there is little to be gained by using a 'more accurate' method of calculation if soil conditions are not known with a degree of certainty.

² Figures between brackets refer to the bibliography.

1.3 Informations obtenues par la méthode des éléments finis

Le problème usuel de la capacité de transport d'un câble est de calculer le courant admissible dans l'âme pour que la température maximale du conducteur ne dépasse pas une valeur spécifiée. Les méthodes numériques peuvent également servir à calculer la répartition de la température tant au sein du câble que dans son environnement, lorsque la chaleur dégagée par le câble est donnée (cela est particulièrement utile quand on a besoin de déterminer le champ de température et certaines isothermes autour du câble). A chaque fois, pour la détermination de la capacité de transport d'un câble, les méthodes numériques demandent une démarche itérative. On se fixe une valeur du courant dans l'âme et on calcule la température correspondante; puis la valeur du courant est ensuite ajustée par itérations successives jusqu'à ce que la température converge vers une valeur spécifiée, avec une certaine plage de tolérance.

Une explication de la méthode des éléments finis est donnée à l'Article 2; les données d'entrée nécessaires sont commentées à l'Article 3, et l'Article 4 présente plusieurs exemples où l'approche par la méthode des éléments finis est recommandée.

1.4 Méthodes alternatives

Bien que ce document se concentre sur l'utilisation des méthodes aux éléments finis pour évaluer la transmission de la chaleur au travers des matériaux entourant les câbles enterrés, d'autres méthodes peuvent être mises en œuvre: les méthodes aux différences finies, les méthodes aux intégrales de frontière ou de superposition, décrites dans Electra 87 [5], ainsi que les approches qui associent une transformation conforme à la méthode aux différences finies.

Les méthodes aux différences finies (MDF) sont souvent employées pour l'étude de la répartition des contraintes électriques dans les jonctions et les extrémités des câbles. Il a été démontré que la MDF est plus appropriée que la MEF pour la résolution des problèmes tridimensionnels, en raison des difficultés qui peuvent se présenter lorsque la MEF modélise en trois dimensions des objets allongés et de faible épaisseur, tels que des câbles. Néanmoins, la méthode MDF est fondée sur l'utilisation d'éléments rectangulaires, ce qui la rend mal adaptée à la modélisation des surfaces courbes.

Les méthodes aux intégrales de frontière sont moins lourdes en terme de définition des données d'entrée, et moins gourmandes en temps de calcul par ordinateur que la méthode des éléments finis, mais ne permettent pas l'analyse des transitoires.

La méthode de superposition, décrite dans Electra 87, pour calculer la réponse transitoire d'un câble unipolaire à un échelon thermique offre un certain nombre d'avantages par rapport à la méthode des éléments finis, notamment les suivants:

- a) elle demande relativement peu de données de modélisation (en général moins de 100 nœuds, par rapport à 1000 nœuds pour la MEF), ce qui la rend plus utile pour l'analyse en temps réel. Le champ unidimensionnel de la température peut être calculé par des méthodes numériquement stables, permettant ainsi l'utilisation de pas de temps relativement importants, sans introduction d'erreurs significatives;
- b) des méthodes approchées peuvent être développées pour prendre en compte deux matériaux différents de remblaiement d'une tranchée;
- c) elle peut être employée comme base du calcul des températures transitoires dans les problèmes en trois dimensions qui se posent dans les chambres de jonction et les systèmes de refroidissement forcé à eau;
- d) elle peut être utilisée pour le calcul de l'échauffement mutuel de câbles qui se croisent;
- e) elle permet de prendre en compte des propriétés des matériaux dépendant de la température, comme la résistance de l'âme, les pertes diélectriques et la résistivité thermique du sol.

1.3 Information obtained from the finite element method

The usual cable rating problem is to compute the permissible conductor current so that the maximum conductor temperature does not exceed a specified value. Numerical methods, on the other hand, are used to compute the temperature distribution within the cable and its surroundings given heat generated within the cable (this is particularly useful when we need to determine the temperature field and specific isotherms around the cable). However, when numerical methods are used to determine cable rating, an iterative approach has to be used for the purpose. This is accomplished by specifying a certain conductor current and calculating the corresponding conductor temperature. Then, the current is adjusted and the calculation repeated until the specified temperature is found convergent within a specified tolerance.

An explanation of the finite element method is given in Clause 2 followed by the discussion of input requirements in Clause 3. In Clause 4, several examples where the application of the finite element approach is advisable are presented.

1.4 Alternative methods

Although this report concentrates on the use of finite element methods for the calculation of heat transfer through the materials surrounding buried cables, other numerical methods are available. These include finite difference methods, boundary element methods, the superposition method described in Electra 87 [5] and the approaches combining conformal transformation and the finite difference method.

Finite difference methods (FDM) are frequently used in the study of electric stress distribution in cable joints and terminations. It has been shown that FDM is more suitable than FEM for three dimensional cable problems. This is because difficulties can arise when using FEM to model long thin objects, such as cables, in three dimensions. However, FDM is intended for use with rectangular elements and hence is not well suited for modelling curved surfaces.

Boundary element methods need less effort in defining the input data and use less computer time than FEM. However, transient analysis cannot be performed using boundary element methods.

The superposition method described in Electra 87 for the calculation of the response of single core cables to a step function thermal transient has a number of advantages over FEM. These include the following:

- a) it requires relatively little modelling data, typically less than 100 nodes compared with 1000 nodes for FEM. The method is therefore more suitable for real time rating systems. The one-dimensional temperature field can be derived using numerically stable methods. Hence, relatively large time steps can be used without introducing significant errors;
- b) approximate methods can be developed to use this approach when two different cable backfills exist;
- c) the method can be used as a basis for calculating transient temperatures for three dimensional problems such as occur in cable joint bays and systems with separate water cooling;
- d) it can be used to calculate mutual heating between crossing cables;
- e) it is suitable for studying the effect of temperature dependant material properties such as conductor resistance, dielectric losses and soil thermal resistivity.