

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Electric cables – Calculation of the current rating –
Part 2-3: Thermal resistance – Cables installed in ventilated tunnels**

**Câbles électriques – Calcul du courant admissible –
Partie 2-3: Résistance thermique – Câbles posés dans les tunnels ventilés**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2017 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, 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 either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, 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'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

65 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: csc@iec.ch.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

Recherche de publications IEC - www.iec.ch/searchpub

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et aussi une fois par mois par email.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

65 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: csc@iec.ch.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Electric cables – Calculation of the current rating –
Part 2-3: Thermal resistance – Cables installed in ventilated tunnels**

**Câbles électriques – Calcul du courant admissible –
Partie 2-3: Résistance thermique – Câbles posés dans les tunnels ventilés**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.060.20

ISBN 978-2-8322-4221-6

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms, definitions and symbols.....	7
3.1 Terms and definitions.....	7
3.2 Symbols.....	7
4 Description of method.....	9
4.1 General description.....	9
4.2 Basic formulae	10
4.2.1 General	10
4.2.2 Radial heat transfer by conduction within the cable	10
4.2.3 Heat transfer by radiation from the cable surface to the inner wall of the tunnel	11
4.2.4 Heat transfer by convection from the cable surface to the air inside the tunnel	11
4.2.5 Heat transfer by convection from the air inside the tunnel to the inner tunnel wall	12
4.2.6 Longitudinal heat transfer by convection resulting from the forced or natural flow of air along the tunnel.....	13
4.2.7 Radial heat conduction in the soil surrounding the tunnel.....	13
4.3 Set of formulae	14
4.4 Solving	14
4.5 Iterative process	15
5 Formulae for air properties	16
6 Temperature profile	16
Annex A (informative) Calculation example	17
A.1 Cable and installation	17
A.2 Calculated values	17
Annex B (informative) Delta-star transformation.....	21
Annex C (informative) Calculation of F_m coefficient	22
C.1 Definition of spacing	22
C.2 Calculation of F_m coefficient.....	22
Bibliography.....	24
Figure A.1 – Temperature profile along a 1 km tunnel	19
Figure A.2 – Temperature profile along a 10 km tunnel	19
Figure B.1 – Delta-star transformation	21
Figure C.1 – Spacing definitions	22
Table 1 – F_m coefficient for radiation thermal resistance calculation	11
Table 2 – Value of parameter K_{CV}	12
Table A.1 – Installation data	17

Table A.2 – Iterative process for a 1 km long tunnel.....	18
Table C.1 – Expression for F_m coefficient calculation	22

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ELECTRIC CABLES – CALCULATION OF THE CURRENT RATING –

Part 2-3: Thermal resistance – Cables installed in ventilated tunnels

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of 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, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as “IEC Publication(s)”). 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. 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 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 IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60287-2-3 has been prepared by IEC technical committee 20: Electric cables.

The text of this International Standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
20/1707/FDIS	20/1720/RVD

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

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

A list of all parts in the IEC 60287 series, published under the general title *Electric cables – Calculation of the current rating*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific document. At this date, the document will be

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

.....

INTRODUCTION

In the IEC 60287 series, IEC 60287-1 provides general formulae for ratings and power losses of electric cables.

IEC 60287-2 presents formulae or calculation methods for thermal resistances.

IEC 60287-2-1 provides calculation methods for dealing with cables installed in free air (see IEC 60287-2-1:2015, 4.2.1).

IEC 60287-2-2 provides a method and data for calculating reduction factors for cables in groups running horizontally in free air.

IEC 60287-2-1 and IEC 60287-2-2 consider heat transfer only in a plane perpendicular to the cables; they assume there is no longitudinal heat transfer.

This part of IEC 60287 deals with the rating for cables installed in ventilated tunnels. In such situations, consideration of longitudinal temperature gradients is involved as the air flowing in the tunnel removes some heat from the cables.

Heat transfer with the moving air is convective and is assumed to be either laminar or turbulent depending on the air velocity. The transition situation between laminar and turbulent air flows is ignored.

A general simplified method is provided to estimate the permissible current-carrying capacity of cables installed in ventilated tunnels, the ventilation being either natural or forced.

Only steady states are considered, where the inlet air temperature and the cable loading are constant for a sufficient time for steady temperatures to be achieved.

Where multiple circuits are involved, their characteristics are assumed to be identical.

The main features of the calculation method for cables in tunnels with forced ventilation can be found in Electra n°143 – 144 (1992)[1]¹, as the report of a CIGRE working group, including the erratum in Electra n°209 (2003).

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

ELECTRIC CABLES – CALCULATION OF THE CURRENT RATING –

Part 2-3: Thermal resistance – Cables installed in ventilated tunnels

1 Scope

This part of IEC 60287 describes a method for calculating the continuous current rating factor for cables of all voltages installed in ventilated tunnels. The method is applicable to any type of cable.

The method applies to natural as well as forced ventilation.

Longitudinal heat transfer within the cables and the surroundings of the tunnel is assumed to be negligible.

All cables are assumed to be identical within the tunnel and it is assumed that the tunnel cross-section does not change with distance along the tunnel.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60287-1-1, *Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General*

IEC 60287-2-1:2015, *Electric cables – Calculation of the current rating – Part 2-1: Thermal resistance – Calculation of thermal resistance*

3 Terms, definitions and symbols

3.1 Terms and definitions

No terms and definitions are listed in this document.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

3.2 Symbols

h	heat dissipation coefficient given in IEC 60287-2-1 for cables in still air	$W/m^2 \cdot K^{5/4}$
n	number of conductors in a cable	-
z	coordinate corresponding to the tunnel axis	m
A_t	inner tunnel cross-sectional area	m^2
C_{av}	heat capacity of the air flow	W/K

C_{vair}	volumetric heat capacity of air	$\text{Ws}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
D_e^*	external diameter of cable	m
D_t	inner diameter of the tunnel	m
F_m	coefficient for the calculation of radiation shape factor	-
I	current in one conductor (r.m.s. value)	A
k_{air}	thermal conductivity for air	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
K_{cv}	convection factor	-
K_r	radiation shape factor	-
K_t	effective emissivity	-
L	length of the tunnel	m
L_t	depth of tunnel axis	m
N	number of cables	-
Pr	Prandtl number	-
R	alternating current resistance of conductor at its maximum operating temperature	Ω/m
Re	Reynolds number	-
T_1	thermal resistance per core between conductor and sheath	$\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$
T_2	thermal resistance between sheath and armour	$\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$
T_3	thermal resistance of external serving	$\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$
T_{4t}	equivalent thermal resistance of cable surrounding	$\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$
T_{as}	convection thermal resistance between cable and air	$\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$
T_{at}	convection thermal resistance between air and inner wall of the tunnel	$\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$
T_{st}	radiation thermal resistance between cable and inner wall of the tunnel	$\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$
T_a	equivalent star thermal resistance of air	$\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$
T_e	external thermal resistance of the tunnel	$\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$
T_s	equivalent star thermal resistance of cable	$\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$
T_t	equivalent star thermal resistance of tunnel wall	$\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$
V	air velocity	m/s
$W_a(z)$	heat removed by the air, at the point z in the cable route	W/m
$W_a(L)$	heat removed by the air, at tunnel outlet	W/m
W_c	losses in a conductor per unit length, assuming maximum conductor temperature	W/m
W_d	dielectric losses per unit length per phase	W/m
W_k	total heat generated by cable	W/m
λ_1	ratio of the total losses in metallic sheaths to the total conductor losses (sheath/screen loss factor)	-
λ_2	ratio of the total losses in armour to the total conductor losses (armour loss factor)	-
ν	kinematic viscosity for air	m^2/s
ρ_{soil}	soil thermal resistivity	$\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$
L_0	reference length (see Formula (16))	m
σ_b	Stefan-Boltzmann constant	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
$\Delta\theta_0$	fictitious increase of ambient temperature to account for the ventilation	K
θ_{max}	maximum permissible conductor temperature	$^{\circ}\text{C}$

$\theta_{at}(z)$	air temperature, at the point z in the cable route	°C
$\theta_{at}(0)$	air temperature at tunnel inlet	°C
$\theta_{at}(L)$	air temperature at tunnel outlet	°C
$\theta(z)$	conductor temperature, at the point z in the cable route	°C
$\theta_e(z)$	temperature at the star point after delta-star transformation	°C
$\theta_s(z)$	temperature of the cable surface, at the point z in the cable route	°C
$\theta_s(L)$	temperature of the cable surface, at tunnel outlet	°C
$\theta_t(z)$	temperature of the inner tunnel wall, at the point z in the cable route	°C
$\theta_t(L)$	temperature of the inner tunnel wall, at tunnel outlet	°C
θ_a	temperature at ground level	°C

4 Description of method

4.1 General description

The method is based on the calculation of the temperature of the cable surface, the air in the tunnel and the tunnel wall, as a function of the heat generated by the cables.

For any location along the cable route, a set of formulae is developed, involving:

- heat transfer formulae describing heat transfer mechanisms by radiation and convection between the cables, the air in the tunnel and the tunnel wall;
- energy balance formulae for cables, air in the tunnel and tunnel wall;
- heat transfer formulae for conduction in the surroundings of the tunnel.

This set of formulae may be written in such a way that:

- the heat removed by the air, $W_a(z)$, is linked to the derivative of the air temperature with respect to the longitudinal coordinate of the tunnel;
- every other formula is approximated as a thermal Ohm's law linking temperature drop and heat flow through a thermal resistance; the heat flow is derived from the heat generated by the cables, W_k , and the heat removed by the air, $W_a(z)$.

Some of the thermal resistances depend on the air temperature and consequently on the distance along the tunnel.

This may be dealt with by dividing the tunnel route into elementary lengths, so that:

- the heat removed by the air is proportional to the difference in the air temperature between elementary length outlet and inlet;
- the thermal resistances may be considered constant for the elementary length.

For typical installations considered in the CIGRE work [1], it was recognized that assuming constant thermal resistances along the tunnel route, computed using temperatures at the tunnel outlet, does not lead to a serious error.

With this assumption, solving the set of formulae is straightforward and the temperatures of the cable surface, air and tunnel wall are easily derived as a function of the cable losses.

The permissible current is then derived from the heat transfer formula for conduction within the cable linking the temperature drop between the conductor and the cable surface to the losses in the cables.

As temperatures at the tunnel outlet are not known, an iterative process is necessary.

The heat generated by a cable, W_k , is assumed to be constant along the cable route and is calculated for the maximum permissible conductor temperature, leading to an estimate of the current rating that is on the safe side.

$$W_k = n \cdot [W_c \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] \quad (1)$$

$$W_c = R \cdot I^2 \quad (2)$$

where

- W_k is the total heat generated by a cable (W/m);
- n is the number of conductors in a cable;
- W_c is the losses in a conductor per unit length, assuming maximum conductor temperature (W/m);
- λ_1 is the ratio of the total losses in metallic sheaths to the total conductor losses;
- λ_2 is the ratio of the total losses in armour to the total conductor losses;
- W_d is the dielectric losses per unit length per phase (W/m);
- R is the alternating current resistance of conductor at its maximum operating temperature (Ω/m);
- I is the current in one conductor (r.m.s. value) (A).

4.2 Basic formulae

4.2.1 General

The following heat transfer mechanisms are taken into account:

- radial heat transfer by conduction within the cable,
- heat transfer by radiation from the cable surface to the tunnel wall,
- heat transfer by convection from the cable surface to the air inside the tunnel,
- heat transfer by convection from the air inside the tunnel to the tunnel wall,
- longitudinal heat transfer by convection resulting from the forced or natural flow of air along the tunnel.

4.2.2 Radial heat transfer by conduction within the cable

The conductor temperature is derived from the formula given in IEC 60287-1-1.

$$\theta(z) = \theta_s(z) + W_c \cdot [T_1 + n \cdot (1 + \lambda_1) \cdot T_2 + n \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot T_3] + W_d \cdot \left[\frac{T_1}{2} + n \cdot (T_2 + T_3) \right] \quad (3)$$

where

- $\theta(z)$ is the conductor temperature, at the point z in the cable route ($^{\circ}\text{C}$);
- $\theta_s(z)$ is the temperature of the cable surface, at the point z in the cable route ($^{\circ}\text{C}$);
- T_1 is the thermal resistance per core between conductor and sheath ($\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$);
- T_2 is the thermal resistance between sheath and armour ($\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$);
- T_3 is the thermal resistance of external serving ($\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$).

The loss coefficients and thermal resistances are defined in IEC 60287-1-1 and IEC 60287-2-1.

4.2.3 Heat transfer by radiation from the cable surface to the inner wall of the tunnel

This heat transfer is modelled by Ohm's thermal law, characterized by a thermal resistance:

$$T_{st} = \frac{1}{\pi \cdot D_e^* \cdot K_t \cdot K_r \cdot \sigma_b \cdot \left[(\theta_s(L) + 273)^2 + (\theta_t(L) + 273)^2 \right]} \cdot \frac{1}{[(\theta_s(L) + 273) + (\theta_t(L) + 273)]} \quad (4)$$

where

D_e^* is the cable diameter (m);

σ_b is Stefan-Boltzmann constant, $5,67 \times 10^{-8}$ (W/m²·K⁴);

$\theta_s(L)$ and $\theta_t(L)$ are the cable surface and tunnel surface temperatures at the tunnel outlet (°C);

K_t is the emissivity of the cable surface (typically 0,9 for served cable);

K_r is the radiation shape factor taking into account the radiation areas.

K_r may be expressed as:

$$K_r = \frac{1 - F_m}{1 - (1 - K_t) \cdot F_m}$$

where

F_m is a coefficient given in Table 1 and in Annex C

Table 1 – F_m coefficient for radiation thermal resistance calculation

Installation	F_m
Single cable	0
Two cables touching	0,182
Two cables spaced $2 \times D_e^*$	0,081
Two cables spaced $3 \times D_e^*$	0,054
Three cables touching	M: 0,363 O: 0,182
Three cables spaced $2 \times D_e^*$	M: 0,163 O: 0,081
Three cables spaced $3 \times D_e^*$	M: 0,107 O: 0,054
Trefoil touching	0,348
Key M: Middle cable O: Outer cable	

4.2.4 Heat transfer by convection from the cable surface to the air inside the tunnel

The convective heat transfer from the cable surface to the air in the tunnel depends on the air flow characteristics, the velocity of the air being the leading parameter.

Where laminar air flow occurs, the convection thermal resistance is given by Formula (5):

$$T_{as} = \frac{1}{\left[\pi \cdot D_e^* \cdot h - \frac{1}{30^{0,25} \cdot T_{st}} \right] \cdot [\theta_s(L) - \theta_{at}(L)]^{0,25}} \quad (5)$$

where

h is the heat dissipation coefficient given in IEC 60287-2-1 for cables in still air ($W/(m^2 \cdot K^{5/4})$);

$\theta_{at}(L)$ is the air temperature at the tunnel outlet ($^{\circ}C$).

Formula (5) applies if the Reynolds number is less than 2 000.

If the Reynolds number is higher, the thermal resistance is first assumed to be given by Formula (6), valid for turbulent air flow.

$$T_{as} = \frac{1}{\pi \cdot k_{air} \cdot K_{cv} \cdot Re^{0,65}} \quad (6)$$

where

Re is the Reynolds number

$$Re = \frac{V \cdot D_e^*}{\nu}$$

ν is the kinematic viscosity for air (m^2/s);

k_{air} is the thermal conductivity for air ($W/(m \cdot K)$);

V is the air velocity (m/s).

K_{cv} is an experimentally determined constant for which values are given in Table 2.

Table 2 – Value of parameter K_{cv}

Cable Arrangement	K_{cv}
Single cable	0,130
3 cables touching horizontally ^b	0,086
3 cables spaced horizontally ^a	0,115
3 cables touching vertically ^b	0,086
3 cables spaced vertically ^a	0,115
3 cables touching in trefoil	0,070
^a to be used where the spacing is larger than $2 \times D_e^*$	
^b to be used where the spacing is smaller or equal to $2 \times D_e^*$	

The values from Formulae (5) and (6) are compared and the higher of the two values is used.

4.2.5 Heat transfer by convection from the air inside the tunnel to the inner tunnel wall

This transfer is modelled by Ohm's thermal law, characterized by a thermal resistance:

If the Reynolds number is greater than 2 500, the air flow is assumed turbulent and the following relationship applies:

$$T_{\text{at}} = \frac{1}{\pi \cdot k_{\text{air}} \cdot 0,023 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4}} \quad (7)$$

where

Re is the Reynolds number

$$\text{Re} = \frac{V \cdot D_t}{\nu}$$

Pr is the Prandtl number

$$\text{Pr} = C_{\text{vair}} \cdot \frac{\nu}{k_{\text{air}}}$$

C_{vair} is the specific heat of air per unit volume (J/(m³·K));

D_t is the inner diameter of the tunnel (m).

If the Reynolds number is less than 2 500, the thermal resistance is considered negligible.

4.2.6 Longitudinal heat transfer by convection resulting from the forced or natural flow of air along the tunnel

The heat removed by the air, $W_a(z)$, is linked to the air temperature variations according to:

$$W_a(z) = C_{\text{av}} \cdot \frac{\partial \theta_{\text{at}}(z)}{\partial z} \quad (8)$$

where

C_{av} is the heat capacity of the air flow (W/K)

$$C_{\text{av}} = C_{\text{vair}} \cdot V \cdot A_t \quad (9)$$

A_t is the inner tunnel cross-sectional area (m²).

4.2.7 Radial heat conduction in the soil surrounding the tunnel

For circular tunnels the thermal resistance of the surrounding soil is expressed by:

$$T_e = \frac{\rho_{\text{soil}}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left[u + \sqrt{u^2 - 1} \right] \quad (10)$$

where

$$u = \frac{2 \cdot L_t}{D_t}$$

ρ_{soil} is the soil thermal resistivity (K·m/W);

L_t is the depth of the tunnel axis (m).

For rectangular tunnels the thermal resistance of the surrounding soil is expressed by:

$$T_e = \frac{\rho_{\text{soil}}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left[3,388 \cdot \frac{L_t}{\sqrt{A_t}} \right] \quad (11)$$

For deep tunnels, these formulae will produce conservative results because of soil thermal inertia. This subject is under consideration.

4.3 Set of formulae

A delta-star transformation is used to derive the following set of formulae:

$$\begin{aligned}
 \theta_s(z) - \theta_e(z) &= T_s \cdot N \cdot W_k \\
 \theta_e(z) - \theta_t(z) &= T_t \cdot (N \cdot W_k - W_a(z)) \\
 \theta_t(z) - \theta_a(z) &= T_e \cdot (N \cdot W_k - W_a(z)) \\
 \theta_{at}(z) - \theta_e(z) &= -T_a \cdot W_a(z) \\
 W_a(z) &= C_{av} \cdot \frac{\partial \theta_{at}(z)}{\partial z}
 \end{aligned} \tag{12}$$

where

z is the coordinate corresponding to the tunnel axis.

where

T_s is the equivalent star thermal resistance of cable;

T_t is equivalent star thermal resistance of tunnel wall;

T_a is the equivalent star thermal resistance of air;

defined as follows:

$$\begin{aligned}
 T_s &= \frac{\left(\frac{T_{st}}{N} \right) \cdot \left(\frac{T_{as}}{N} \right)}{\left(\frac{T_{st}}{N} \right) + \left(\frac{T_{as}}{N} \right) + T_{at}} \\
 T_t &= \frac{T_{at} \cdot \left(\frac{T_{st}}{N} \right)}{\left(\frac{T_{st}}{N} \right) + \left(\frac{T_{as}}{N} \right) + T_{at}} \\
 T_a &= \frac{T_{at} \cdot \left(\frac{T_{as}}{N} \right)}{\left(\frac{T_{st}}{N} \right) + \left(\frac{T_{as}}{N} \right) + T_{at}}
 \end{aligned} \tag{13}$$

The delta-star transformation is shown diagrammatically in Annex B.

4.4 Solving

The permissible current rating is obtained from Formula (14) which is similar to the classical formula for cable rating given in IEC 60287-1-1:

$$I = \left[\frac{\theta_{\max} - [\theta_a + \Delta\theta_0] - W_d \cdot \left[\frac{T_1}{2} + n \cdot (T_2 + T_3 + T_{4t}) \right]}{R \cdot [T_1 + n \cdot (1 + \lambda_1) \cdot T_2 + n \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (T_3 + T_{4t})]} \right]^{1/2} \quad (14)$$

where

$\Delta\theta_0$ is the fictitious increase of ambient temperature to account for the ventilation (K);

$$\Delta\theta_0 = [\theta_{at}(0) - \theta_a] \cdot \frac{T_t + T_e}{T_a + T_t + T_e} \cdot e^{-L/L_0} \quad (15)$$

T_{4t} is the equivalent thermal resistance of cable surrounding (K·m/W);

$$T_{4t} = N \cdot \left[T_s + (T_t + T_e) \cdot \left(1 - \frac{T_t + T_e}{T_a + T_t + T_e} \cdot e^{-L/L_0} \right) \right] \quad (16)$$

L_0 is the reference length (m);

$$L_0 = (T_a + T_t + T_e) \cdot C_{av} \quad (17)$$

$\theta_{\max}$ is the maximum permissible conductor temperature (°C).

The air temperature $\theta_{at}(L)$ at the tunnel outlet is estimated from:

$$\theta_{at}(L) = \theta_{at}(0) + [\theta_a + (T_t + T_e) \cdot N \cdot W_k - \theta_{at}(0)] \cdot \left[1 - e^{-\frac{L}{L_0}} \right] \quad (18)$$

The cable surface temperature and the tunnel wall temperature at the tunnel outlet are derived from the air temperature by:

$$\theta_s(L) = \theta_{at}(L) + T_a \cdot W_a(L) + T_s \cdot N \cdot W_k \quad (19)$$

$$\theta_t(L) = \theta_{at}(L) + T_a \cdot W_a(L) - T_t \cdot [N \cdot W_k - W_a(L)] \quad (20)$$

where

$W_a(L)$ is the heat removed by the air at the tunnel outlet, given by:

$$W_a(L) = \frac{(T_t + T_e) \cdot N \cdot W_k - [\theta_{at}(L) - \theta_a]}{T_a + T_t + T_e} \quad (21)$$

4.5 Iterative process

The thermal resistances T_a , T_s and T_t are calculated from estimates of the cable surface temperature, the tunnel wall temperature and the air temperature at the tunnel outlet, using Formulae (4), (5) or (6), (7) and (13).

The cable permissible current is derived from Formulae (14) through (15), (16), (17), T_e being derived from Formulae (10) and (11) and C_{av} being derived from Formula (9).

Losses in the cables are calculated with Formulae (1) and (2).

The air temperature at the tunnel outlet is calculated with Formula (18), the cable surface temperature and the tunnel wall temperature are calculated with Formulae (19) and (20), using Formula (21).

The calculation is repeated using these new estimates of the cable surface temperature, the tunnel wall temperature and the air temperature at the tunnel outlet as input, until convergence.

As first estimates, the temperatures at the tunnel outlet are taken as the air temperature at the tunnel inlet.

5 Formulae for air properties

Formulae (22) to (25) provide the properties needed for air at the appropriate temperature:

Thermal conductivity for air

$$k_{\text{air}} = 2,42 \cdot 10^{-2} + 7,2 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_{\text{at}}(\text{L}) \quad (22)$$

Kinematic viscosity for air

$$\nu = 1,32 \cdot 10^{-5} + 9,5 \cdot 10^{-8} \cdot \theta_{\text{at}}(\text{L}) \quad (23)$$

Prandtl number for air

$$\text{Pr} = 0,715 - 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot \theta_{\text{at}}(\text{L}) \quad (24)$$

The volumetric heat capacity of air, C_{vair} , being derived from Pr, k_{air} and ν .

$$C_{\text{vair}} = \text{Pr} \cdot \frac{k_{\text{air}}}{\nu} \quad (25)$$

6 Temperature profile

Formula (26) gives the air temperature $\theta_{\text{at}}(z)$ in any location z along the tunnel.

$$\theta_{\text{at}}(z) = \theta_{\text{at}}(0) + [\theta_{\text{a}} + (T_{\text{t}} + T_{\text{e}}) \cdot N \cdot W_{\text{k}} - \theta_{\text{at}}(0)] \cdot \left[1 - e^{-\frac{z}{L_0}} \right] \quad (26)$$

where

W_{k} , T_{t} , T_{e} and L_0 have been determined according to Clause 4.

Annex A (informative)

Calculation example

A.1 Cable and installation

The example given in Table A.1 considers 3 single-core cables without armour ($T_2 = 0$ and $\lambda_2 = 0$) spaced vertically within a circular ventilated tunnel (the spacing between the cables being three times their diameter).

Table A.1 – Installation data

Cables	Symbol	Value	Unit
Number of cables	N	3	-
Number of conductors in a cable	n	1	-
Cable outer diameter	D_e^*	0,122	m
Alternating current resistance of conductor at its maximum operating temperature	R	1,28E-05	Ω/m
Dielectric losses per unit length per phase	W_d	4,0	W/m
Sheath/screen loss factor	λ_1	0,045 03	-
Maximum permissible conductor temperature	$\theta_{\max}$	90	$^{\circ}\text{C}$
Thermal resistance per core between conductor and sheath	T_1	0,341	$\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$
Thermal resistance of external serving	T_3	0,038	$\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$
Tunnel and surroundings			
Soil thermal resistivity	ρ_{soil}	1,0	$\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$
Depth of tunnel axis	L_t	4,0	m
Inner tunnel diameter	D_t	3,0	m
Length of the tunnel	L	1 000	m
Temperature at ground level	θ_a	20	$^{\circ}\text{C}$
Air temperature at tunnel inlet	$\theta_{\text{at}}(0)$	20	$^{\circ}\text{C}$
Air velocity	V	2	m/s
Constants			
Convection factor	K_{cv}	0,115	-
Radiation shape factor	K_r	0,90	-
Effective emissivity	K_t	0,90	-

A.2 Calculated values

The number of significant figures given in Table A.2 does not indicate the accuracy of the calculations but is intended to assist those developing a calculation tool.

Table A.2 – Iterative process for a 1 km long tunnel

Iteration	Formula	1	2	3
assumed $\theta_s(L)$		20	52,11	52,15
assumed $\theta_t(L)$		20	36,83	37,89
assumed $\theta_{at}(L)$		20	36,49	37,30
T_e	10	0,261	0,261	0,261
T_{st}	4	0,564 6	0,443 6	0,441 3
k_{air}	22	0,026	0,027	0,027
ν	23	$1,51 \times 10^{-5}$	$1,666\ 65 \times 10^{-5}$	$1,674\ 34 \times 10^{-5}$
Re	6	16 159	14 640	14 573
T_{as}	6	0,198 5	0,202 3	0,202 5
Pr	24	0,710 0	0,705 9	0,705 7
Re	7	397 351	360 003	358 351
T_{at}	7	0,020 5	0,021 3	0,021 3
T_s	13	0,045 3	0,042 1	0,042 1
T_t	13	0,014 1	0,013 3	0,013 3
T_a	13	0,004 9	0,006 1	0,006 1
C_{vair}	25	1 206	1 136	1 133
C_{av}	9	17 044	16 063	16 019
L_0	17	4 764	4 496	4 484
$\Delta\theta_0$	15	0	0	0
T_{4t}	16	0,303 7	0,304 5	0,304 8
I	14	2 758	2 756	2 755
W_c	2	97,3	97,2	97,2
W_k	1	105,7	105,6	105,6
$\theta_{at}(L)$	18	36,49	37,30	37,33
$W_a(L)$	21	252,58	248,11	247,84
$\theta_s(L)$	19	52,11	52,15	52,17
$\theta_t(L)$	20	36,83	37,89	37,93

The temperature profile along the 1 km length of the tunnel is given in Figure A.1.

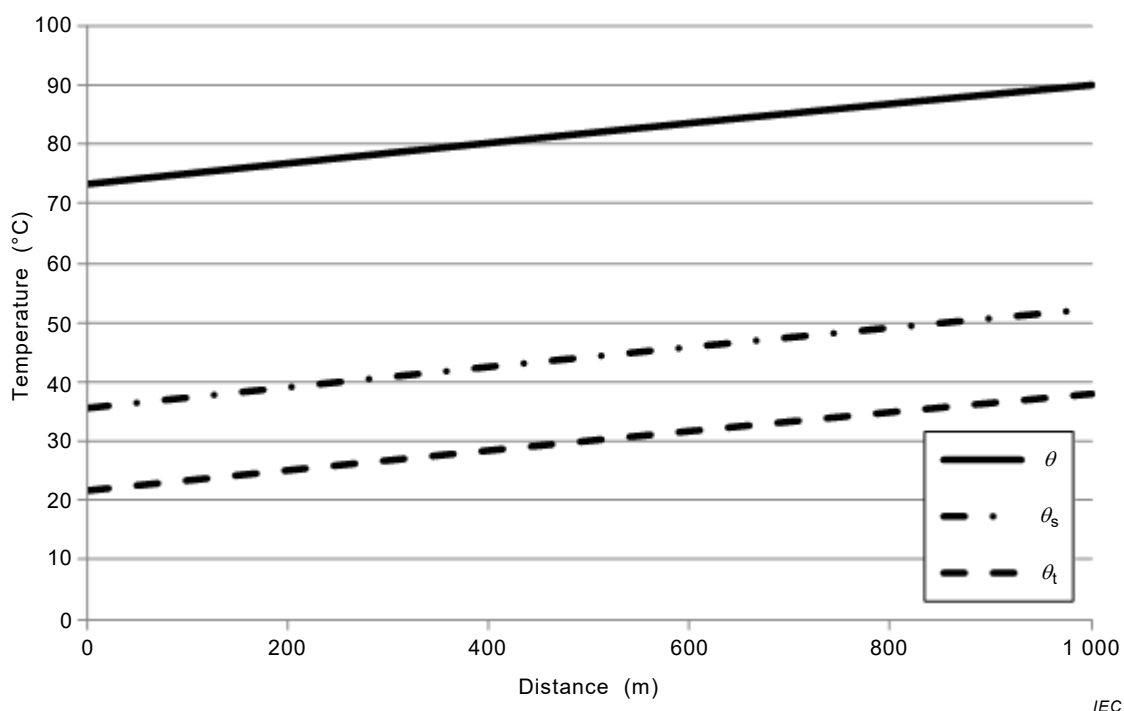


Figure A.1 – Temperature profile along a 1 km tunnel

In the example given in Figure A.1 the thermal properties of the air have been determined for the calculated air temperature in the tunnel at each stage in the iteration. If the air thermal properties were determined at a temperature of 30 °C, the current rating would be 2 764 A, compared to 2 755 A calculated above.

Repeating the calculation using the same data, except for a tunnel length of 10 000 m, results in a current rating of 1 999 A. The temperature profile along the 10 km tunnel is shown in Figure A.2.

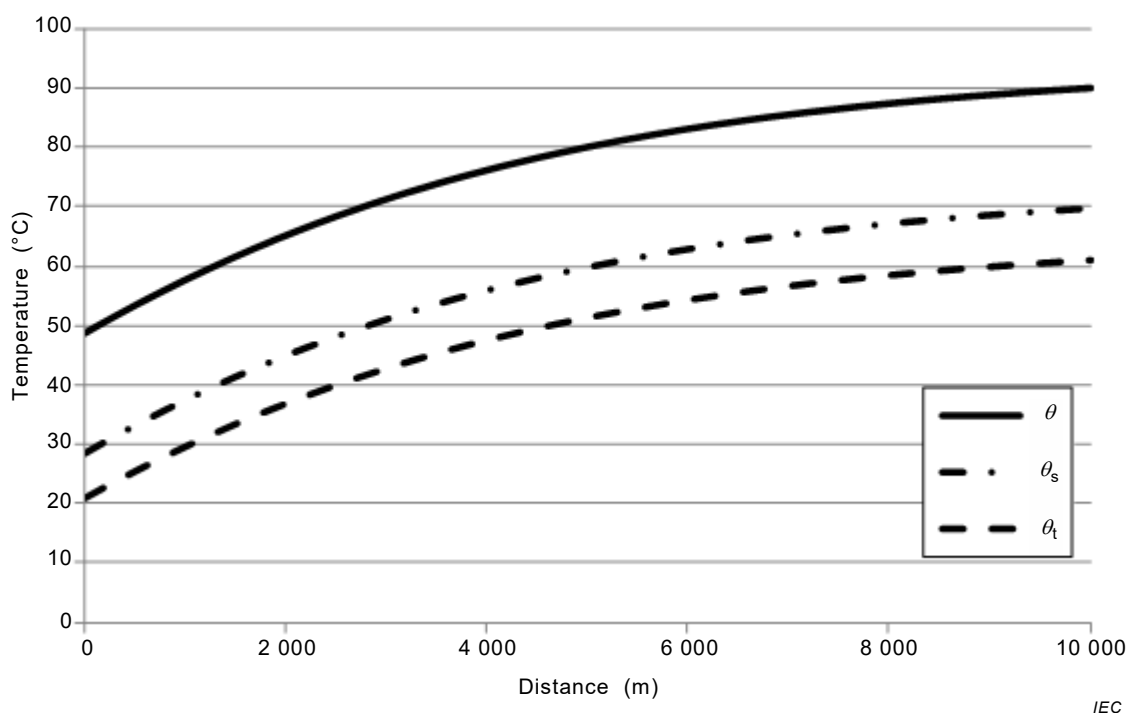


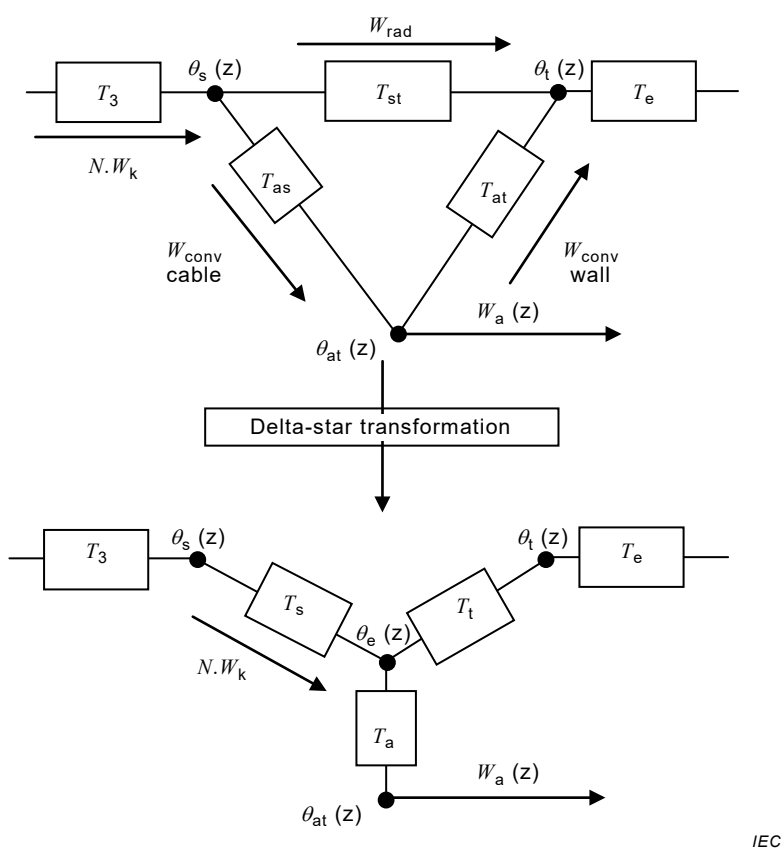
Figure A.2 – Temperature profile along a 10 km tunnel

If the air thermal properties are determined for a temperature of 30 °C, the permissible current is found to be 2 018 A, instead of 1 999 A. This difference is considered to be insignificant.

Annex B (informative)

Delta-star transformation

The heat transfer mechanism in the tunnel and the delta-star given in 4.3 is shown in Figure B.1.



IEC

Figure B.1 – Delta-star transformation

Annex C (informative)

Calculation of F_m coefficient

C.1 Definition of spacing

The spacing between cables is defined as the distance between cables axis (see Figure C.1).

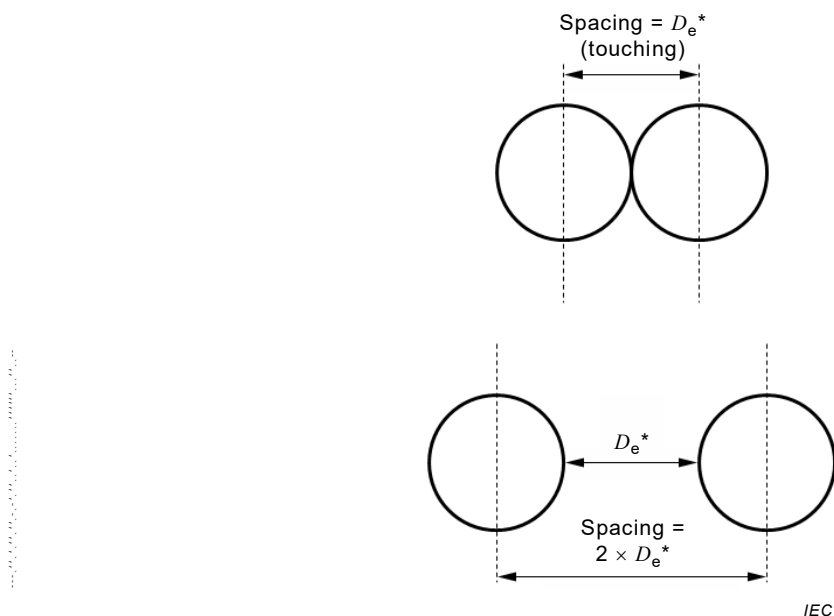


Figure C.1 – Spacing definitions

C.2 Calculation of F_m coefficient

The coefficient F_m can be calculated with expressions given in Table C.1.

Table C.1 – Expression for F_m coefficient calculation

Two cables		$F_m = \frac{1}{\pi} \left[\arcsin\left(\frac{1}{s}\right) + (s^2 - 1)^{0,5} - s \right]$
Three cables	Middle cable	$F_m = \frac{2}{\pi} \left[\arcsin\left(\frac{1}{s}\right) + (s^2 - 1)^{0,5} - s \right]$
	Outer cables	$F_m = \frac{1}{\pi} \left[\arcsin\left(\frac{1}{s}\right) + (s^2 - 1)^{0,5} - s \right]$
Trefoil touching		$F_m = \frac{1}{6} + \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right)$

where

s is the ratio between spacing and cable diameter.

$$s = \frac{\text{Spacing}}{D_e^*}$$

Bibliography

- [1] Electra n°143 – 144 (1992), *CIGRE (International Council on Large Electric Systems)*, [including Erratum published in Electra n°209 (2003)]
-

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	28
INTRODUCTION.....	30
1 Domaine d'application	31
2 Références normatives	31
3 Termes, définitions et symboles.....	31
3.1 Termes et définitions	31
3.2 Symboles	31
4 Description de méthode	33
4.1 Description générale	33
4.2 Formules de base	34
4.2.1 Généralités	34
4.2.2 Transfert de chaleur radial par conduction à l'intérieur du câble.....	35
4.2.3 Transfert de chaleur par rayonnement de la surface du câble à la paroi intérieure du tunnel.....	35
4.2.4 Transfert de chaleur par convection de la surface du câble à l'air à l'intérieur du tunnel	36
4.2.5 Transfert de chaleur par convection de l'air à l'intérieur du tunnel à la paroi intérieure du tunnel.....	37
4.2.6 Transfert de chaleur longitudinal par convection résultant du débit d'air forcé ou naturel le long du tunnel.....	38
4.2.7 Conduction de chaleur radiale dans le sol entourant le tunnel.....	38
4.3 Système de formules	38
4.4 Résolution	39
4.5 Processus itératif	40
5 Formules relatives aux propriétés de l'air.....	41
6 Profil de température	41
Annexe A (informative) Exemple de calcul	42
A.1 Câble et installation	42
A.2 Valeurs calculées.....	42
Annexe B (informative) Transformation triangle-étoile	46
Annexe C (informative) Calcul du coefficient F_m	47
C.1 Définition de l'espacement	47
C.2 Calcul du coefficient F_m	47
Bibliographie.....	49
 Figure A.1 – Profil de la température le long d'un tunnel de 1 km	44
Figure A.2 – Profil de la température le long d'un tunnel de 10 km	44
Figure B.1 – Transformation triangle-étoile	46
Figure C.1 – Définitions de l'espacement	47
 Tableau 1 – Coefficient F_m pour le calcul de la résistance thermique de rayonnement	36
Tableau 2 – Valeur du paramètre K_{cv}	37
Tableau A.1 – Données d'installation	42

Tableau A.2 – Processus itératif pour un tunnel d'une longueur de 1 km.....	43
Tableau C.1 – Expression pour le calcul du coefficient F_m	47

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CÂBLES ÉLECTRIQUES – CALCUL DU COURANT ADMISSIBLE –

Partie 2-3: Résistance thermique – Câbles posés dans les tunnels ventilés

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC 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, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). 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 l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC 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 l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 60287-2-3 a été établie par le comité d'études 20 de l'IEC: Câbles électriques.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
20/1707/FDIS	20/1720/RVD

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

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60287, publiées sous le titre général: *Câbles électriques – calcul du courant admissible*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives au document recherché. A cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

INTRODUCTION

Dans la série IEC 60287, IEC 60287-1 fournit des formules générales pour le calcul du courant admissible et les pertes des câbles électriques.

L'IEC 60287-2 présente des formules ou des méthodes de calcul pour les résistances thermiques.

L'IEC 60287-2-1 fournit des méthodes de calcul pour traiter les câbles installés à l'air libre (voir l'IEC 60287-2-1:2015, 4.2.1).

L'IEC 60287-2-2 fournit une méthode et des données pour le calcul des facteurs de réduction pour les câbles en groupes s'étendant horizontalement à l'air libre.

L'IEC 60287-2-1 et l'IEC 60287-2-2 considèrent le transfert de chaleur uniquement dans un plan perpendiculaire aux câbles et supposent qu'il n'y a pas de transfert de chaleur longitudinal.

La présente partie de l'IEC 60287 traite du calcul du courant admissible des câbles installés dans des tunnels ventilés. Dans de tels cas, la considération des gradients de température longitudinaux est impliquée puisque l'air circulant dans le tunnel enlève de la chaleur des câbles.

Le transfert de chaleur avec l'air en mouvement est un transfert par convection et est supposé être soit laminaire soit turbulent en fonction de la vitesse de l'air. Le cas de transition entre les débits d'air laminaire et turbulent est négligé.

Une méthode générale simplifiée est fournie pour évaluer l'intensité de courant admissible des câbles installés dans des tunnels ventilés, la ventilation étant soit naturelle soit forcée.

Seuls les états stationnaires sont pris en compte, où la température d'air d'entrée et la charge de câble sont des constantes pendant un temps suffisant pour atteindre des températures stationnaires.

Lorsque plusieurs circuits sont impliqués, leurs caractéristiques sont supposées être identiques.

Les principales caractéristiques de la méthode de calcul pour les câbles dans des tunnels à ventilation forcée peuvent être consultées dans Electra n°143 – 144 (1992)[1]¹ en tant que rapport d'un groupe de travail du CIGRE (Comité International des Grands Réseaux Électriques) ainsi que dans Electra n°209 (2003) au niveau de l'erratum.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

CÂBLES ÉLECTRIQUES – CALCUL DU COURANT ADMISSIBLE –

Partie 2-3: Résistance thermique – Câbles posés dans les tunnels ventilés

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60287 décrit une méthode de calcul du facteur de courant admissible continu pour les câbles de toutes tensions, installés dans des tunnels ventilés. La méthode est applicable à tout type de câble.

La méthode s'applique aussi bien à la ventilation naturelle qu'à la ventilation forcée.

Le transfert de chaleur longitudinal dans les câbles et les alentours du tunnel est supposé être négligeable.

Tous les câbles sont supposés être identiques à l'intérieur du tunnel et il est supposé que la section transversale du tunnel ne change pas avec la distance le long du tunnel.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60287-1-1, *Câbles électriques – Calcul du courant admissible – Partie 1-1: Équations de l'intensité du courant admissible (facteur de charge 100 %) et calcul des pertes – Généralités*

IEC 60287-2-1:2015, *Câbles électriques – Calcul du courant admissible – Partie 2-1: Résistance thermique – Calcul de la résistance thermique*

3 Termes, définitions et symboles

3.1 Termes et définitions

Aucun terme n'est défini dans le présent document.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

3.2 Symboles

h	coefficient de dissipation de chaleur donné dans l'IEC 60287-2-1 pour $W/m^2 \cdot K^{5/4}$ câbles en air immobile	
n	nombre d'âmes dans un câble	-
z	coordonnée correspondante à l'axe du tunnel	m
A_t	section transversale intérieure du tunnel	m^2

C_{av}	chaleur spécifique du débit d'air	W/K
C_{vair}	capacité calorifique volumique de l'air	Ws/(m ³ ·K)
D_e^*	diamètre externe du câble	m
D_t	diamètre intérieur du tunnel	m
F_m	coefficient pour le calcul du facteur de forme de rayonnement	-
I	intensité du courant dans une âme (valeur efficace)	A
k_{air}	conductivité thermique pour air	W/m·K
K_{cv}	facteur de convection	-
K_r	facteur de forme du rayonnement	-
K_t	émissivité efficace	-
L	longueur du tunnel	m
L_t	profondeur de l'axe du tunnel	m
N	nombre de câbles	-
Pr	nombre de Prandtl	-
R	résistance électrique de l'âme en courant alternatif à sa température de service maximale	Ω/m
Re	nombre de Reynolds	-
T_1	résistance thermique par phase entre âme et gaine	K·m/W
T_2	résistance thermique entre gaine et armure	K·m/W
T_3	résistance thermique du revêtement externe	K·m/W
T_{4t}	résistance thermique équivalente des alentours du câble	K·m/W
T_{as}	résistance thermique par convection entre le câble et l'air	K·m/W
T_{at}	résistance thermique par convection entre l'air et la paroi intérieure du tunnel	K·m/W
T_{st}	résistance thermique du rayonnement entre le câble et la paroi intérieure du tunnel	K·m/W
T_a	résistance thermique équivalente en étoile de l'air	K·m/W
T_e	résistance thermique externe du tunnel	K·m/W
T_s	résistance thermique équivalente en étoile du câble	K·m/W
T_t	résistance thermique équivalente en étoile de la paroi du tunnel	K·m/W
V	vitesse de l'air	m/s
$W_a(z)$	chaleur évacuée par l'air, au point z dans le cheminement du câble	W/m
$W_a(L)$	chaleur évacuée par l'air, à la sortie du tunnel	W/m
W_c	pertes dans une âme par unité de longueur, en supposant la température de l'âme maximale	W/m
W_d	pertes diélectriques par unité de longueur et par phase	W/m
W_k	chaleur totale produite par le câble	W/m
λ_1	rapport entre les pertes totales dans les gaines métalliques et les pertes totales de l'âme (facteur de perte gaine/écran)	-
λ_2	rapport entre les pertes totales dans l'armure et les pertes totales de l'âme (facteur de perte de l'armure)	-
ν	viscosité cinématique pour l'air	m ² /s
ρ_{soil}	résistivité thermique du sol	K·m/W
L_0	longueur de référence (voir Formule (16))	m

σ_b	constante de Stefan-Boltzmann	W/(m ² ·K ⁴)
$\Delta\theta_0$	augmentation fictive de la température ambiante à tenir compte pour la ventilation	K
$\theta_{\max}$	température maximale de l'âme admissible	°C
$\theta_{at}(z)$	température de l'air, au point z dans le cheminement du câble	°C
$\theta_{at}(0)$	température de l'air à l'entrée du tunnel	°C
$\theta_{at}(L)$	température de l'air à la sortie du tunnel	°C
$\theta(z)$	température de l'âme, au point z dans le cheminement du câble	°C
$\theta_e(z)$	température au point étoile après une transformation triangle-étoile	°C
$\theta_s(z)$	température de la surface du câble, au point z dans le cheminement du câble	°C
$\theta_s(L)$	température de la surface du câble, à la sortie du tunnel	°C
$\theta_t(z)$	température de la paroi intérieure du tunnel, au point z dans le cheminement du câble	°C
$\theta_t(L)$	température de la paroi intérieure du tunnel, à la sortie du tunnel	°C
θ_a	température au niveau du sol	°C

4 Description de méthode

4.1 Description générale

La méthode est basée sur le calcul de la température de la surface du câble, de l'air dans le tunnel et de la paroi du tunnel, en fonction de la chaleur produite par les câbles.

Pour tout emplacement le long du cheminement de câble, un système de formules est développé, comportant:

- les formules de transfert de chaleur décrivant les mécanismes de transfert de chaleur par rayonnement et par convection entre les câbles, l'air dans le tunnel et la paroi du tunnel;
- les formules de bilan énergétique pour les câbles, l'air dans le tunnel et la paroi du tunnel;
- les formules de transfert de chaleur pour conduction dans les alentours du tunnel.

Ce système de formules peut être écrit de telle manière que:

- la chaleur évacuée par l'air, $W_a(z)$, est liée à la dérivée de la température de l'air par rapport à la coordonnée longitudinale du tunnel;
- toute autre formule est approchée comme une loi d'Ohm thermique reliant la chute de température et le flux thermique à travers une résistance thermique. Le flux de chaleur est dérivé de la chaleur produite par les câbles, W_k , et la chaleur évacuée par l'air, $W_a(z)$.

Certaines des résistances thermiques dépendent de la température de l'air et par conséquent de la distance le long du tunnel.

Cela peut être traité en divisant la route du tunnel en des longueurs élémentaires, de telle sorte que:

- la chaleur évacuée par l'air est proportionnelle à la différence en termes de température de l'air entre la longueur élémentaire à la sortie et la longueur élémentaire à l'entrée;
- les résistances thermiques peuvent être considérées comme constantes pour la longueur élémentaire.

Pour les installations typiques prises en compte dans le travail du CIGRE [1], il a été reconnu que l'hypothèse que les résistances thermiques le long de la route du tunnel soient constantes, calculées à l'aide des températures au niveau de la sortie du tunnel, ne conduit pas à une erreur grave.

Avec cette hypothèse, la résolution du système de formules est simple et les températures de la surface du câble, de l'air et de la paroi du tunnel sont facilement dérivées en fonction des pertes du câble.

Le courant admissible est alors dérivé de la formule de transfert de chaleur relative à la conduction dans le câble, reliant la chute de température entre l'âme et la surface du câble aux pertes dans les câbles.

Vu que les températures à la sortie du tunnel ne sont pas connues, un processus itératif est nécessaire.

La chaleur produite par un câble, W_k , est supposée être constante le long du cheminement du câble et est calculée pour la température maximale admissible de l'âme, ce qui conduit à une estimation du courant admissible qui se trouve sur le côté sain.

$$W_k = n \cdot [W_c \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] \quad (1)$$

$$W_c = R \cdot I^2 \quad (2)$$

où

W_k est la chaleur totale produite par un câble (W/m);

n est le nombre d'âmes dans un câble;

W_c représente les pertes dans une âme par unité de longueur, en supposant la température maximale de l'âme (W/m);

λ_1 est le rapport entre les pertes totales dans les gaines métalliques et les pertes totales de l'âme;

λ_2 est le rapport entre les pertes totales dans l'armure et les pertes totales de l'âme;

W_d représente les pertes diélectriques par unité de longueur et par phase (W/m);

R est la résistance de l'âme en courant alternatif à sa température maximale de service (Ω/m);

I est l'intensité du courant dans une âme (valeur efficace) (A).

4.2 Formules de base

4.2.1 Généralités

Les mécanismes suivants de transfert de chaleur sont pris en compte:

- transfert de chaleur radial par conduction à l'intérieur du câble,
- transfert de chaleur par rayonnement de la surface du câble à la paroi du tunnel,
- transfert de chaleur par convection de la surface du câble à l'air à l'intérieur du tunnel,
- transfert de chaleur par convection de l'air à l'intérieur du tunnel à la paroi du tunnel,
- transfert de chaleur longitudinal par convection résultant du débit d'air forcé ou naturel le long du tunnel.

4.2.2 Transfert de chaleur radial par conduction à l'intérieur du câble

La température de l'âme est dérivée de la formule donnée dans l'IEC 60287-1-1.

$$\theta(z) = \theta_s(z) + W_c \cdot [T_1 + n \cdot (1 + \lambda_1) \cdot T_2 + n \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot T_3] + W_d \cdot \left[\frac{T_1}{2} + n \cdot (T_2 + T_3) \right] \quad (3)$$

où

$\theta(z)$ est la température de l'âme, au point z dans le cheminement du câble (°C);

$\theta_s(z)$ est la température de la surface du câble, au point z dans le cheminement du câble (°C);

T_1 est la résistance thermique par phase entre âme et gaine (K·m/W);

T_2 est la résistance thermique entre gaine et armure (K·m/W);

T_3 est la résistance thermique du revêtement (K·m/W).

Les coefficients de pertes et les résistances thermiques sont définis dans l'IEC 60287-1-1 et l'IEC 60287-2-1.

4.2.3 Transfert de chaleur par rayonnement de la surface du câble à la paroi intérieure du tunnel

Ce transfert de chaleur est modélisé par la loi d'Ohm thermique, caractérisée par une résistance thermique:

$$T_{st} = \frac{1}{\pi \cdot D_e^* \cdot K_t \cdot K_r \cdot \sigma_b \cdot \left[(\theta_s(L) + 273)^2 + (\theta_t(L) + 273)^2 \right]} \cdot \frac{1}{[(\theta_s(L) + 273) + (\theta_t(L) + 273)]} \quad (4)$$

où

D_e^* est le diamètre du câble (m);

σ_b est la constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8}$ (W/m²·K⁴);

$\theta_s(L)$ et $\theta_t(L)$ sont les températures de la surface du câble et de la surface du tunnel à la sortie du tunnel (°C);

K_t est l'émissivité de la surface du câble (typiquement 0,9 pour câble enroulé);

K_r est le facteur de forme de rayonnement en tenant compte des zones de rayonnement.

K_r peut être exprimé comme suit:

$$K_r = \frac{1 - F_m}{1 - (1 - K_t) \cdot F_m}$$

où

F_m est un coefficient donné dans le Tableau 1 et à l'Annexe C.

Tableau 1 – Coefficient F_m pour le calcul de la résistance thermique de rayonnement

Installation	F_m
Un seul câble	0
Deux câbles jointifs	0,182
Deux câbles espacés $2 \times D_e^*$	0,081
Deux câbles espacés $3 \times D_e^*$	0,054
Trois câbles jointifs	M: 0,363 O: 0,182
Trois câbles espacés $2 \times D_e^*$	M: 0,163 O: 0,081
Trois câbles espacés $3 \times D_e^*$	M: 0,107 O: 0,054
Trèfle jointif	0,348
Légende M: Câble intermédiaire O: Câble extérieur	

4.2.4 Transfert de chaleur par convection de la surface du câble à l'air à l'intérieur du tunnel

Le transfert de chaleur par convection de la surface du câble à l'air dans le tunnel dépend des caractéristiques du débit d'air, la vitesse de l'air étant le paramètre de premier plan.

Lorsqu'un débit d'air laminaire se produit, la résistance thermique par convection est donnée par la Formule (5):

$$T_{as} = \frac{1}{\left[\pi \cdot D_e^* \cdot h - \frac{1}{30^{0,25} \cdot T_{st}} \right] \cdot [\theta_s(L) - \theta_{at}(L)]^{0,25}} \quad (5)$$

où

h est le coefficient de dissipation de la chaleur indiqué dans l'IEC 60287-2-1 pour câbles en air stable ($W/(m^2 \cdot K^{5/4})$);

$\theta_{at}(L)$ est la température de l'air à la sortie du tunnel ($^{\circ}C$).

La Formule (5) s'applique si le nombre de Reynolds est inférieur à 2 000.

Si le nombre de Reynolds est supérieur, la résistance thermique est d'abord supposée être donnée par la Formule (6), valable pour un débit d'air turbulent.

$$T_{as} = \frac{1}{\pi \cdot k_{air} \cdot K_{cv} \cdot Re^{0,65}} \quad (6)$$

où

Re est le nombre de Reynolds

$$Re = \frac{V \cdot D_e^*}{\nu}$$

ν est la viscosité cinématique pour l'air (m²/s);

k_{air} est la conductivité thermique pour l'air (W/(m·K));

V est la vitesse de l'air (m/s).

K_{cv} est une constante déterminée expérimentalement pour laquelle les valeurs sont données dans le Tableau 2.

Tableau 2 – Valeur du paramètre K_{cv}

Montage des câbles	K_{cv}
Un seul câble	0,130
3 câbles jointifs horizontalement ^b	0,086
3 câbles espacés horizontalement ^a	0,115
3 câbles jointifs verticalement ^b	0,086
3 câbles espacés verticalement ^a	0,115
3 câbles jointifs en trèfle	0,070
^a A utiliser lorsque l'espacement est supérieur à $2 \times D_e^*$	
^b A utiliser lorsque l'espacement est inférieur ou égal à $2 \times D_e^*$	

Les valeurs des Formules (5) et (6) sont comparées, et la plus élevée des deux valeurs est utilisée.

4.2.5 Transfert de chaleur par convection de l'air à l'intérieur du tunnel à la paroi intérieure du tunnel

Ce transfert est modélisé par la loi d'Ohm thermique, caractérisée par une résistance thermique:

Si le nombre de Reynolds est supérieur à 2 500, le débit d'air est supposé être turbulent et la relation suivante s'applique:

$$T_{at} = \frac{1}{\pi \cdot k_{air} \cdot 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}} \quad (7)$$

où

Re est le nombre de Reynolds

$$Re = \frac{V \cdot D_t}{\nu}$$

Pr est le nombre de Prandtl

$$Pr = C_{vair} \cdot \frac{\nu}{k_{air}}$$

C_{vair} est la chaleur spécifique de l'air par unité de volume (J/(m³·K));

D_t est le diamètre intérieur du tunnel (m).

Si le nombre de Reynolds est inférieur à 2 500, la résistance thermique est considérée négligeable.

4.2.6 Transfert de chaleur longitudinal par convection résultant du débit d'air forcé ou naturel le long du tunnel

La chaleur évacuée par l'air, $W_a(z)$, est liée aux variations de la température de l'air selon:

$$W_a(z) = C_{av} \cdot \frac{\partial \theta_{at}(z)}{\partial z} \quad (8)$$

où

C_{av} est la capacité calorifique du débit d'air (W/K)

$$C_{av} = C_{vair} \cdot V \cdot A_t \quad (9)$$

A_t est la section transversale intérieure du tunnel (m^2).

4.2.7 Conduction de chaleur radiale dans le sol entourant le tunnel

Pour les tunnels circulaires, la résistance thermique du sol environnant est exprimée par:

$$T_e = \frac{\rho_{soil}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left[u + \sqrt{u^2 - 1} \right] \quad (10)$$

où

$$u = \frac{2 \cdot L_t}{D_t}$$

ρ_{soil} est la résistivité thermique du sol (K·m/W);

L_t est la profondeur de l'axe du tunnel (m).

Pour les tunnels rectangulaires, la résistance thermique du sol environnant est exprimée par:

$$T_e = \frac{\rho_{soil}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left[3,388 \cdot \frac{L_t}{\sqrt{A_t}} \right] \quad (11)$$

Pour les tunnels profonds, ces formules produiront des résultats conservateurs en raison de l'inertie thermique du sol. Cette question est à l'étude.

4.3 Système de formules

Une transformation triangle-étoile est utilisée pour dériver le système de formules suivant:

$$\begin{aligned}
\theta_s(z) - \theta_e(z) &= T_s \cdot N \cdot W_k \\
\theta_e(z) - \theta_t(z) &= T_t \cdot (N \cdot W_k - W_a(z)) \\
\theta_t(z) - \theta_a(z) &= T_e \cdot (N \cdot W_k - W_a(z)) \\
\theta_{at}(z) - \theta_e(z) &= -T_a \cdot W_a(z) \\
W_a(z) &= C_{av} \cdot \frac{\partial \theta_{at}(z)}{\partial z}
\end{aligned} \tag{12}$$

où

z est la coordonnée correspondante à l'axe du tunnel.

où

T_s est la résistance thermique équivalente en étoile du câble;

T_t est la résistance thermique équivalente en étoile de la paroi du tunnel;

T_a est la résistance thermique équivalente en étoile de l'air;

définie comme suit:

$$\begin{aligned}
T_s &= \frac{\left(\frac{T_{st}}{N}\right) \cdot \left(\frac{T_{as}}{N}\right)}{\left(\frac{T_{st}}{N}\right) + \left(\frac{T_{as}}{N}\right) + T_{at}} \\
T_t &= \frac{T_{at} \cdot \left(\frac{T_{st}}{N}\right)}{\left(\frac{T_{st}}{N}\right) + \left(\frac{T_{as}}{N}\right) + T_{at}} \\
T_a &= \frac{T_{at} \cdot \left(\frac{T_{as}}{N}\right)}{\left(\frac{T_{st}}{N}\right) + \left(\frac{T_{as}}{N}\right) + T_{at}}
\end{aligned} \tag{13}$$

La transformation triangle-étoile est schématisée à l'Annexe B.

4.4 Résolution

L'intensité du courant admissible est obtenue à partir de la Formule (14) suivante qui est similaire à la formule classique relative au courant admissible de câbles, donnée dans l'IEC60287-1-1:

$$I = \left[\frac{\theta_{\max} - [\theta_a + \Delta\theta_0] - W_d \cdot \left[\frac{T_1}{2} + n \cdot (T_2 + T_3 + T_{4t}) \right]}{R \cdot [T_1 + n \cdot (1 + \lambda_1) \cdot T_2 + n \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (T_3 + T_{4t})]} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{14}$$

où

$\Delta\theta_0$ est l'augmentation fictive de la température ambiante à tenir compte pour la ventilation (K)

$$\Delta\theta_0 = [\theta_{at}(0) - \theta_a] \cdot \frac{T_t + T_e}{T_a + T_t + T_e} \cdot e^{-L/L_0} \quad (15)$$

T_{4t} est la résistance thermique équivalente des alentours du câble (K·m/W)

$$T_{4t} = N \cdot \left[T_s + (T_t + T_e) \cdot \left(1 - \frac{T_t + T_e}{T_a + T_t + T_e} \cdot e^{-L/L_0} \right) \right] \quad (16)$$

L_0 est la longueur de référence (m)

$$L_0 = (T_a + T_t + T_e) \cdot C_{av} \quad (17)$$

θ_{max} est la température maximale admissible de l'âme (°C).

La température de l'air $\theta_{at}(L)$ à la sortie du tunnel est estimée à partir de:

$$\theta_{at}(L) = \theta_{at}(0) + [\theta_a + (T_t + T_e) \cdot N \cdot W_k - \theta_{at}(0)] \cdot \left[1 - e^{-\frac{L}{L_0}} \right] \quad (18)$$

La température de la surface du câble et la température de la paroi du tunnel à la sortie du tunnel sont obtenues à partir de la température de l'air par:

$$\theta_s(L) = \theta_{at}(L) + T_a \cdot W_a(L) + T_s \cdot N \cdot W_k \quad (19)$$

$$\theta_t(L) = \theta_{at}(L) + T_a \cdot W_a(L) - T_t \cdot [N \cdot W_k - W_a(L)] \quad (20)$$

où

$W_a(L)$ est la chaleur évacuée par l'air à la sortie du tunnel, donnée par:

$$W_a(L) = \frac{(T_t + T_e) \cdot N \cdot W_k - [\theta_{at}(L) - \theta_a]}{T_a + T_t + T_e} \quad (21)$$

4.5 Processus itératif

Les résistances thermiques T_a , T_s et T_t sont calculées à partir des estimations de la température de la surface du câble, de la température de la paroi du tunnel et de la température de l'air à la sortie du tunnel, en utilisant les Formules (4), (5) ou (6), (7) et (13).

Le courant admissible du câble est dérivé à partir des Formules (14) à (15), (16), (17), T_e étant dérivée à partir des Formules (10) et (11) et C_{av} étant dérivée à partir de la Formule (9).

Les pertes dans les câbles sont calculées par le biais des Formules (1) et (2).

La température de l'air à la sortie du tunnel est calculée à partir de la Formule (18), la température de la surface du câble et la température de la paroi du tunnel sont calculées à l'aide des Formules (19) et (20), en utilisant la Formule (21).

Le calcul est répété en utilisant ces nouvelles estimations de la température de la surface du câble, la température de la paroi du tunnel et la température de l'air à la sortie du tunnel ainsi qu'à l'entrée, jusqu'à convergence.

Pour les premières estimations, les températures à la sortie du tunnel sont prises identiques à la température de l'air à l'entrée du tunnel.

5 Formules relatives aux propriétés de l'air

Les Formules (22) à (25) fournissent les propriétés requises pour l'air à la température appropriée:

Conductivité thermique pour l'air

$$k_{\text{air}} = 2,42 \cdot 10^{-2} + 7,2 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_{\text{at}}(\text{L}) \quad (22)$$

Viscosité cinématique pour l'air

$$\nu = 1,32 \cdot 10^{-5} + 9,5 \cdot 10^{-8} \cdot \theta_{\text{at}}(\text{L}) \quad (23)$$

Nombre de Prandtl pour l'air

$$\text{Pr} = 0,715 - 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot \theta_{\text{at}}(\text{L}) \quad (24)$$

La capacité calorifique volumique de l'air, C_{vair} , étant dérivée de Pr , k_{air} et ν .

$$C_{\text{vair}} = \text{Pr} \cdot \frac{k_{\text{air}}}{\nu} \quad (25)$$

6 Profil de température

La Formule (26) calcule la température de l'air $\theta_{\text{at}}(z)$ en tout point z le long du tunnel.

$$\theta_{\text{at}}(z) = \theta_{\text{at}}(0) + [\theta_{\text{a}} + (T_{\text{t}} + T_{\text{e}}) \cdot N \cdot W_{\text{k}} - \theta_{\text{at}}(0)] \cdot \left[1 - e^{-\frac{z}{L_0}} \right] \quad (26)$$

où

W_{k} , T_{t} , T_{e} et L_0 ont été déterminées selon l'Article 4.

Annexe A (informative)

Exemple de calcul

A.1 Câble et installation

Cet exemple considère trois câbles unipolaires sans armure ($T_2 = 0$ et $\lambda_2 = 0$) espacés verticalement dans un tunnel circulaire ventilé (l'espacement entre les câbles étant trois fois leur diamètre).

Tableau A.1 – Données d'installation

Câbles	Symbole	Valeur	Unité
Nombre de câbles	N	3	-
Nombre d'âmes dans un câble	n	1	-
Diamètre extérieur du câble	D_e^*	0,122	m
Résistance électrique de l'âme en courant alternatif à sa température de service maximale	R	1,28E-05	Ω/m
Pertes diélectriques par unité de longueur et par phase	W_d	4,0	W/m
Facteur de perte gaine/écran	λ_1	0,045 03	-
Température maximale de l'âme admissible	$\theta_{\max}$	90	$^{\circ}\text{C}$
Résistance thermique par phase entre âme et gaine	T_1	0,341	$\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$
Résistance thermique du revêtement	T_3	0,038	$\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$
Tunnel et alentours			
Résistivité thermique du sol	ρ_{soil}	1,0	$\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$
Profondeur de l'axe du tunnel	L_t	4,0	m
Diamètre intérieur du tunnel	D_t	3,0	m
Longueur du tunnel	L	1 000	m
Température au niveau du sol	θ_a	20	$^{\circ}\text{C}$
Température de l'air à l'entrée du tunnel	$\theta_{\text{at}}(0)$	20	$^{\circ}\text{C}$
Vitesse de l'air	V	2	m/s
Constantes			
Facteur de convection	K_{cv}	0,115	-
Facteur de forme du rayonnement	K_r	0,90	-
Émissivité efficace	K_t	0,90	-

A.2 Valeurs calculées

Le nombre de chiffres significatifs donnés au Tableau A.2 n'indique pas l'exactitude des calculs, mais il est destiné à aider les personnes qui développent un outil de calcul.

Tableau A.2 – Processus itératif pour un tunnel d'une longueur de 1 km

Itération	Formule	1	2	3
$\theta_s(L)$ prise comme hypothèse		20	52,11	52,15
$\theta_t(L)$ prise comme hypothèse		20	36,83	37,89
$\theta_{at}(L)$ prise comme hypothèse		20	36,49	37,30
T_e	10	0,261	0,261	0,261
T_{st}	4	0,564 6	0,443 6	0,441 3
k_{air}	22	0,026	0,027	0,027
ν	23	$1,51 \times 10^{-5}$	$1,666\ 65 \times 10^{-5}$	$1,674\ 34 \times 10^{-5}$
Re	6	16 159	14 640	14 573
T_{as}	6	0,198 5	0,202 3	0,202 5
Pr	24	0,710 0	0,705 9	0,705 7
Re	7	397 351	360 003	358 351
T_{at}	7	0,020 5	0,021 3	0,021 3
T_s	13	0,045 3	0,042 1	0,042 1
T_t	13	0,014 1	0,013 3	0,013 3
T_a	13	0,004 9	0,006 1	0,006 1
C_{vair}	25	1 206	1 136	1 133
C_{av}	9	17 044	16 063	16 019
L_0	17	4 764	4 496	4 484
$\Delta\theta_0$	15	0	0	0
T_{4t}	16	0,303 7	0,304 5	0,304 8
I	14	2 758	2 756	2 755
W_c	2	97,3	97,2	97,2
W_k	1	105,7	105,6	105,6
$\theta_{at}(L)$	18	36,49	37,30	37,33
$W_a(L)$	21	252,58	248,11	247,84
$\theta_s(L)$	19	52,11	52,15	52,17
$\theta_t(L)$	20	36,83	37,89	37,93

Le profil de température le long du tunnel d'une longueur de 1 km est donné à la Figure A.1.

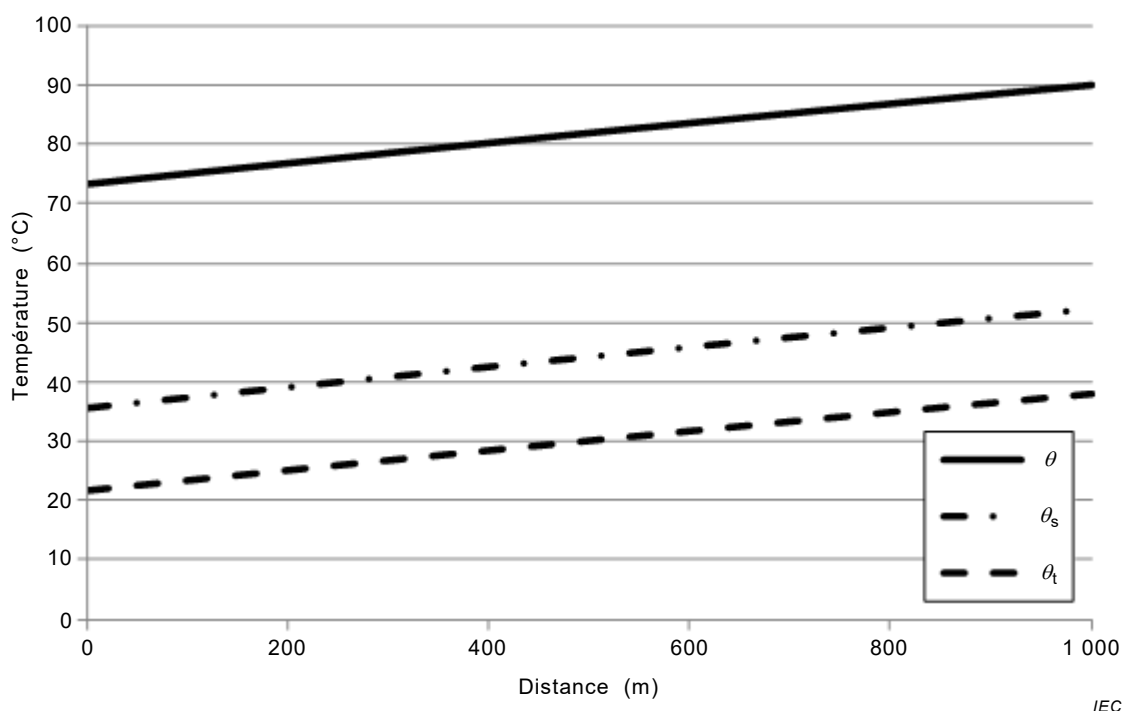


Figure A.1 – Profil de la température le long d'un tunnel de 1 km

Dans l'exemple donné à la Figure A.1, les propriétés thermiques de l'air ont été déterminées pour la température de l'air, calculée dans le tunnel à chaque étape de l'itération. Si les propriétés thermiques de l'air étaient déterminées à une température de 30 °C, l'intensité du courant admissible serait 2 764 A, par rapport à la valeur de 2 755 A ci-dessus calculée.

La répétition du calcul en utilisant les mêmes données, excepté pour une longueur de tunnel de 10 000 m, mène à une intensité du courant admissible de 1 999 A. Le profil de la température le long du tunnel de 10 km est représenté à la Figure A.2.

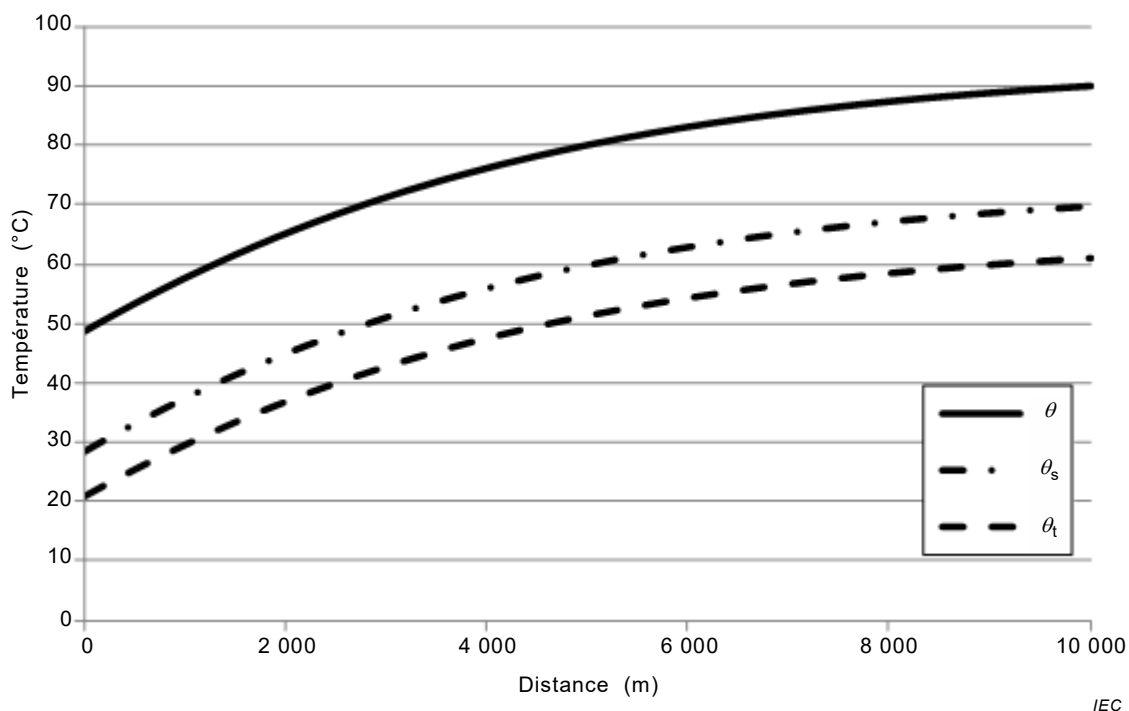


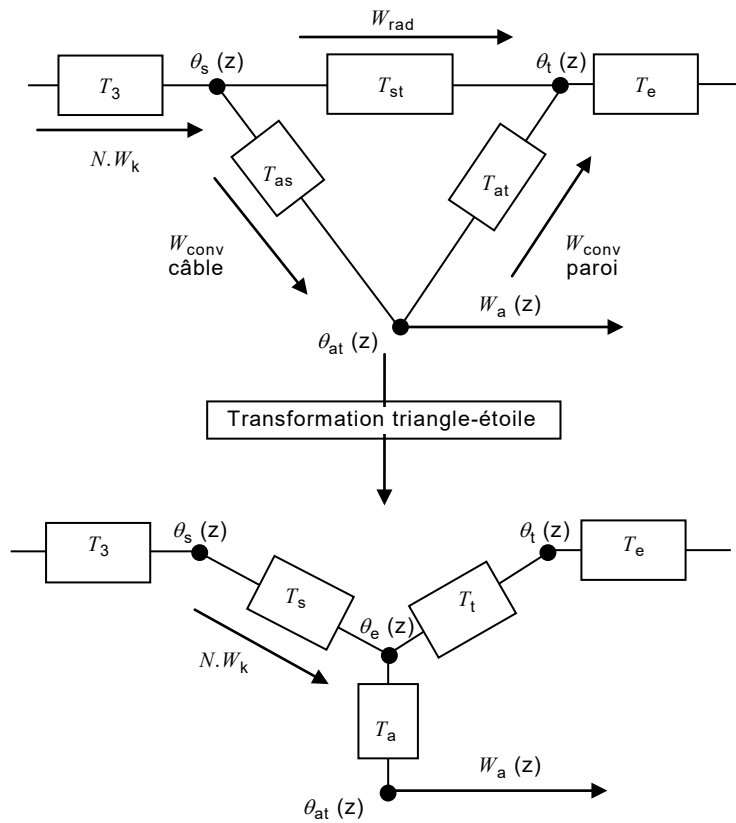
Figure A.2 – Profil de la température le long d'un tunnel de 10 km

Si les propriétés thermiques de l'air sont déterminées pour une température de 30 °C, le courant admissible s'avère être 2 018 A, au lieu de 1 999 A. Cette différence est considérée comme étant négligeable.

Annexe B (informative)

Transformation triangle-étoile

Le mécanisme de transfert de chaleur dans le tunnel et dans la transformation triangle-étoile donnée en 4.3 est montré à la Figure B.1.



IEC

Figure B.1 – Transformation triangle-étoile

Annexe C (informative)

Calcul du coefficient F_m

C.1 Définition de l'espacement

L'espacement entre les câbles est défini comme étant la distance entre les axes des câbles (voir Figure C.1).

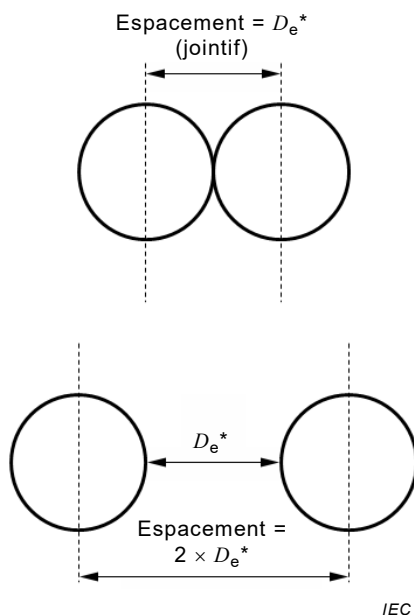


Figure C.1 – Définitions de l'espacement

C.2 Calcul du coefficient F_m

Le coefficient F_m peut être calculé avec les expressions données dans le Tableau C.1.

Tableau C.1 – Expression pour le calcul du coefficient F_m

Deux câbles		$F_m = \frac{1}{\pi} \left[\arcsin\left(\frac{1}{s}\right) + (s^2 - 1)^{0,5} - s \right]$
Trois câbles	Câble intermédiaire	$F_m = \frac{2}{\pi} \left[\arcsin\left(\frac{1}{s}\right) + (s^2 - 1)^{0,5} - s \right]$
	Câbles extérieurs	$F_m = \frac{1}{\pi} \left[\arcsin\left(\frac{1}{s}\right) + (s^2 - 1)^{0,5} - s \right]$
Trèfle jointif		$F_m = \frac{1}{6} + \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right)$

où

s est le rapport entre l'espacement et le diamètre du câble.

$$s = \frac{\text{Espacement}}{D_e^*}$$

Bibliographie

- [1] Electra n°143 – 144 (1992), *CIGRE (Comité International des Grands Réseaux Électriques)*, [Erratum publié dans Electra n°209 (2003) inclus]
-

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch

www.iec.ch