

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC
1597**

Première édition
First edition
1995-05

**Conducteurs pour lignes électriques aériennes –
Méthodes de calcul applicables aux
conducteurs câblés**

**Overhead electrical conductors –
Calculation methods for stranded
bare conductors**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 1597: 1995

Numéros des publications

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

Publications consolidées

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

Validité de la présente publication

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

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

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

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

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

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

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

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

Numbering

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

Consolidated publications

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

Validity of this publication

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

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

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

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

Terminology, graphical and letter symbols

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

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

* See web site address on title page.

**RAPPORT
TECHNIQUE – TYPE 3
TECHNICAL
REPORT – TYPE 3**

**CEI
IEC
1597**

Première édition
First edition
1995-05

**Conducteurs pour lignes électriques aériennes –
Méthodes de calcul applicables aux
conducteurs câblés**

**Overhead electrical conductors –
Calculation methods for stranded
bare conductors**

© CEI 1995 Droits de reproduction réservés — Copyright – all rights reserved

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

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

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

X

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	6
Articles	
1 Domaine d'application	10
2 Symboles et abréviations	10
2.1 Symboles et unités	10
2.2 Abréviations	14
3 Capacité de courant transporté	14
3.1 Généralités	14
3.2 Equation du bilan thermique	14
3.3 Méthode de calcul	14
3.4 Effet Joule	16
3.5 Echauffement dû au rayonnement solaire	16
3.6 Chaleur perdue par rayonnement	16
3.7 Chaleur perdue par convection	16
3.8 Méthode de calcul de la capacité de courant transporté (CCC)	18
3.9 Détermination de la température maximale de l'aluminium	18
3.10 Valeurs calculées de capacité de courant transporté	18
4 Résistance en courant alternatif, réactances inductive et capacitive	20
4.1 Généralités	20
4.2 Résistance en courant alternatif (CA)	20
4.3 Réactance inductive	22
4.4 Réactance capacitive	26
4.5 Tableaux des propriétés	26
5 Allongement des conducteurs toronnés	26
5.1 Généralités	26
5.2 Allongement thermique	28
5.3 Propriétés de contrainte-allongement	32
5.4 Etablissement du module d'élasticité final	34
6 Fluage du conducteur	40
6.1 Généralités	40
6.2 Fluage des fils unitaires	40
6.3 Fluage total du conducteur	42
6.4 Prévision du fluage du conducteur	44
6.5 Valeurs de fluage	44

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
Clause	
1 Scope	11
2 Symbols and abbreviations	11
2.1 Symbols and units	11
2.2 Abbreviations	15
3 Current carrying capacity	15
3.1 General	15
3.2 Heat balance equation	15
3.3 Calculation method	15
3.4 Joule effect	17
3.5 Solar heat gain	17
3.6 Radiated heat loss	17
3.7 Convection heat loss	17
3.8 Method to calculate current carrying capacity (CCC)	19
3.9 Determination of the maximum permissible aluminium temperature	19
3.10 Calculated values of current carrying capacity	19
4 Alternating current resistance, inductive and capacitive reactances	21
4.1 General	21
4.2 Alternating current (AC) resistance	21
4.3 Inductive reactance	23
4.4 Capacitive reactance	27
4.5 Table of properties	27
5 Elongation of stranded conductors	27
5.1 General	27
5.2 Thermal elongation	29
5.3 Stress-strain properties	33
5.4 Assessment of final elastic modulus	35
6 Conductor creep	41
6.1 General	41
6.2 Creep of single wires	41
6.3 Total conductor creep	43
6.4 Prediction of conductor creep	45
6.5 Creep values	45

Articles	Pages
7 Perte de résistance	46
8 Calcul de la longueur maximum du conducteur sur tourets	48
8.1 Bases de calcul	48
8.2 Facteur de remplissage	50
8.3 Espace entre dernière couche et le douvage (garde au sol)	52
8.4 Exemple numérique	52
 Annexes	
A Capacité de courant transporté	54
B Résistance, réactances inductive et capacitive des conducteurs	69
C Bibliographie	85

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 61597:1995

Clause	Page
7 Loss of strength	47
8 Calculation of maximum conductor length on drums	49
8.1 Basis of calculation	49
8.2 Packing factor	51
8.3 Space between last conductor layer and lagging	53
8.4 Numerical example	53
Annexes	
A Current carrying capacity	55
B Resistance, inductive and capacitive reactance of conductors	69
C Bibliography	85

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 61597:1995

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CONDUCTEURS POUR LIGNES ÉLECTRIQUES AÉRIENNES – MÉTHODES DE CALCUL APPLICABLES AUX CONDUCTEURS CÂBLÉS

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique 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 en ce qui concerne les questions techniques, préparés par les comités d'études où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 3) Ces décisions constituent des recommandations internationales publiées sous forme de normes, de rapports techniques ou de guides et agréées comme telles 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.

La tâche principale des comités d'études de la CEI est d'élaborer des Normes internationales. Exceptionnellement, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique de l'un des types suivants:

- type 1, lorsque, en dépit de maints efforts, l'accord requis ne peut être réalisé en faveur de la publication d'une Norme internationale;
- type 2, lorsque le sujet en question est encore en cours de développement technique ou lorsque, pour une raison quelconque, la possibilité d'un accord pour la publication d'une Norme internationale peut être envisagée pour l'avenir mais pas dans l'immédiat;
- type 3, lorsqu'un comité d'études 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.

Les rapports techniques de types 1 et 2 font l'objet d'un nouvel examen trois ans au plus tard après leur publication afin de décider éventuellement de leur transformation en Normes internationales. Les rapports techniques de type 3 ne doivent pas nécessairement être révisés avant que les données qu'ils contiennent ne soient plus jugées valables ou utiles.

La CEI 1597, rapport technique de type 3, a été établie par le comité d'études 7 de la CEI: Conducteurs pour lignes électriques aériennes.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**OVERHEAD ELECTRICAL CONDUCTORS –
CALCULATION METHODS FOR STRANDED
BARE CONDUCTORS**

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 cooperation 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, prepared by technical committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 3) They have the form of recommendations for international use published in the form of standards, 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.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. In exceptional circumstances, a technical committee may propose the publication of a technical report of one of the following types:

- type 1, when the required support cannot be obtained for the publication of an International Standard, despite repeated efforts;
- type 2, when the subject is still under technical development or where for any other reason there is the future but not immediate possibility of an agreement on an International Standard;
- type 3, when a technical committee has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example "state of the art".

Technical reports of types 1 and 2 are subject to review within three years of publication to decide whether they can be transformed into International Standards. Technical reports of type 3 do not necessarily have to be reviewed until the data they provide are considered to be no longer valid or useful.

IEC 1597, which is a technical report of type 3, has been prepared by IEC technical committee 7: Overhead electrical conductors.

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

Projet de comité	Rapport de vote
7(SEC)466	7(SEC)471

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.

Ce rapport technique est un document informatif associé à la CEI 1089: *Conducteurs pour lignes aériennes à brins circulaires, câbles en couches concentriques*.

Ce document constitue un Rapport Technique de type 3. Il est destiné à fournir des informations complémentaires sur les conducteurs spécifiés dans la CEI 1089.

Diverses propriétés des conducteurs et des méthodes de calcul sont données dans ce document. Généralement, on les trouve dans un certain nombre de références, mais rarement dans un document unique.

Il est à noter que les définitions figurant dans la CEI 1089 s'appliquent également au présent document.

Les annexes A, B et C sont données uniquement à titre d'information.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 1597:1995

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

Committee draft	Report on voting
7(SEC)466	7(SEC)471

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 technical report is an informative companion to IEC 1089: *Round wire concentric lay overhead electrical conductors*.

This document is a Technical Report of type 3. It is intended to provide additional technical information on conductors specified in IEC 1089.

Various conductor properties and calculation methods are given in this document. These are normally found in a number of references, but rarely condensed in a single document.

It is noted that all definitions given in IEC 1089 apply equally to this document.

Annexes A, B and C are for information only.

IECNORM.COM :: Click to view the full PDF of IEC TR 01597:1995

CONDUCTEURS POUR LIGNES ÉLECTRIQUES AÉRIENNES – MÉTHODES DE CALCUL APPLICABLES AUX CONDUCTEURS CÂBLÉS

1 Domaine d'application

Ce document fournit des informations concernant les conducteurs spécifiés dans la CEI 1089. De telles informations concernent les propriétés des conducteurs et les méthodes pratiques de calcul.

Le document comprend les chapitres suivants:

- capacité de courant transporté: Méthode de calcul et exemple-type;
- résistance en courant alternatif, réactances inductive et capacitive;
- allongement des conducteurs câblés; données thermiques et relatives à la contrainte mécanique;
- fluage du conducteur;
- perte de résistance mécanique des fils d'aluminium sous l'action des températures élevées;
- calcul de la longueur maximum d'un conducteur en fonction du type de touret.

Il est à noter que ce document ne discute pas toutes les théories et méthodes disponibles pour calculer les propriétés du conducteur, mais fournit aux utilisateurs des méthodes simples, offrant une précision acceptable.

2 Symboles et abréviations

2.1 Symboles et unités

A	section droite du conducteur (mm^2)
A_a	fils d'aluminium
A_s	fils d'acier
B	largeur intérieure d'un touret (m)
D	diamètre du conducteur (m)
d_1, d_2	diamètres extérieur et intérieur d'un touret (m)
E	module d'élasticité du conducteur complet (MPa)
E_a	fils d'aluminium
E_s	fils d'acier
f	fréquence (Hz)
F	traction dans le conducteur (kN)
F_a	traction dans les fils d'aluminium
F_s	traction dans les fils d'acier
I	intensité du courant (A)
K_1	rigidité relative des fils d'acier par rapport aux fils d'aluminium
K_c	coefficient de fluage
K_e	coefficient d'émissivité par rapport au corps noir

OVERHEAD ELECTRICAL CONDUCTORS – CALCULATION METHODS FOR STRANDED BARE CONDUCTORS

1 Scope

This document provides information with regard to conductors specified in IEC 1089. Such information includes properties of conductors and useful methods of calculation.

The following chapters are included in this document:

- current carrying capacity of conductors: Calculation method and typical example
- alternating current resistance, inductive and capacitive reactances
- elongation of conductors: Thermal and stress-strain data
- conductor creep
- loss of strength of aluminium wires due to high temperatures
- calculation of maximum conductor length in a drum

It is noted that this document does not discuss all theories and available methods for calculating conductor properties, but provides users with simple methods that provide acceptable accuracies.

2 Symbols and abbreviations

2.1 Symbols and units

A	cross-sectional area of the conductor (mm^2)
A_a	aluminium wires
A_s	steel wires
B	Internal width of a drum (m)
D	conductor diameter (m)
d_1, d_2	outside and inside diameter of a drum (m)
E	modulus of elasticity of complete conductor (MPa)
E_a	aluminium wires
E_s	steel wires
f	frequency (Hz)
F	tensile force in the complete conductor (kN)
F_a	in the aluminium wires
F_s	in steel wires
I	conductor current (A)
K_1	relative rigidity of steel to aluminum wires
K_c	creep coefficient
K_e	emissivity coefficient in respect to black body

K_g	coefficient de câblage
k_p	facteur de remplissage
k_s	facteur de garde au sol
L	longueur maximale d'un conducteur sur un touret (m)
Nu	nombre de Nusselt
P_{conv}	chaleur perdue par convection (W/m)
P_j	pertes Joule (W/m)
P_{rad}	chaleur perdue par rayonnement (W/m)
P_{sol}	rayonnement solaire absorbé (W/m)
r	rayon du conducteur (m)
Re	nombre de Reynolds
R_T	résistance électrique du conducteur à la température T (Ω/m)
s	constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$)
S_i	Intensité du rayonnement solaire (W/m^2)
t	temps (h)
T	température (K)
T_1	température ambiante (K)
T_2	température finale d'équilibre (K)
v	vitesse du vent (m/s)
V_{dr}	volume utile d'un touret (m^3)
X_c	réactance capacitive, calculée pour une distance de 0,3 m ($\text{M}\Omega.\text{km}$)
X_l	réactance inductive, calculée pour un rayon de 0,3 m (Ω/km)
α	coefficient de température de la résistance électrique (K^{-1})
α_a	rapport de la section d'aluminium à la section totale du conducteur
α_s	rapport de la section d'acier à la section totale du conducteur
β	coefficient de dilatation linéaire (K^{-1})
β_a	pour l'aluminium
β_s	pour l'acier
Δx	expression générale pour désigner l'incrément d'une variable x
ϵ	expression générale de l'allongement (relatif)
ϵ_a	allongement élastique des fils d'aluminium
ϵ_c	allongement dû au fluage et à la mise en place
ϵ_s	allongement élastique des fils d'acier
ϵ_T	allongement thermique
ϕ	coefficient dépendant de la température (T) dans les calculs de fluage
γ	coefficient d'absorption du rayonnement solaire
λ	conductivité thermique du film d'air en contact avec le conducteur ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
μ	coefficient dépendant du temps (t) dans les calculs de fluage
σ	contrainte (MPa)
ψ	coefficient dépendant de la contrainte (σ) dans les calculs de fluage

K_g	layer factor
k_p	factor due to packing a conductor in a drum
k_s	factor due to void between conductor and planking
L	maximum conductor length in a drum (m)
Nu	Nusselt number
P_{conv}	convection heat loss (W/m)
P_j	Joule losses (W/m)
P_{rad}	radiation heat loss (W/m)
P_{sol}	solar radiation heat gain (W/m)
r	conductor radius (m)
Re	Reynolds number
R_T	electrical resistance of conductor at a temperature T (Ω/m)
s	Stefan-Boltzmann constant ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$)
S_i	intensity of solar radiation (W/m^2)
t	time (h)
T	temperature (K)
T_1	ambient temperature (K)
T_2	final equilibrium temperature (K)
v	wind speed in m/s
V_{dr}	coiling volume in a drum (m^3)
X_c	capacitive reactance, calculated for 0,3 m spacing ($\text{M}\Omega \cdot \text{km}$)
X_i	inductive reactance calculated for a radius of 0,3 m (Ω/km)
α	temperature coefficient of electrical resistance (K^{-1})
α_a	ratio of aluminium area to total conductor area
α_s	ratio of steel area to total conductor area
β	coefficient of linear expansion of conductor in K^{-1}
β_a	for aluminium
β_s	for steel
Δx	general expression used to express the increment of variable x
ε	general expression of strain (unit elongation)
ε_a	elastic strain of aluminium wires
ε_c	creep and settlement strain
ε_s	elastic strain of steel wires
ε_T	thermal strain
ϕ	coefficient for temperature (T) dependence in creep calculations
γ	solar radiation absorption coefficient
λ	thermal conductivity of air film in contact with the conductor ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
μ	coefficient for time (t) dependence in creep calculations
σ	stress (MPa)
ψ	coefficient for stress (σ) dependence in creep calculations

2.2 Abréviations

CCC capacité de courant transporté (A)

GMR rayon géométrique moyen du conducteur (m)

3 Capacité de courant transporté

3.1 Généralités

La capacité de courant transporté (CCC) d'un conducteur est le courant maximal en régime permanent provoquant un échauffement donné du conducteur, pour des conditions ambiantes données.

La CCC dépend du type de conducteur, de sa résistance électrique, de l'échauffement maximal admissible et des conditions ambiantes.

3.2 Equation du bilan thermique

L'échauffement d'équilibre du conducteur est atteint quand la quantité de chaleur gagnée par le conducteur est égale à la quantité de chaleur perdue. Ceci est exprimé dans l'équation (1) suivante:

$$P_j + P_{sol} = P_{rad} + P_{conv} \quad (1)$$

où

P_j est la chaleur dégagée par effet Joule

P_{sol} est la chaleur gagnée par le rayonnement solaire à la surface du conducteur

P_{rad} est la chaleur perdue par rayonnement du conducteur

P_{conv} est la chaleur perdue par convection

Noter que les gains dus aux effets magnétiques (voir 4.1, 4.2 et 4.3), les gains de chaleur par effet de couronne ou les pertes de chaleur par évaporation ne sont pas pris en compte dans l'équation (1).

3.3 Méthode de calcul

Il existe dans la littérature technique de nombreuses méthodes pour calculer chaque terme de l'équation (1). Toutefois, pour les conditions d'équilibre, il existe une concordance raisonnable entre les méthodes courantes¹⁾, qui conduisent toutes à des capacités de courant comprises dans une plage de 10 % environ.

Le rapport technique CEI 943 donne une méthode générale et détaillée pour calculer l'échauffement d'un équipement électrique. Cette méthode est utilisée pour calculer la capacité de courant transporté des conducteurs toronnés, faisant l'objet de ce document. Noter que la CIGRÉ a publié dans *Electra* n° 144, octobre 1992, une méthode détaillée pour calculer la CCC.

¹⁾ Diverses méthodes ont été comparées à la CEI 943, à l'IEEE, aux pratiques en Allemagne, Japon, France, etc.

2.2 Abbreviations

CCC	current carrying capacity (A)
GMR	geometric mean radius of the conductor (m)

3 Current carrying capacity

3.1 General

The current carrying capacity (CCC) of a conductor is the maximum steady-state current inducing a given temperature rise in the conductor, for given ambient conditions.

The CCC depends on the type of conductor, its electrical resistance, the maximum allowable temperature rise and the ambient conditions.

3.2 Heat balance equation

The steady-state temperature rise of a conductor is reached whenever the heat gained by the conductor from various sources is equal to the heat losses. This is expressed by equation (1) as follows:

$$P_j + P_{sol} = P_{rad} + P_{conv} \quad (1)$$

where

P_j	is the heat generated by Joule effect
P_{sol}	is the solar heat gain by the conductor surface
P_{rad}	is the heat loss by radiation of the conductor
P_{conv}	is the convection heat loss

Note that magnetic heat gain (see 4.1, 4.2 and 4.3), corona heat gain, or evaporative heat loss are not taken into account in equation (1).

3.3 Calculation method

In the technical literature there are many methods of calculating each component of equation (1). However, for steady-state conditions, there is reasonable agreement between the currently available methods¹⁾ and they all lead to current carrying capacities within approximately 10 %.

Technical Report IEC 943 provides a detailed and general method to compute temperature rise in electrical equipment. This method is used for calculating the current carrying capacity of conductors included in this document. Note that CIGRÉ has published a detailed method for calculating CCC in *Electra* No. 144, October 1992.

¹⁾ Various methods were compared to IEC 943, IEEE, practices in Germany, Japan, France, etc.

3.4 Effet Joule

La puissance perdue P_j (W) par effet Joule est donnée par l'équation (2):

$$P_j = R_T I^2 \quad (2)$$

où

R_T est la résistance électrique du conducteur à la température T (Ω/m)

I est l'intensité du courant (A)

3.5 Echauffement dû au rayonnement solaire

Le rayonnement solaire absorbé, P_{sol} (W/m), est donné par l'équation (3):

$$P_{sol} = \gamma D S_i \quad (3)$$

où

γ est le coefficient d'absorption du rayonnement solaire

D est le diamètre du conducteur (m)

S_i est l'intensité du rayonnement solaire (W/m^2)

3.6 Chaleur perdue par rayonnement

La chaleur perdue par rayonnement, P_{rad} (W), est donnée par l'équation (4):

$$P_{rad} = s \pi D K_e (T_2^4 - T_1^4) \quad (4)$$

où

s est la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)

D est le diamètre du conducteur (m)

K_e est le coefficient d'émissivité par rapport au corps noir

T est la température (K)

T_1 température ambiante (K)

T_2 température finale d'équilibre (K)

3.7 Chaleur perdue par convection

Seule la convection forcée, P_{conv} (W), est prise en compte et est donnée par l'équation (5):

$$P_{conv} = \lambda Nu (T_2 - T_1) \pi \quad (5)$$

où

λ est la conductivité thermique du film d'air en contact avec le conducteur, considérée constante et égale à $0,02585 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Nu est le nombre de Nusselt, donné par l'équation (6):

$$Nu = 0,65 Re^{0,2} + 0,23 Re^{0,61} \quad (6)$$

3.4 Joule effect

Power losses P_j (W), due to Joule effect are given by equation (2):

$$P_j = R_T I^2 \quad (2)$$

where

R_T is the electrical resistance of conductor at a temperature T (Ω/m)

I is the conductor current (A)

3.5 Solar heat gain

Solar heat gain, P_{sol} (W/m), is given by equation (3):

$$P_{sol} = \gamma D S_i \quad (3)$$

where

γ is the solar radiation absorption coefficient

D is the conductor diameter (m)

S_i is the intensity of solar radiation (W/m^2)

3.6 Radiated heat loss

Heat loss by radiation, P_{rad} (W), is given by equation (4):

$$P_{rad} = s \pi D K_e (T_2^4 - T_1^4) \quad (4)$$

where

s is the Stefan-Boltzmann constant ($5,67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$)

D is the conductor diameter (m)

K_e is the emissivity coefficient in respect to black body

T is the temperature (K)

T_1 ambient temperature (K)

T_2 final equilibrium temperature (K)

3.7 Convection heat loss

Only forced convection heat loss, P_{conv} (W), is taken into account and is given by equation (5):

$$P_{conv} = \lambda Nu (T_2 - T_1) \pi \quad (5)$$

where

λ is the thermal conductivity of the air film in contact with the conductor, assumed constant and equal to: $0,02585 W.m^{-1}.K^{-1}$

Nu is the Nusselt number, given by equation (6):

$$Nu = 0,65 Re^{0,2} + 0,23 Re^{0,61} \quad (6)$$

Re est le nombre de Reynolds, donné par l'équation (7):

$$Re = 1,644 \times 10^9 v D [T_1 + 0,5 (T_2 - T_1)]^{-1,78} \quad (7)$$

v est la vitesse du vent (m/s)

D est le diamètre du conducteur (m)

T est la température (K)

T_1 température ambiante (K)

T_2 température finale d'équilibre (K)

3.8 Méthode de calcul de la capacité de courant transporté (CCC)

A partir de l'équation (1), la capacité de courant transporté dans l'état d'équilibre peut être calculée:

$$I_{\max} = [(P_{\text{rad}} + P_{\text{conv}} - P_{\text{sol}}) / R_T]^{1/2} \quad (8)$$

où

R_T est la résistance électrique du conducteur à la température T (Ω/m)

et P_{sol} , P_{rad} et P_{conv} sont calculés respectivement à partir des équations (3), (4) et (5).

3.9 Détermination de la température maximale de l'aluminium

La température maximale admissible de l'aluminium est déterminée soit par optimisation économique des pertes, soit à partir de la perte de résistance mécanique admissible de l'aluminium.

Dans tous les cas, les distances appropriées entre le conducteur et le sol sous des températures maximales doivent être vérifiées et maintenues.

3.10 Valeurs calculées de capacité de courant transporté

L'équation (8) permet de calculer la CCC de tout conducteur dans des conditions données.

Comme référence, les tableaux de l'annexe A donnent la CCC des conducteurs de dimensions recommandées²⁾ dans les conditions suivantes. Il est important de noter que toute modification de ces conditions (en particulier la vitesse du vent et la température ambiante) affecte la CCC qui doit alors être recalculée selon l'équation (8) ci-dessus:

- vitesse du vent transversal (90° par rapport à la ligne), $v = 1 \text{ m/s}$
- intensité du rayonnement solaire, $S_1 = 900 \text{ W/m}^2$
- coefficient d'absorption solaire, $\gamma = 0,5$
- émissivité par rapport au corps noir, $K_e = 0,6$
- température de l'aluminium, $T_2 = 353 \text{ K}$ et 373 K (soit 80 °C et 100 °C)
- température ambiante, $T_1 = 293 \text{ K}$ (soit 20 °C)
- fréquence = 50 Hz (les valeurs pour 60 Hz sont très proches, habituellement à moins de 2 %)

²⁾ Dans ce document, les dimensions des conducteurs sont celles recommandées dans la publication CEI 1089.

Re is the Reynolds number given by equation (7):

$$Re = 1,644 \times 10^9 \nu D [(T_1 + 0,5(T_2 - T_1))]^{-1,78} \quad (7)$$

ν is the wind speed in m/s

D is the conductor diameter (m)

T is the temperature (K)

T_1 ambient temperature (K)

T_2 final equilibrium temperature (K)

3.8 Method to calculate current carrying capacity (CCC)

From equation (1), the steady-state current carrying capacity can be calculated:

$$I_{\max} = [(P_{\text{rad}} + P_{\text{conv}} - P_{\text{sol}})/R_T]^{1/2} \quad (8)$$

where

R_T is the electrical resistance of conductor at a temperature T (Ω/m)

and P_{sol} , P_{rad} and P_{conv} are calculated from equations (3), (4), and (5).

3.9 Determination of the maximum permissible aluminium temperature

The maximum permissible aluminium temperature is determined either from the economical optimization of losses or from the maximum admissible loss of tensile strength in aluminium.

In all cases, appropriate clearances under maximum temperature have to be checked and maintained.

3.10 Calculated values of current carrying capacity

Equation (8) enables the current carrying capacity (CCC) of any conductor in any condition to be calculated.

As a reference, the tables in annex A gives the CCC of the recommended conductor sizes²⁾ under the following conditions. It is important to note that any change to these conditions (specially with wind speed and ambient temperature) will result in different CCC which will have to be recalculated according to above equation (8):

- speed of cross wind (90° to the line), $\nu = 1$ m/s
- intensity of solar radiation, $S_i = 900$ W/m²
- solar absorption coefficient, $\gamma = 0,5$
- emissivity with respect to black body, $K_e = 0,6$
- aluminium temperature $T_2 = 353$ K and 373 K (equal to 80 °C and 100 °C)
- ambient temperature, $T_1 = 293$ K (= 20 °C)
- frequency = 50 Hz (values for 60 Hz are very close, usually within 2 %)

²⁾ In this document conductor sizes are those recommended in IEC 1089.

4 Résistance en courant alternatif, réactances inductive et capacitive

4.1 Généralités

La résistance électrique d'un conducteur toronné est fonction de la nature du matériau, de sa longueur, de sa section droite et du pas d'assemblage.

Les valeurs nominales de la résistance en courant continu (CC) sont déjà définies dans la CEI 1089 à une température de 20 °C, pour une gamme de résistances supérieure à 0,02 Ω/km.

Afin d'évaluer la résistance électrique à d'autres températures, un facteur de correction doit être appliqué à la résistance à 20 °C.

La résistance en courant alternatif (CA) à une température donnée T est calculée à partir de la résistance en courant continu (CC), corrigée à la température T et en considérant l'incrément d'effet de peau qui reflète l'augmentation de la résistance apparente du conducteur causée par la non-homogénéité de la densité de courant.

Les autres effets importants dus au courant alternatif sont les réactances inductive et capacitive. Elles peuvent être divisées en deux termes, le premier dû au flux à travers un rayon de 0,30 m, et le second qui représente la réactance entre un rayon de 0,30 m et le conducteur équivalent de retour. Seul le premier terme de ces deux réactances est donné dans les tableaux de l'annexe B.

Les méthodes de calcul adoptées dans cet article sont fondées sur l'*Aluminum Electrical Conductor Handbook* de l'Aluminum Association et sur le *Transmission Line Reference Book for 345 kV and above* de l'Electrical Power Research Institute (EPRI).

4.2 Résistance en courant alternatif (CA)

La résistance en courant alternatif (CA) est calculée à partir de la résistance en courant continu (CC) à la même température. La résistance en courant continu d'un conducteur augmente linéairement avec la température, selon l'équation suivante:

$$R_{T_2} = R_{T_1} [1 + \alpha (T_2 - T_1)] \quad (9)$$

où

R_{T_1} est la résistance en courant continu à la température T_1

R_{T_2} est la résistance en courant continu à la température T_2

α est le coefficient de température de la résistance électrique à la température T_1

Dans ce chapitre, les valeurs R_{T_1} sont celles de la résistance en courant continu à 20 °C figurant dans la CEI 1089. Les coefficients de température de la résistance à 20 °C sont:

- pour le type A1 $\alpha = 0,00403 \text{ K}^{-1}$
- pour les types A2 et A3 $\alpha = 0,00360 \text{ K}^{-1}$

A partir de ces valeurs à 20 °C, les résistances en courant continu ont été calculées pour des températures de 50 °C, 80 °C et 100 °C.

4 Alternating current resistance, inductive and capacitive reactances

4.1 General

The electrical resistance of a conductor is a function of the conductor material, length, cross-sectional area and the effect of the conductor lay. In more accurate calculations, it also depends on current and frequency.

The nominal values of DC resistance are defined in IEC 1089 at 20 °C temperature for a range of resistance exceeding 0,02 Ω/km.

In order to evaluate the electrical resistance at other temperatures, a correction factor has to be applied to the resistance at 20 °C.

The alternating current (AC) resistance at a given temperature T is calculated from the DC resistance, corrected to the temperature T and considering the skin effect increment on the conductor that reflects the increased apparent resistance caused by the inequality of current density.

The other important effects due to the alternating current are the inductive and capacitive reactances. They can be divided into two terms: the first one due to flux within a radius of 0,30 m and the second which represents the reactance between 0,30 m radius and the equivalent return conductor. Only the first term of both reactances is listed in tables of annex B.

The methods of calculation adopted in this clause are based on the *Aluminum Electrical Conductor Handbook* of The Aluminum Association and on the *Transmission Line Reference Book for 345 kV and above* of the Electric Power Research Institute (EPRI).

4.2 Alternating current (AC) resistance

The AC resistance is calculated from the DC resistance at the same temperature. The DC resistance of a conductor increases linearly with the temperature, according to the following equation:

$$R_{T_2} = R_{T_1} [1 + \alpha (T_2 - T_1)] \quad (9)$$

where

R_{T_1} is the DC resistance at temperature T_1

R_{T_2} is the DC resistance at temperature T_2

α is the temperature coefficient of electrical resistance at temperature T_1

In this chapter, R_{T_1} corresponds to the DC resistance at 20 °C given in IEC 1089. The temperature coefficients of resistance at 20 °C are the following:

- for type A1 aluminium: $\alpha = 0,00403 \text{ K}^{-1}$
- for types A2 and A3 aluminium: $\alpha = 0,00360 \text{ K}^{-1}$

Based on these values at 20 °C, the DC resistances have been calculated for temperatures of 50 °C, 80 °C and 100 °C.

La résistance en courant alternatif du conducteur est plus élevée que la résistance en courant continu principalement à cause de l'effet de peau. L'origine de ce phénomène peut être expliquée par le fait que la partie interne du conducteur a une inductance plus élevée que la partie externe, car la partie interne éprouve plus de lignes de flux. Comme la chute de tension tout au long du conducteur doit être nécessairement la même à travers toute la section transversale, il y aura une concentration du courant dans la partie externe du conducteur, augmentant ainsi la résistance effective.

Diverses méthodes existent pour calculer le rapport entre les résistances en courant continu et en courant alternatif. Les valeurs données en annexe B pour la résistance en courant alternatif sont basées sur l'une des méthodes [1]³⁾ pratiquées dans l'industrie.

Dans le cas des conducteurs ayant une âme de fils d'acier (conducteurs Ax/Sxy), le flux magnétique dans l'âme varie en fonction du courant, de sorte que le rapport CA/CC varie également, particulièrement quand le nombre de couches de fils d'aluminium est impair car il y a alors un déséquilibre de la force magnétomotrice dû aux sens opposés des couches adjacentes.

Quoique cet effet magnétique peut être significatif dans certains conducteurs Ax/Sxy à couche unique et modéré dans les conducteurs à 3 couches, les valeurs de la résistance en CA pour ces types de conducteurs ont été calculées sans tenir compte de cette influence. De plus amples informations et des comparaisons plus complètes, ainsi qu'une évaluation du flux magnétique et du déséquilibre de la force magnétomotrice figurent dans le chapitre 3 de l'*Aluminum Electrical Conductor Handbook*.

Il existe d'autres facteurs qui exercent une influence mineure sur la résistance du conducteur, par exemple l'hystérésis et les courants de Foucault, non seulement dans les conducteurs mais également dans les parties métalliques adjacentes. Elles sont habituellement estimées par des essais réels et leurs effets n'ont pas été pris en compte dans cet article.

4.3 Réactance inductive

La réactance inductive des conducteurs toronnés est calculée en tenant compte des lignes de flux créées par le courant circulant dans les conducteurs. Afin de rendre les calculs plus faciles, la réactance inductive est divisée en deux termes:

- a) le premier prend en compte le flux magnétique à travers un rayon de 0,3 m⁴⁾;
- b) le deuxième prend en compte le flux magnétique à partir de 0,3 m jusqu'au conducteur de retour équivalent.

La séparation des réactances a été proposée à l'origine par Lewis [1] et le rayon de 0,3 m a été utilisé par tous les concepteurs et fabricants de conducteurs et est utilisée ici afin de permettre une comparaison des caractéristiques des nouvelles séries de conducteurs avec les anciennes.

Les avantages de cette méthode sont que le terme a) est un facteur géométrique (fonction des dimensions du conducteur) tandis que le terme b) dépend uniquement de la séparation entre conducteurs et phases de la ligne. Comme il est indiqué précédemment dans cet article, seul le premier terme a) est donné ici tandis que le terme b) peut être obtenu dans la littérature technique courante.

³⁾ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en annexe C.

⁴⁾ La valeur exacte est de 0,3048.

The AC resistance of the conductor is higher than the DC resistance mainly because of the "skin effect". The cause of this phenomenon can be explained by the fact that the inner portion of the conductor has a higher inductance than the outer portion because the inner portion experiences more flux linkages. Since the voltage drop along any length of the conductor must be necessarily the same over the whole cross-section, there will be a current concentration in the outer portion of the conductor, increasing the effective resistance.

Various methods are available for computing the ratio between AC and DC resistances. The values given in annex B are based on one of the accepted methods [1]³⁾ in the industry for AC resistance.

For conductors having steel wires in the core (Ax/Sxy conductors), the magnetic flux in the core varies with the current, thus the AC/DC ratio also varies with it, especially when the number of aluminium layers is odd, because there is an unbalance of magnetomotive force due to opposite spiralling directions of adjacent layers.

Although this magnetic effect may be significant in some single layer Ax/Sxy conductors and moderate in 3-layer conductors, the values of AC resistances for these types of conductors have been calculated without this influence. Further information and a more complete comparison and evaluation of magnetic flux and unbalance of magnetomotive force may be found in chapter 3 of the Aluminum Electrical Conductor Handbook.

There are other factors with minor influence on the conductor electrical AC resistance, e.g. hysteresis and eddy current losses not only in the conductors but also in adjacent metallic parts but they are usually estimated by actual tests and their effects have not been taken into account in this clause.

4.3 Inductive reactance

The inductive reactance of conductors is calculated considering the flux linkages caused by the current flowing through the conductors. In order to make computations easier, the inductive reactance is divided into two parts:

- a) the one resulting from the magnetic flux within a 0,3 m⁴⁾ radius;
- b) the one resulting from the magnetic flux from 0,3 m to the equivalent return conductor.

This separation of reactances was first proposed by Lewis [1] and the 0,3 m radius has been used by all designers and conductor manufacturers and is herein adopted in order to allow a comparison between the characteristics of the new conductor series and old ones.

The advantages of this procedure are that part a) above is a geometric factor (function of conductor dimensions) while part b) depends only on the separation between conductors and phases of the transmission line. As stated earlier in this clause, only the first term a) is herein listed and part b) can be obtained from the usual technical literature.

³⁾ Figures in square brackets refer to bibliography in annex C.

⁴⁾ Exact number is 0,3048.

La première étape pour déterminer la réactance inductive pour un rayon de 0,3 m est de calculer le rayon géométrique moyen (*GMR*) du conducteur. Les expressions à utiliser sont les suivantes:

$$GMR = 0,5 D K_g \quad (10)$$

où

GMR est le rayon géométrique moyen du conducteur (m)

D est le diamètre extérieur du conducteur (m)

K_g est le coefficient de câblage (rapport des rayons [1])

Le coefficient de câblage *K_g* dépend seulement du type de conducteur et de la géométrie des couches (nombre de couches et de fils). Les valeurs calculées de *K_g* pour différents types de conducteurs définis dans ce rapport sont données au tableau 1.

Tableau 1 – Valeurs de *K_g* pour les calculs de la réactance inductive

Aluminium		Acier		Coefficient de câblage <i>K_g</i>
Nombre de fils	Nombre de couches	Nombre de fils	Nombre de couches	
6	1	1	—	*)
18	2	1	—	0,7765
7	1	—	—	0,7256
22	2	7	1	0,7949
26	2	7	1	0,8116
19	2	—	—	0,7577
37	3	—	—	0,7678
61	4	—	—	0,7722
45	3	7	1	0,7939
54	3	7	1	0,8099
72	4	7	1	0,7889
84	4	7	1	0,8005
91	5	—	—	0,7743
54	3	19	2	0,8099
72	4	19	2	0,7889
84	4	19	2	0,8005

*) Les valeurs varient avec la dimension du conducteur due à la présence de l'âme en acier. Pour les fils individuels, *K_g* peut être calculé à partir de la réactance inductive. La valeur moyenne de *K_g* pour les conducteurs de câblage 6/1 est 0,5090.

La réactance inductive pour un rayon de 0,3 m est alors donnée par l'équation (11):

$$X_i = 4 \times 10^{-4} \pi f \ln(0,3/GMR) = 0,1736 (f/60) \lg (0,3/GMR) \quad (11)$$

où

X_i est la réactance inductive pour un rayon de 0,3 m (Ω/km)

f est la fréquence (Hz)

GMR est le rayon géométrique moyen (m)

The first step to determine the inductive reactance for 0,3 m radius is to calculate the Geometric Mean Radius (*GMR*) of the conductor. The related expressions are the following:

$$GMR = 0,5 D K_g \quad (10)$$

where

GMR is the geometric mean radius of conductor (m)

D is the overall diameter of conductor (m)

K_g is the layer factor (ratio of radii [1])

The "*K_g*" layer factor depends only on the type of conductor and geometry of layers (number of layers and wires). The calculated values of "*K_g*" for the various stranding types defined in this report are given in table 1.

Table 1 – Values of *K_g* for inductive reactance calculations

Aluminium		Steel		Layer factor <i>K_g</i>
No. of wires	No. of layers	No. of wires	No. of layers	
6	1	1	–	*)
18	2	1	–	0,7765
7	1	–	–	0,7256
22	2	7	1	0,7949
26	2	7	1	0,8116
19	2	–	–	0,7577
37	3	–	–	0,7678
61	4	–	–	0,7722
45	3	7	1	0,7939
54	3	7	1	0,8099
72	4	7	1	0,7889
84	4	7	1	0,8005
91	5	–	–	0,7743
54	3	19	2	0,8099
72	4	19	2	0,7889
84	4	19	2	0,8005

*) Values vary with the conductor size due to the presence of the steel core. For individual conductors, *K_g* can be calculated from the inductive reactance. The average value of *K_g* for conductor sizes with 6/1 stranding is 0,5090.

The inductive reactance for 0,3 m radius is then given by equation (11):

$$X_i = 4 \times 10^{-4} \pi f \ln(0,3/GMR) = 0,1736 (f/60) \lg (0,3/GMR) \quad (11)$$

where

X_i is the inductive reactance for 0,3 m radius (Ω/km)

f is the frequency (Hz)

GMR is the geometric mean radius (m)

Pour les conducteurs avec âme en acier (désignations Ax/Sxy), le flux magnétique dans l'âme dépend de l'intensité du courant et, en ce qui concerne la réactance inductive, cette influence peut être considérée comme négligeable pour les conducteurs ayant trois couches d'aluminium et plus ou avec un nombre de couches impair. Pour un modèle Ax/Sxy à couche unique, l'effet n'est plus négligeable et X_i est habituellement déterminé par des essais effectués sur des échantillons de conducteur complet.

Comme on ne dispose pas de résultats d'essais effectués sur des conducteurs des nouvelles séries CEI, pour les conducteurs à couche unique X_i a été estimée par comparaison avec les chiffres expérimentaux des modèles Ax/Sxy à 25 °C (anciens ACSR) publiés par l'Aluminum Association. Ces valeurs sont précises dans une fourchette de 3 %.

4.4 Réactance capacitive

La réactance capacitive peut également être divisée en deux termes:

- a) la réactance capacitive pour un rayon de 0,3 m;
- b) la réactance capacitive à partir de 0,3 m jusqu'au conducteur de retour équivalent.

Tenant compte de la même raison donnée en 4.3, seul le terme a) est donné, le terme b) pouvant être obtenu dans la littérature technique courante.

En ce qui concerne la réactance capacitive, elle ne dépend ni du courant, ni de l'âme en acier. De ce fait, le calcul est très simple, et ne dépend que de la fréquence et des dimensions du conducteur, selon l'équation (12):

$$X_c = (9/\pi f) \ln (2 \times 0,3/D) = 0,1099 (60/f) \lg (2 \times 0,3/D) \quad (12)$$

où

X_c est la réactance capacitive pour un rayon de 0,3 m (MΩ.km)

f est la fréquence (Hz)

D est le diamètre du conducteur (m)

4.5 Tableaux des propriétés

En annexe B, figurent deux groupes de tableaux, calculés pour des fréquences de 50 Hz et 60 Hz. Les résistances en courant alternatif ont été calculées pour des températures de 20 °C, 50 °C, 80 °C et 100 °C.

Les détails concernant les conducteurs, par exemple les diamètres des fils, les sections, peuvent être obtenus dans la CEI 1089.

5 Allongement des conducteurs toronnés

5.1 Généralités

L'allongement⁵⁾ des conducteurs toronnés peut être causé par différents facteurs tels que:

- allongement élastique

⁵⁾ Dans ce rapport, l'allongement est considéré d'une façon générale: il peut être positif ou négatif.

For conductors with steel core (Ax/Sxy designations), the magnetic flux in the core depends on the current and this influence, as far as the inductive reactance is concerned, can be considered negligible for conductors with three aluminium layers and more or with even number of layers. For single-layer Ax/Sxy type, the effect is not negligible and X_i is usually determined after tests on complete conductor samples.

As there are no available results from tests carried out on conductor samples of the new IEC series, X_i for single-layer conductors has been estimated in comparison with experimental figures obtained for usual Ax/Sxy designations (old ACSR) at 25 °C, published by the Aluminum Association. These values are accurate within 3 %.

4.4 Capacitive reactance

The capacitive reactance can also be divided into two parts:

- a) the capacitive reactance for 0,3 m radius;
- b) the capacitive reactance from 0,3 m to the equivalent return conductor.

Considering the same reason given in 4.3, only part a) above is herein listed and part b) can be obtained from readily available technical literature.

As far as capacitive reactance is concerned, it is neither current nor steel wire dependent. Hence the calculation is quite simple, depending only on the frequency and the conductor dimensions, as shown in equation (12):

$$X_c = (9/\pi f) \ln (2 \times 0,3/D) = 0,1099 (60/f) \lg (2 \times 0,3/D) \quad (12)$$

where

- X_c is the capacitive reactance for 0,3 m radius (MΩ · km)
- f is the frequency (Hz)
- D is the conductor diameter (m)

4.5 Table of properties

In annex B, there are two groups of tables calculated for frequencies of 50 Hz and 60 Hz. The AC resistances have been calculated for temperatures of 20 °C, 50 °C, 80 °C and 100 °C.

Details concerning the conductors, for example wire diameters, cross-sectional areas, can be obtained from IEC 1089.

5 Elongation of stranded conductors

5.1 General

Elongation⁵⁾ of conductors can be caused by various sources such as:

- elastic elongation

⁵⁾ In this report, elongation is considered in a general way: it can either be positive or negative.

- allongement thermique
- fluage
- allongement dû à la mise en place des fils lors du câblage
- compression radiale et indentation localisée des couches du conducteur au point de contact des fils.

Quand un conducteur est soumis à des forces de tension, la répartition des contraintes dans ses fils est intimement liée aux allongements cités ci-dessus.

Dans ce chapitre, ces allongements sont étudiés séparément et, lorsque cela est possible, des modèles généralisés sont proposés pour chaque type d'allongement.

A noter que des informations plus détaillées sur le fluage et l'allongement des conducteurs sont à l'étude au sein du TC7 de la CEI.

5.2 Allongement thermique

Des variations de température affectent la longueur du conducteur toronné. L'allongement thermique ou l'allongement unitaire (ϵ_T) des conducteurs homogènes en aluminium a la forme suivante:

$$\epsilon_T = \beta_a \Delta T \quad (13)$$

où

β est le coefficient de dilatation linéaire du conducteur (K^{-1})

β_a pour l'aluminium

β_s pour l'acier

ΔT est l'incrément de température T

Pour tous les conducteurs désignés par A1, A2, A1/A2 and A1/A3, on utilise la valeur de $\beta_a = 23 \times 10^{-6} K^{-1}$.

Pour les fils d'acier, on considère que le coefficient de dilatation linéaire β_s est égal à $\beta_s = 11,5 \times 10^{-6} K^{-1}$.

L'allongement thermique des conducteurs composites (A_x/S_{xy}) est plus complexe à établir à cause de la relation intime entre allongements et contraintes des fils constitutifs.

Les conducteurs utilisés dans les lignes aériennes de transport sont constamment soumis à une tension mécanique et, dans la plupart des cas, les fils d'acier et d'aluminium supportent la tension totale en proportion de leur rigidité relative.

Quand les fils d'acier et d'aluminium sont soumis ensemble à des contraintes de tension, l'allongement thermique et l'allongement dû à la tension sont liés. Dans ce cas, les équations suivantes s'appliquent:

$$\Delta F_s / A_s E_s = \beta_s \Delta T \quad (\text{s'applique à l'acier}) \quad (14)$$

$$\Delta F_a / A_a E_a = \beta_a \Delta T \quad (\text{s'applique à l'aluminium}) \quad (15)$$

- thermal elongation
- creep
- elongation due to the slack in the wires during stranding
- radial compression and local indentation of conductor layers at wire contacts.

When a conductor is subjected to tensile forces, the distribution of stresses in its wires is intimately related to the elongations listed above.

In this chapter, these elongations are discussed separately and, whenever applicable, generalized models are proposed for each type of elongation.

It is noted that more detailed information on creep and conductor elongation is currently being studied by IEC/TC7.

5.2 Thermal elongation

Changes in temperature will affect the length of a conductor. The thermal strain or unit elongation (ϵ_T) of homogeneous aluminium conductors have the following format:

$$\epsilon_T = \beta_a \Delta T \quad (13)$$

where

β is the coefficient of linear expansion of conductor in K^{-1}

β_a for aluminium

β_s for steel

ΔT is the temperature T increment

For all conductors designated A1, A2, A1/A2 and A1/A3, the value of $\beta_a = 23 \times 10^{-6} K^{-1}$ is used.

For steel wires, the coefficient of linear expansion β_s is considered equal to $\beta_s = 11,5 \times 10^{-6} K^{-1}$.

The thermal elongation of composite conductors (designation Ax/Sxy) is more complex to establish because of the intimate relationship between elongations and stresses of constituent wires.

Conductors used in overhead transmission lines are continuously subjected to mechanical tension and, in most cases, both aluminium and steel wires share the total tension in proportion to their relative rigidity.

When both aluminium and steel wires are subjected to tensile stresses, thermal strain and tensile strain are related. In this case the following relations apply:

$$\Delta F_s / A_s E_s = \beta_s \Delta T \quad (\text{applicable to steel portion}) \quad (14)$$

$$\Delta F_a / A_a E_a = \beta_a \Delta T \quad (\text{applicable to aluminium portion}) \quad (15)$$

$$\Delta F / A E = \beta \Delta T \quad (\text{s'applique au conducteur complet}) \quad (16)$$

où

$\Delta F, \Delta F_a, \Delta F_s$ sont respectivement les incréments de tension applicables au conducteur, à l'aluminium, et à l'acier.

β est le coefficient de dilatation linéaire (K^{-1}), (β_a pour la partie aluminium, et β_s pour la partie acier)

A est la section droite du conducteur (mm^2)

A_a fils d'aluminium

A_s fils d'acier

ΔT est l'incrément de température T

Comme $\Delta F = \Delta F_a + \Delta F_s$, les équations (14), (15) et (16) peuvent se réduire à:

$$\beta = (E_a A_a \beta_a + E_s A_s \beta_s) / EA$$

ou

$$\beta = (E_a A_a \beta_a + E_s A_s \beta_s) / (E_a A_a + E_s A_s) \quad (17)$$

Si la rigidité relative de la section d'acier à la section d'aluminium est supposée être K_1 (c'est-à-dire: $K_1 = E_s A_s / E_a A_a$), l'équation (17) se simplifie en:

$$\beta = (\beta_a + K_1 \beta_s) / (1 + K_1) \quad (18)$$

Les valeurs de β données tableau 2 pour divers modèles de conducteurs sont basées sur $\beta_a = 23 \times 10^{-6} K^{-1}$ et $\beta_s = 11,5 \times 10^{-6} K^{-1}$ et calculées selon l'équation (18) avec $E_a = 55\,000\,MPa$ et $E_s = 190\,000\,MPa$ ⁶⁾.

Dans les cas où la force de traction dans les fils d'aluminium est nulle, l'âme d'acier supporte toute la traction du conducteur. Dans de tels cas, l'allongement thermique du conducteur est identique à l'allongement de l'âme d'acier seule, soit $\beta = \beta_s$.

Tableau 2 – Coefficient de dilatation linéaire β de conducteurs composites Ax/Sxy

Fils d'aluminium	Fils d'acier	A_s/A_a	K_1	β $10^{-6} K^{-1}$
6	1	0,17	0,63	18,6
18	1	0,06	0,21	21,0
22	7	0,10	0,34	20,1
26	7	0,16	0,56	18,9
45	7	0,07	0,24	20,8
54	7	0,13	0,45	19,4
54	19	0,13	0,44	19,5
72	7	0,04	0,15	21,5
72	19	0,04	0,15	21,5
84	7	0,08	0,29	20,4
84	19	0,08	0,28	20,5

6) Cette valeur s'applique aux âmes de 7 et 19 fils. Pour des âmes plus grosses, d'autres valeurs peuvent être utilisées. Lorsque l'âme d'acier est constituée d'un fil unique, $E_s = 207\,000\,MPa$.

$$\Delta F/A E = \beta \Delta T \quad (\text{applicable to complete conductor}) \quad (16)$$

where

$\Delta F, \Delta F_a, \Delta F_s$ are respectively increments in conductor, aluminium, and steel tensions

β is the coefficient of linear expansion of conductor in K^{-1} (β_a for aluminium and β_s for steel)

A is the cross-sectional area of the conductor (mm^2)

A_a aluminium wires

A_s steel wires

ΔT is the temperature T increment

Since $\Delta F = \Delta F_a + \Delta F_s$, equations (14), (15), and (16) can be reduced to:

$$\beta = (E_a A_a \beta_a + E_s A_s \beta_s) / EA$$

or

$$\beta = (E_a A_a \beta_a + E_s A_s \beta_s) / (E_a A_a + E_s A_s) \quad (17)$$

If the relative rigidity of the steel section to the aluminum section is assumed to be K_1 (that is: $K_1 = E_s A_s / E_a A_a$), equation (17) can thus be simplified to:

$$\beta = (\beta_a + K_1 \beta_s) / (1 + K_1) \quad (18)$$

The values of β given in table 2 for various conductor designations are based on $\beta_a = 23 \times 10^{-6} K^{-1}$ and $\beta_s = 11,5 \times 10^{-6} K^{-1}$ and calculated according to equation (18) for $E_a = 55\,000\text{ MPa}$ and $E_s = 190\,000\text{ MPa}$ ⁶⁾.

In cases where tensile forces in aluminium wires are nil, the steel core carries all the conductor tension. In such cases, the thermal elongation of the conductor is identical to the elongation of the steel core alone, that is $\beta = \beta_s$.

Table 2 - Coefficient of linear expansion β of composite conductors designated Ax/Sxy

Aluminium wires	Steel wires	A_s/A_a	K_1	β $10^{-6} K^{-1}$
6	1	0,17	0,63	18,6
18	1	0,06	0,21	21,0
22	7	0,10	0,34	20,1
26	7	0,16	0,56	18,9
45	7	0,07	0,24	20,8
54	7	0,13	0,45	19,4
54	19	0,13	0,44	19,5
72	7	0,04	0,15	21,5
72	19	0,04	0,15	21,5
84	7	0,08	0,29	20,4
84	19	0,08	0,28	20,5

⁶⁾ This figure is applicable to 7-wire and 19-wire cores. For larger cores, different values may have to be used. For single wire steel core, $E_s = 207\,000\text{ MPa}$.

5.3 Propriétés de contrainte-allongement

Les courbes de contrainte-allongement des conducteurs toronnés dépendent du comportement élasto-plastique des fils constitutifs, de la disposition géométrique et du fluage métallurgique des fils. Les deux premiers paramètres sont indépendants du temps, contrairement au troisième.

Comme conséquence de la dépendance avec le temps de l'allongement du conducteur, les courbes contrainte-allongement sont toujours associées à un temps de référence.

Dans certains cas, deux courbes contrainte-allongement sont utilisées pour caractériser le comportement des conducteurs toronnés. La première est la courbe dite initiale qui inclue le fluage d'une heure, et la seconde, la courbe finale, qui inclue le fluage au bout de 10 ans à 20 °C.

Dans d'autres cas seule une courbe finale est indiquée et les conditions initiales sont fixées par une compensation de la température. De plus une courbe de fluage est parfois donnée séparément pour prévoir le fluage après un laps de temps quelconque.

La courbe contrainte-allongement des conducteurs composites (Ax/Sxy) dépend des propriétés des fils constitutifs, de leur nombre et des couches.

Dans un conducteur sujet à des charges de tension, la tension totale du conducteur, F , est égale à la somme des tensions dans les parties aluminium et acier (respectivement F_a et F_s). En outre, l'allongement total du conducteur est égal à celui de chaque composant, soit:

$$F = F_a + F_s \quad (19)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_a = \varepsilon_s \quad (20)$$

$$F/AE = F_a/A_a E_a = F_s/A_s E_s \quad (21)$$

La résolution des équations (19) à (21) en supposant dans l'équation (21) que tous les composants ont un comportement élastique, donne les résultats suivants:

$$F_a = F E_a A_a / EA \quad (22)$$

$$F_s = F E_s A_s / EA \quad (23)$$

$$E = (E_a A_a + E_s A_s) / A \quad (24)$$

Si A_a/A et A_s/A sont définis respectivement comme α_a et α_s (sections d'aluminium et d'acier exprimées en pourcentage par rapport à la section totale du conducteur), l'équation (24) devient:

$$E = E_a \alpha_a + E_s \alpha_s \quad (25)$$

L'équation (25) peut être utilisée pour établir le module d'élasticité final du conducteur composite après qu'il ait été soumis à une tension car durant la décharge, le comportement du conducteur devient élastique.

Comme les fils d'aluminium sont sujets au fluage et à l'allongement de mise en place (ε_c), l'équation (21) peut être réécrite afin d'inclure l'effet de l'allongement du fluage additionnel ε_c :

$$F/AE = F_a/A_a E_a + \varepsilon_c = F_s/A_s E_s \quad (26)$$

5.3 Stress-strain properties

Stress-strain curves of conductors depend on the elasto-plastic behaviour of the component wires, the geometric settlement and the metallurgical creep of wires. The first two parameters are not time dependent on the opposite of the third one.

As a consequence of time dependency of the conductor strain, stress-strain curves are always associated with a time reference.

In some cases, two stress-strain curves are used to characterize behaviour of conductors. The first one is the initial curve which includes the one-hour creep and the second one, the final curve, which includes the 10-year creep at 20 °C.

In other cases, only a final curve is given and initial conditions are derived through a temperature compensation. Furthermore, a separate creep curve is sometimes provided to predict creep after any period of time.

The stress-strain behaviour of composite conductors (Ax/Sxy) depend on the properties of the constituent wires, their number and layers.

In a conductor subjected to tensile loads, the total conductor tension, F , is equal to the sum of tensions in the aluminium and steel portions (respectively F_a and F_s). Furthermore, the total conductor elongation is equal to that of each component, i.e.:

$$F = F_a + F_s \quad (19)$$

$$\epsilon = \epsilon_a = \epsilon_s \quad (20)$$

$$F/AE = F_a/A_a E_a = F_s/A_s E_s \quad (21)$$

Resolving equations (19) to (21), where it is assumed (in equation 21) that all components behave elastically, leads to the following results:

$$F_a = F E_a A_a / EA \quad (22)$$

$$F_s = F E_s A_s / EA \quad (23)$$

$$E = (E_a A_a + E_s A_s) / A \quad (24)$$

If A_a/A and A_s/A are respectively defined as α_a and α_s (aluminium and steel areas expressed as percentage of the total conductor area), then equation (24) can be rewritten:

$$E = E_a \alpha_a + E_s \alpha_s \quad (25)$$

Equation (25) can be used to establish the final elastic modulus of elasticity of the composite conductor after being subjected to tension because during unloading the behaviour of the conductor becomes elastic.

Since aluminium wires are subjected to creep and settlement strain (ϵ_c), equation (21) can be rewritten in order to include the effect of this additional creep strain ϵ_c :

$$F/A E = F_a/A_a E_a + \epsilon_c = F_s/A_s E_s \quad (26)$$

Après résolution des équations (19) et (26), on obtient les résultats suivants:

$$F_a = F E_a A_a (1 - \varepsilon_c E_s A_s / F) / EA \quad (27)$$

$$F_s = F E_s A_s (1 + \varepsilon_c E_a A_a / F) / EA \quad (28)$$

$$E = (E_a \alpha_a + E_s \alpha_s) / (1 + \varepsilon_c E_a A_a / F) \quad (29)$$

Après comparaison des équations (27), (28) et (29) avec les équations (22), (23) et (24), on en déduit les résultats suivants:

- le fluage des fils d'aluminium réduit la force de tension supportée par ces fils et transfère cette charge aux fils d'acier. L'importance de la réduction de la tension dans les fils d'aluminium peut être obtenue en faisant la différence de F_a des équations (22) et (27), soit:

$$\Delta F_a = (E_a A_a E_s A_s) \varepsilon_c / EA \quad (30)$$

- la tension dans les fils d'aluminium décroît avec le fluage. Sous des conditions extrêmes, les fils d'aluminium ne supporteront aucune charge, soit quand

$$\varepsilon_c = F / E_s A_s \quad (31)$$

Dans ce cas, les fils d'aluminium deviennent complètement desserrés et toute la tension du conducteur est transférée à l'âme d'acier. On peut rencontrer la même condition en utilisant les conducteurs à des températures très élevées, de l'ordre de 125 °C à 150 °C.

Des études récentes ont montré que, dans les conducteurs à couches multiples, les fils d'aluminium peuvent subir des charges de compression (n'excédant pas 5 MPa à 10 MPa) avant le gonflement des brins externes (formation de cage d'oiseau) qui peuvent forcer l'âme d'acier à supporter davantage de tension que la tension totale du conducteur. Pour des raisons pratiques, les contraintes de compression peuvent être négligées à moins que le conducteur suspendu soit exposé à subir des températures très élevées.

5.4 Etablissement du module d'élasticité final

Le module d'élasticité final des conducteurs toronnés peut être obtenu à partir de l'équation (25) ($E = E_a \alpha_a + E_s \alpha_s$) dans laquelle E_a et E_s sont respectivement les modules d'élasticité de l'aluminium et de l'acier.

Si les fils d'aluminium et d'acier d'un conducteur étaient des fils solides rectilignes, leurs modules d'élasticité $E_a = 68\,000$ MPa et $E_s = 207\,000$ MPa donnés respectivement dans la CEI 888 et dans la CEI 889, pourraient être utilisés directement dans l'équation (25).

Toutefois, comme les fils sont enroulés selon une hélice, un allongement unitaire selon l'axe du conducteur entraîne moins d'allongement dans l'axe du fil et réduit ainsi le module d'élasticité effectif.

En outre, la compression radiale entre les couches au point de contact des fils tend également à créer de l'allongement le long de l'axe du conducteur.

Pour ces raisons, le module d'élasticité de la section d'aluminium tend à diminuer avec l'augmentation du nombre de couches et de fils. Il en est de même pour les couches de fils d'acier, mais à degré moindre à cause de la dureté superficielle aux points de contact.

Resolving equations (19) and (26) leads to the following results:

$$F_a = F E_a A_a (1 - \epsilon_c E_s A_s / F) / E A \quad (27)$$

$$F_s = F E_s A_s (1 + \epsilon_c E_a A_a / F) / E A \quad (28)$$

$$E = (E_a \alpha_a + E_s \alpha_s) / (1 + \epsilon_c E_a A_a / F) \quad (29)$$

When equations (27), (28) and (29) are compared with equations (22), (23) and (24), the following results can be derived:

- creep of aluminium wires reduces the tensile load carried by these wires and transfers this load to steel wires. The amount of reduction in the tension of aluminium wires can be obtained by subtracting F_a in equation (27) from F_a in equation (22) which corresponds to:

$$\Delta F_a = (E_a A_a E_s A_s) \epsilon_c / E A \quad (30)$$

- the tension in aluminium wires decreases with creep. Under extreme conditions aluminium wires will not carry any tensile load, i.e. when

$$\epsilon_c = F / E_s A_s \quad (31)$$

In this case, aluminium wires become completely slack and all the conductor tension is transferred to the steel core. The same condition can result from using conductors at very high temperatures in the order of 125 °C to 150 °C.

Recent studies have indicated that in multiple-layer conductors, the aluminium wires can carry some compressive load (stresses not exceeding 5 MPa to 10 MPa) before birdcaging which can force the steel core to carry more tension than the total conductor tension. For practical reasons, compressive stresses can be neglected unless the suspended conductor is expected to be subjected to very high temperatures.

5.4 Assessment of final elastic modulus

The final modulus of elasticity of conductors can be derived from equation (25) ($E = E_a \alpha_a + E_s \alpha_s$) where E_a and E_s are respectively the aluminium and steel moduli.

If the aluminium and steel wires of a conductor were straight solid wires, their corresponding moduli of elasticity of $E_a = 68\,000$ MPa and $E_s = 207\,000$ MPa given in IEC 888 and 889 could have been used directly in equation (25).

However, since wires are helically wound, a unit elongation along the axis of the conductor leads to less strain in the axis of the wire and thus reduces the effective modulus of elasticity.

Furthermore, the radial compression between layers at contact points of wires tends also to generate strain along the axis of the conductor.

For the above reasons, the modulus of elasticity of the aluminium portion tends to decrease with increasing number of layers and wires. The same applies to steel wire layers, but to a lesser degree, due to the surface hardness at contact points.

La meilleure façon d'appréhender les caractéristiques de charge-allongement de la partie aluminium d'un conducteur est de réaliser des essais de charge-allongement comme suggéré dans la CEI 1089.

En l'absence de tels résultats, les valeurs trouvées dans la littérature peuvent être utilisées pour obtenir par calcul une courbe charge-allongement des conducteurs toronnés. Ces valeurs sont fondées sur l'une ou l'autre des méthodes suivantes:

- a) en prenant la moyenne des valeurs obtenues aux essais de câblage similaire et généraliser les résultats. Les valeurs données au tableau 3 sont fondées sur des courbes publiées par l'Aluminum Association [1] et peuvent présenter une bonne approximation en l'absence de résultats directs.
- b) en utilisant l'équation (25) et en supposant constants les modules d'élasticité $E_a = 55\ 000\ \text{MPa}$ et $E_s = 190\ 000\ \text{MPa}$ ⁷⁾. Les résultats donnés par cette méthode figurent au tableau 4 et sont en accord à moins de 5 % avec ceux obtenus par la méthode a).
- c) en prenant le module d'un fil d'acier unitaire et des fils d'aluminium et en réduisant ces valeurs par les facteurs suivants: 0,80 à 0,90 pour les fils A1, 0,85 à 0,95 pour les fils A2 et A3, et 0,90 à 0,95 pour les fils d'acier.

A noter toutefois que les variations de l'ordre de 5 % dans le module d'élasticité final conduisent à une variation de flèche inférieure à 1 %.

⁷⁾ Sauf lorsque l'âme d'acier est constituée d'un fil unique $E_s = 207\ 000\ \text{MPa}$.

The ideal way to generate the stress-strain characteristics of the aluminium portion of a conductor is to perform stress-strain tests as suggested in IEC 1089.

In the absence of such data, values found in the technical literature can be used in order to obtain approximate stress-strain calculations of conductors. These values are based on one of the following methods:

- a) average the values obtained from tests of similar stranding and generalize the results. Values given in table 3 are based on published curves of the Aluminum Association [1] and should represent a good approximation in the absence of direct test data.
- b) use equation (25) and assume $E_a = 55\,000\text{ MPa}$ and $E_s = 190\,000\text{ MPa}$ constant⁷⁾. The results of this method are given in table 4 and agree to within 5 % of those obtained in method a).
- c) start from the modulus of single steel and aluminium wires and reduce them by the following factors: 0,80 to 0,90 for A1 wires, 0,85 to 0,95 for A2 and A3 wires, and 0,90 to 0,95 for steel wires.

It is however noted that variations in the final modulus of elasticity in the order of 5 % usually lead to final sag variations less than 1 %.

⁷⁾ Except for single, steel wire core where $E_s = 207\,000\text{ MPa}$.

Tableau 3 – Résultats de contrainte-allongement de conducteurs toronnés tirés de résultats d'essais publiés

Données de conducteurs				Allongement du conducteur en %					
Type	Ax	Sx	Module final MPa × 10 ³	Niveau de contrainte MPa					
				25	50	75	100	125	150
Ax*)	7	0	63,3	0,05	0,11	0,17	0,26	0,39	0,58
	19	0	61,2	0,05	0,11	0,18	0,27	0,41	0,60
	37	0	58,9	0,05	0,11	0,18	0,27	0,41	0,60
	61	0	58,3	0,06	0,12	0,20	0,30	0,44	0,64
Ax/Sxy	6	1	79,0	0,04	0,08	0,11	0,15	0,20	0,25
	18	1	68,0	0,05	0,10	0,15	0,21	0,27	0,36
	22	7	71,0	0,05	0,09	0,15	0,20	0,25	0,33
	26	7	74,2	0,05	0,09	0,14	0,18	0,23	0,28
	45	7	64,5	0,06	0,11	0,16	0,22	0,29	0,38
	54	7	67,1	0,05	0,10	0,15	0,20	0,26	0,33
	54	19	69,7	0,05	0,09	0,14	0,19	0,25	0,31
	72	7	61,1	0,07	0,12	0,18	0,24	0,31	0,41
	72	19	61,0	0,07	0,12	0,18	0,24	0,32	0,42
	84	7	66,6	0,05	0,09	0,15	0,21	0,28	0,36
	84	19	66,5	0,05	0,09	0,14	0,20	0,27	0,35

* Valeurs pour A1, qui peuvent également être utilisées pour A2 et A3 en l'absence de résultats d'essais adéquats.

Tableau 4 – Module final d'élasticité calculé avec $E_a = 55\ 000$ MPa et $E_s = 190\ 000$ MPa⁸⁾

Fils d'aluminium	Fils d'acier	Rapport aluminium α_a	Rapport acier α_s	Module d'élasticité MPa × 10 ³
6	1	0,857	0,143	76,7
18	1	0,947	0,053	63,1
22	7	0,910	0,090	67,1
26	7	0,860	0,140	73,9
45	7	0,935	0,065	63,7
54	7	0,885	0,115	70,5
54	19	0,888	0,112	70,2
72	7	0,959	0,041	60,6
72	19	0,959	0,041	60,5
84	7	0,923	0,077	65,4
84	19	0,925	0,075	65,2

8) Sauf lorsque l'âme d'acier est constituée d'un fil unique, alors $E_s = 207\ 000$ MPa.

Table 3 – Typical stress-strain data of stranded conductors based on published test results

Conductor data				Strain of conductor in %					
Type	Ax	Sx	Final modulus MPa × 10 ³	Stress levels MPa					
				25	50	75	100	125	150
Ax*)	7	0	63,3	0,05	0,11	0,17	0,26	0,39	0,58
	19	0	61,2	0,05	0,11	0,18	0,27	0,41	0,60
	37	0	58,9	0,05	0,11	0,18	0,27	0,41	0,60
	61	0	58,3	0,06	0,12	0,20	0,30	0,44	0,64
Ax/Sxy	6	1	79,0	0,04	0,08	0,11	0,15	0,20	0,25
	18	1	68,0	0,05	0,10	0,15	0,21	0,27	0,36
	22	7	71,0	0,05	0,09	0,15	0,20	0,25	0,33
	26	7	74,2	0,05	0,09	0,14	0,18	0,23	0,28
	45	7	64,5	0,06	0,11	0,16	0,22	0,29	0,38
	54	7	67,1	0,05	0,10	0,15	0,20	0,26	0,33
	54	19	69,7	0,05	0,09	0,14	0,19	0,25	0,31
	72	7	61,1	0,07	0,12	0,18	0,24	0,31	0,41
	72	19	61,0	0,07	0,12	0,18	0,24	0,32	0,42
	84	7	66,6	0,05	0,09	0,15	0,21	0,28	0,36
	84	19	66,5	0,05	0,09	0,14	0,20	0,27	0,35

* Values derived for A1, but can also be used for A2 and A3 in the absence of relevant test data.

Table 4 – Final modulus of elasticity calculated with $E_a = 55\,000$ MPa and $E_s = 190\,000$ MPa⁸⁾

Aluminium wires	Steel wires	Aluminum ratio α_a	Steel ratio α_s	Elasticity modulus in MPa × 10 ³
6	1	0,857	0,143	76,7
18	1	0,947	0,053	63,1
22	7	0,910	0,090	67,1
26	7	0,860	0,140	73,9
45	7	0,935	0,065	63,7
54	7	0,885	0,115	70,5
54	19	0,888	0,112	70,2
72	7	0,959	0,041	60,6
72	19	0,959	0,041	60,5
84	7	0,923	0,077	65,4
84	19	0,925	0,075	65,2

⁸⁾ Except for single-wire steel core where $E_s = 207\,000$ MPa.

6 Fluage du conducteur

6.1 Généralités

Un conducteur suspendu entre deux supports voit sa flèche augmenter dans le temps, phénomène qui doit être pris en compte par l'ingénieur de ligne afin de satisfaire les gardes requises au sol et aux traversées. Cette augmentation de flèche est due à un phénomène propre au matériau, appelé fluage, défini comme étant une déformation à long terme dépendant des forces appliquées.

De nombreuses investigations ont été réalisées à travers le monde pour calculer ou mesurer le fluage des conducteurs afin de prévoir l'allongement final et, par conséquent, la flèche finale.

L'idée générale est que l'allongement total du conducteur peut être divisé en deux termes. L'un est principalement celui dû à la mise en place géométrique quand les fils sont resserrés ensemble, initiant des contraintes à leurs points de croisement. L'autre est considéré comme un fluage purement métallurgique des fils.

A noter que des informations plus détaillées sur le fluage du conducteur sont actuellement à l'étude au sein du TC7 de la CEI.

6.2 Fluage des fils unitaires

Lors de l'essai de fluage d'un conducteur, une certaine charge est appliquée et l'allongement est enregistré en fonction du temps. Si l'allongement est reporté sur une double échelle logarithmique, on obtiendra une droite comme indiqué à la figure 1.

C'est aussi le cas quand l'essai est fait uniquement sur un fil d'aluminium.

6 Conductor creep

6.1 General

A conductor suspended between two supports will in time get an increase in sag which must be considered by the transmission line engineer in order to satisfy the required ground and crossing clearances. This additional sag is caused by a characteristic of the material called creep, normally defined as the long-term change in shape depending on applied forces.

Many investigations have been made throughout the world to calculate or measure the creep in conductors in order to predict the final elongation and thus the final sag.

A general finding is that the total elongation for conductors can be divided into two different parts: One being mainly a geometric settlement when wires are tightened together initiating stresses at wire cross-over points. The other is regarded as a pure metallurgical creep within the wires.

Note that a more detailed information on conductor creep is currently being studied by IEC/TC7.

6.2 Creep of single wires

When creep testing a conductor, a certain load is applied and the elongation is recorded versus the time. If the elongation is plotted on a double logarithmic diagram the readings will likely follow a straight line as in figure 1.

This is also the case when testing only an aluminium wire.

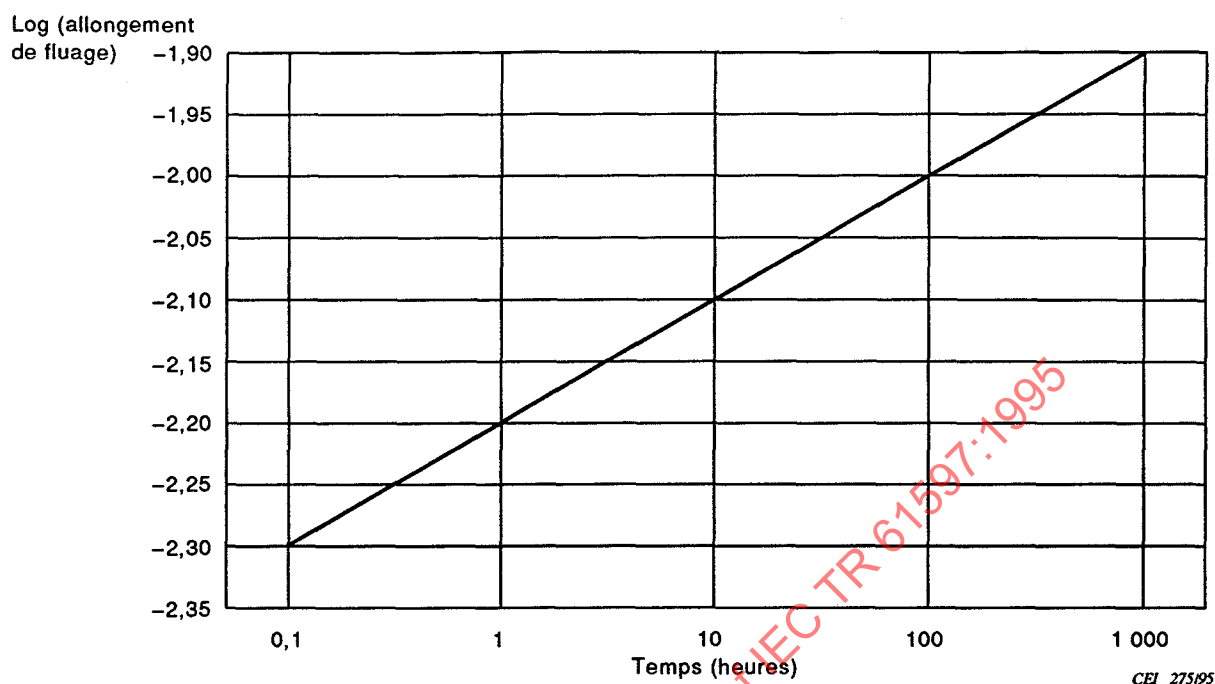


Figure 1 – Courbe de fluage typique

L'équation de la droite est:

$$\lg \varepsilon_c = \lg a + b \times \lg t \quad (32)$$

ou

$$\varepsilon_c = a \times t^b \quad (33)$$

Les valeurs de a et b sont uniquement valables pour un historique en charge et des températures donnés.

6.3 Fluage total du conducteur

L'allongement total dû au fluage pour différentes charges et températures est donné par l'équation (34):

$$\varepsilon_c = K_c \times e^{\phi T} \times \sigma^\psi \times t^\mu \quad (34)$$

où

K_c est le coefficient de fluage fonction principalement du nombre de fils du conducteur

ϕ est le coefficient dépendant de la température (T)

ψ est le coefficient dépendant de la contrainte (σ)

μ est l'exposant dépendant du temps (t).

Pour déterminer ces coefficients, des essais doivent être réalisés selon une procédure très précise. La raison en est qu'une grande part du fluage se manifeste au démarrage immédiat de l'essai. La méthode de mise en charge du conducteur et la lecture de l'allongement doivent donc être très précises.

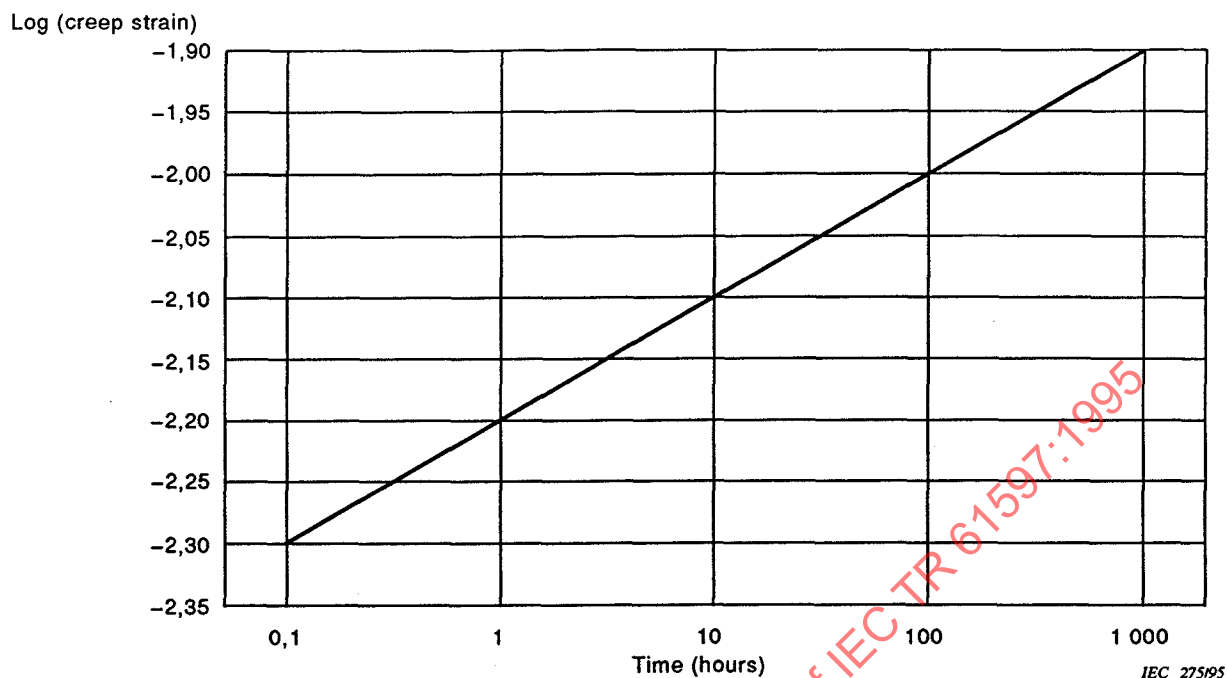


Figure 1 – Typical creep curve

The equation for the straight line is:

$$\lg \varepsilon_c = \lg a + b \times \lg t \quad (32)$$

or

$$\varepsilon_c = a \times t^b \quad (33)$$

The constants a and b are only valid for given load history and temperatures.

6.3 Total conductor creep

The total creep elongation for different loads and temperature has been shown to follow equation (34):

$$\varepsilon_c = K_c \times e^{\phi T} \times \sigma^\psi \times t^\mu \quad (34)$$

where

K_c is the creep coefficient depending mainly on number of wires in the conductor

ϕ is the coefficient for the temperature (T) dependence

ψ is the coefficient for the stress (σ) dependence

μ is the coefficient for the time (t) dependence

In order to determine these coefficients, tests must be made according to a very precise procedure. The reason for this is that a large portion of the creep will take place in the very beginning of the test. The method for loading the conductor and starting the reading of the elongation must therefore be accurate.

Les coefficients K_c , ϕ , ψ et μ dépendent du nombre de fils constitutifs et des matériaux. Ceci, ajouté au fait que les essais de fluage durent longtemps, complique la détermination des coefficients de l'équation de fluage.

6.4 Prévion du fluage du conducteur

Différentes méthodes ont été employées pour prédire le fluage d'un conducteur au cours de sa vie.

- a) en utilisant une formule de prévion de fluage comme expliqué en 6.2 et établir a priori un historique de la vie du conducteur en incluant diverses conditions telles que les charges mécaniques normales et les surcharges mécaniques des conducteurs, et la température. Les coefficients dans la formule de prévion du fluage doivent être connus.
- b) en utilisant les valeurs de fluage obtenues à partir des essais de fluage réalisés dans des conditions réelles de charge et de température d'une durée d'au moins deux mois, et extrapoler la courbe de fluage jusqu'à 10, 30 ou 50 ans. Normalement, le calcul de la flèche finale est fait à partir d'une valeur de fluage à 10 ans. La raison en est que le fluage supplémentaire de 10 ans à 50 ans est relativement faible et qu'une quantité raisonnable de fluage s'est produite entre le moment du déroulage et le moment du manchonnage.
- c) en utilisant les valeurs de fluage obtenues lors d'essais accélérés effectués sous une tension mécanique plus élevée. La valeur du fluage à un certain moment correspond alors à celle sous conditions réelles après 30 ans.

Toutes ces méthodes donnent une valeur finale de fluage. Afin de simplifier les calculs de flèche de conducteur, l'allongement dû au fluage peut être simulé par une différence de température au moyen du coefficient de dilatation linéaire donné dans ce document.

6.5 Valeurs de fluage

Les valeurs de fluage sont données ci-dessous, ainsi que leur correspondance en température. Ces valeurs ont été obtenues à partir de valeurs moyennes arrondies tirées de nombreux essais de fluage. Il faut signaler que ces valeurs se rapportent à des conducteurs courants maintenus sous des tensions courantes. Dans certains cas, des conducteurs spéciaux ou/et des techniques de prétention réduisent le fluage de façon significative. De même, des conditions anormales telles que, par exemple, de très hautes températures ou des tensions de chaque jour élevées, peuvent augmenter le fluage par rapport aux chiffres donnés au tableau 5.

Tableau 5 – Valeurs typiques de fluage pour conducteurs toronnés

Type de conducteur	Fluage estimé après 10 ans $\mu\text{m/m}$	Ecart de température équivalent $^{\circ}\text{C}$
A1	800	35
A2, A3	500	22
A1/A2, A1/A3	700	30
A1/Sxy	500	25

The coefficients K_c , ϕ , ψ and μ are shown to depend upon the number of component wires and their materials. This together with the fact that creep tests take a long time to perform complicate the establishing of the creep equation coefficients.

6.4 Prediction of conductor creep

Different techniques have been used to predict the life-time creep for a conductor:

a) using a creep predictor formula as explained in 6.2 together with an anticipated life-time history including different conductor conditions such as normal and overload mechanical and temperature. Coefficients in the predictor creep formula must be known.

b) using creep values from conductor creep tests made at actual mechanical and temperature conditions under long time (normally more than two months) and extrapolate the creep curve up to 10, 30 or 50 years. Normally the final sag calculation is made by using the creep at 10 years. The reason for this is that the additional creep from 10 to 50 years is relatively small and that a reasonable amount of the creep may have been elapsed from the time of stringing up to the time of clamping in the conductor.

c) using creep values from accelerated conductor creep tests made at a higher mechanical tension. The creep value at a certain time will then correspond to what is known to be found under real conditions after 30 years.

For all these methods a final creep value is obtained. In order to simplify the conductor sag calculation, the elongation due to creep can be simulated by a temperature difference using the coefficient of linear expansion given in this document.

6.5 Creep values

The following creep values and correspondingly calculated temperature are typical. The values have been taken as rounded mean values from many creep tests reported. It may be pointed out that these values refer to ordinary conductors and ordinary stringing tensions. In some cases especially designed conductors and/or prestress stringing techniques significantly reduce the creep. Also abnormal conductor conditions such as, for example, very high temperatures or high everyday tensions could be expected to increase the creep more than that mentioned in table 5.

Table 5 – Typical creep values of stranded conductors

Type of conductor	Estimated creep after 10 years $\mu\text{m/m}$	Equivalent temperature difference $^{\circ}\text{C}$
A1	800	35
A2, A3	500	22
A1/A2, A1/A3	700	30
A1/Sxy	500	25

7 Perte de résistance

Le passage d'un courant électrique dans un conducteur crée un échauffement qui a un effet de recuit sur l'aluminium et un effet combiné de recuit et de survenu sur l'alliage d'aluminium, causant ainsi une perte de résistance. L'importance de cette perte dépend de la température et de la durée, et l'effet est cumulatif: 10 heures chaque année pendant 10 ans ont un effet identique à un chauffage permanent du conducteur pendant 100 heures à cette même température.

La perte en résistance varie avec la méthode de fabrication et les valeurs données dans cet article le sont simplement à titre informatif. Pour l'alliage d'aluminium, les valeurs données couvrent uniquement les fils ayant subi un traitement thermique après tréfilage.

Le pourcentage de réduction en résistance mécanique de l'aluminium A1 pour différentes températures et durées est donné à la figure 2, tandis que la figure 3 se rapporte à l'alliage d'aluminium (traité thermiquement après tréfilage). Ces valeurs proviennent de diverses sources et résultats d'essais. Il est à noter que ces valeurs ne s'appliquent pas aux alliages qui n'ont pas été traités thermiquement après tréfilage ou avant câblage.

Des données sur la perte de résistance due aux combinaisons de températures élevées et de durées variables n'ont pas pu être obtenues de l'industrie.

C'est une pratique courante de limiter les températures de fonctionnement à 80 °C environ, et à 125 °C en cas de surcharge.

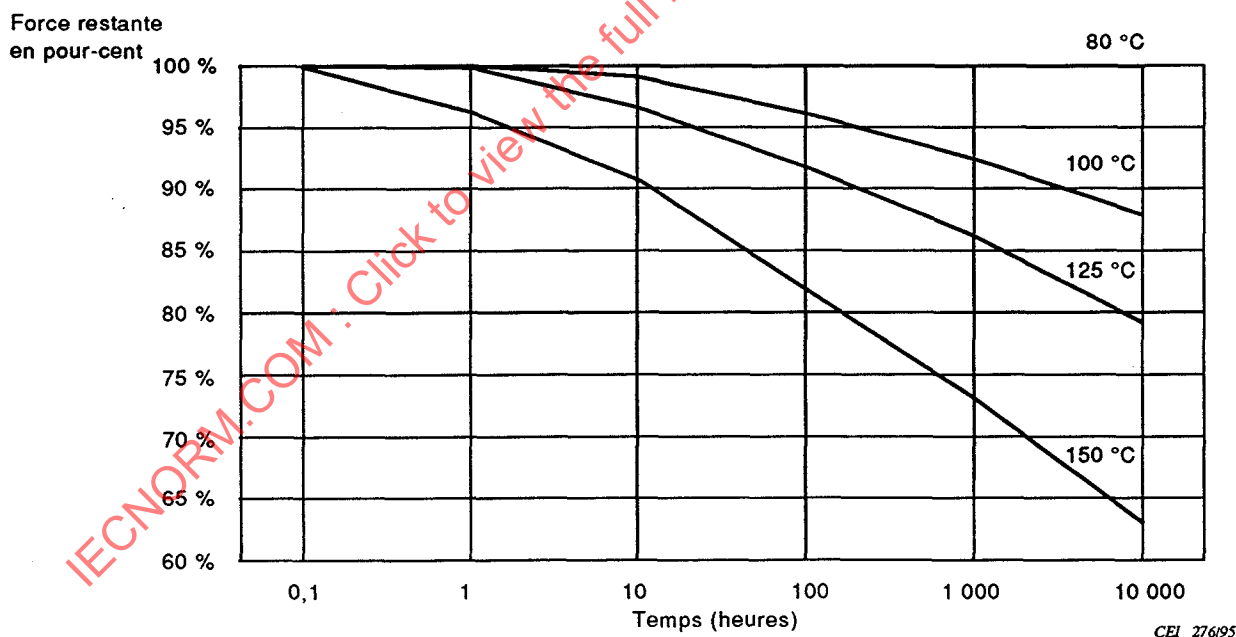


Figure 2 – Perte de résistance de l'aluminium A1 en fonction de la température

NOTES applicables aux figures 2 et 3:

- Des expositions de longue durée de fils d'aluminium à des températures n'excédant pas 50 °C n'amèneraient aucune perte de résistance due à la température.
- A des températures n'excédant pas 80 °C, la perte maximum de résistance avec le temps ne dépasse pas 3 % pour l'alliage d'aluminium et est négligeable pour l'aluminium A1.

7 Loss of strength

The passage of electric current through a conductor causes a rise in temperature which can have an annealing effect on aluminium and a combined annealing/over-ageing effect on aluminium alloy, thus causing a loss of strength. The amount of strength that is lost depends on the temperature and the duration, and the effect is cumulative: 10 hours each year for 10 years has a similar effect to heating the conductor continuously for 100 hours at the same temperature.

The loss of strength will vary with the method of manufacture and the values quoted in this clause are for guidance only. For aluminium alloy the information provided covers only wires which have received a heat treatment after drawing.

The percentage reduction in tensile strength of aluminium A1 at different temperatures and durations is shown in figure 2, while figure 3 shows the same for aluminium alloy (finally heat-treated). These figures are based on data assembled from various sources and test results. Note these values are not applicable to alloys which have not received heat treatment after drawing or before stranding.

Information regarding loss of strength due to combinations of high temperatures of various durations is not available from the industry.

It is normal practice to limit operating temperatures to about 80 °C and emergency load temperatures to 125 °C.

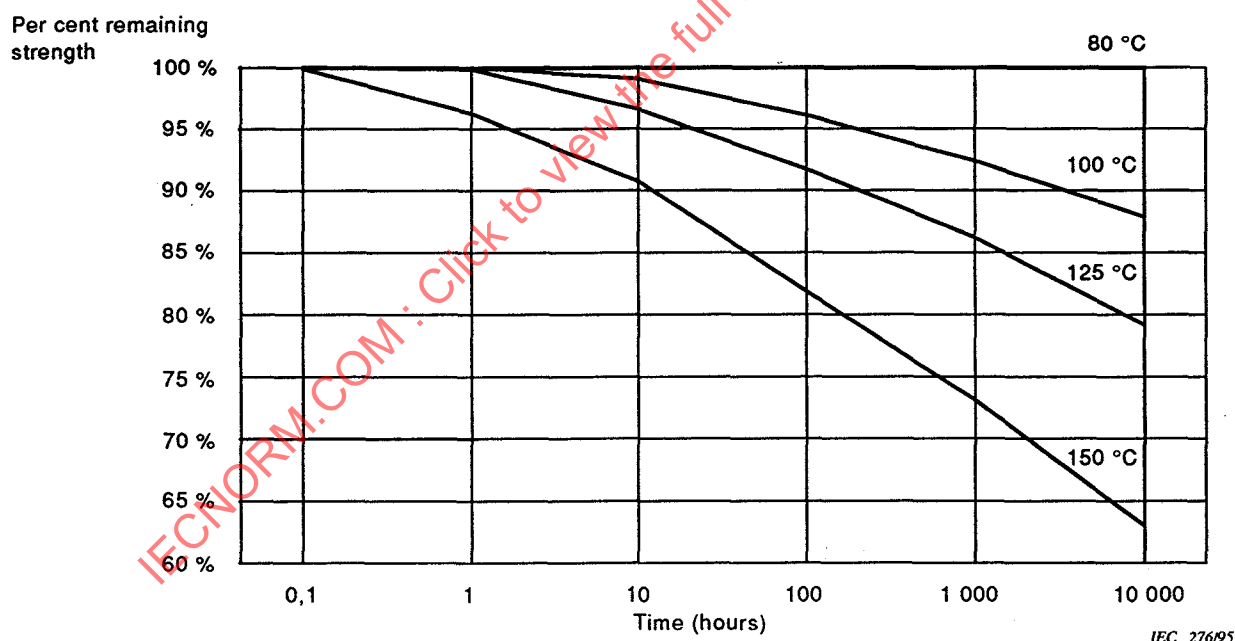


Figure 2 – Loss of strength of aluminium A1 as a function of temperature

NOTES applicable to figures 2 and 3:

- 1 Long-term exposure of aluminium wires to temperatures not exceeding 50 °C should not lead to any practical loss of strength due to temperature.
- 2 At temperatures not exceeding 80 °C, the maximum loss of strength with time should not exceed 3 % for aluminium alloy and is negligible for A1 aluminium.

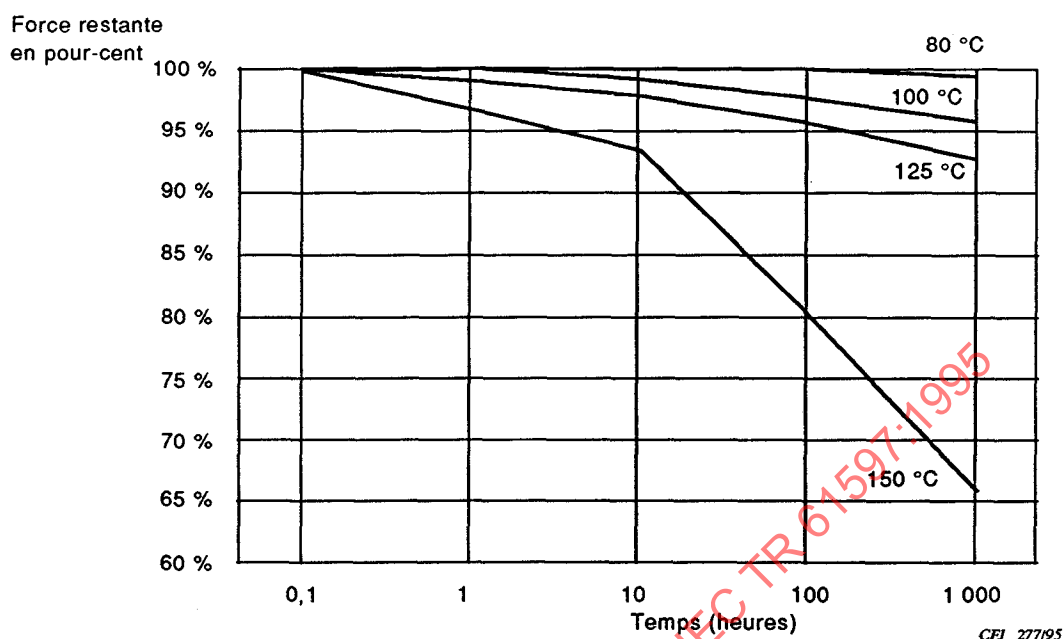


Figure 3 – Perte de résistance de l'aluminium A2

8 Calcul de la longueur maximum du conducteur sur tourets

8.1 Bases de calcul

Le volume utile V_{dr} d'un touret est donné par l'équation (35). Ce volume est décrit à la figure 4.

$$V_{dr} = (\pi d_1^2 - \pi d_2^2) B / 4 \quad (35)$$

où

V_{dr} est le volume utile du touret (m^3)

d_1, d_2 sont les diamètres extérieur et intérieur du tambour (m)

B est la largeur intérieure du fût du touret (ou tambour) (m)

Il est de pratique courante que le diamètre minimal interne du fût du touret d_2 soit au moins égal à 30 fois le diamètre du conducteur⁹⁾.

⁹⁾ Des conducteurs à couche unique peuvent nécessiter des valeurs plus élevées.

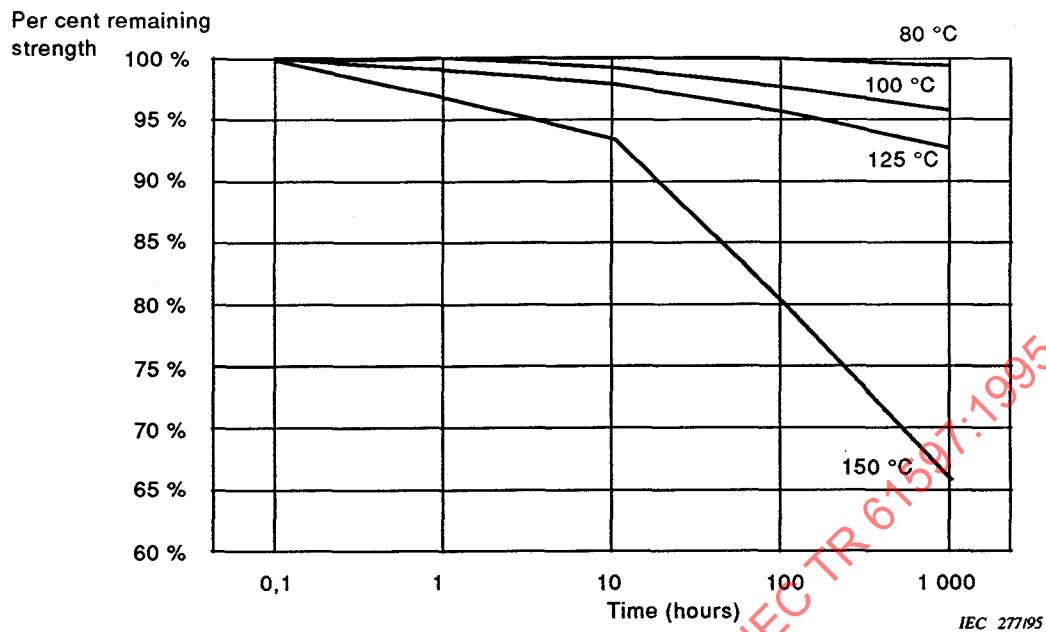


Figure 3 – Loss of strength of aluminium A2

8 Calculation of maximum conductor length on drums

8.1 Basis of calculation

The coiling volume V_{dr} of a drum is given by equation (35). This volume is described in figure 4.

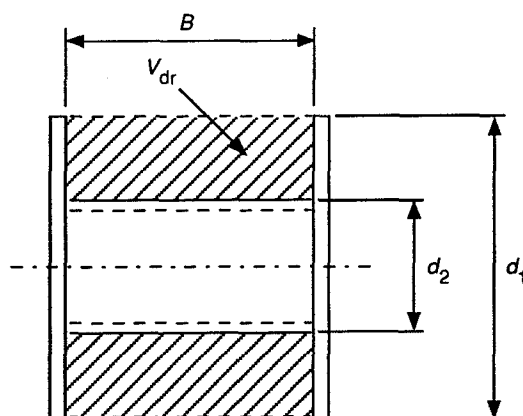
$$V_{dr} = (\pi d_1^2 - \pi d_2^2) B / 4 \quad (35)$$

where

- V_{dr} is the coiling volume in a drum (m^3)
- d_1, d_2 are the outside and inside diameters of a drum (m)
- B is the internal width of a drum (m)

It is normal practice that the minimum inside drum diameter d_2 be equal to at least 30 times the conductor diameter⁹⁾.

⁹⁾ Single layer conductors may require higher values.



CEI 278/95

Figure 4 – Volume utile dans un touret

8.2 Facteur de remplissage

La quantité de conducteur qui peut être enroulée sur un touret dépend des vides entre les spires du conducteur. Si le facteur de remplissage est défini comme le rapport du volume utilisé au volume total, deux cas extrêmes sont à considérer, chacun correspondant à un facteur de remplissage indiqué aux figures 5a et 5b.

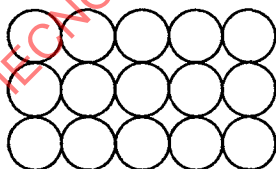
Le facteur de remplissage¹⁰⁾ k_p , applicable à la figure 5a (vide maximal entre les couches de conducteur), devient égal à:

$$k_p = \pi/4 = 0,785 \quad (36)$$

Dans le cas de la figure 5b où les vides entre les conducteurs sont minimaux, k_p devient égal à:

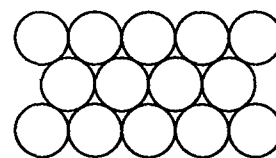
$$k_p = \pi/2 \times 1,732 = 0,907 \quad (37)$$

Normalement, $k_p = 0,87$ est considéré comme suffisant pour la pratique courante.



CEI 279/95

Figure 5a – Vide maximal

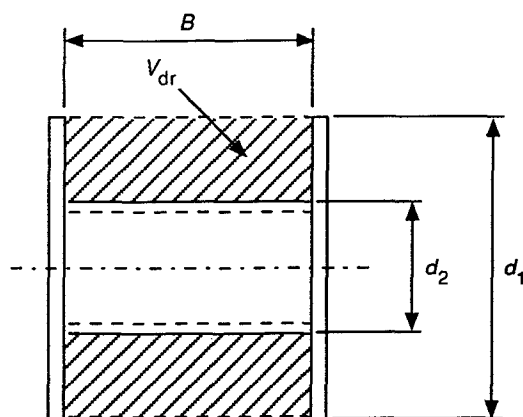


CEI 280/95

Figure 5b – Vide minimal

Figure 5 – Vide entre les spires

¹⁰⁾ Ce facteur de remplissage est valable pour des rapports de largeur de tourets, au diamètre du conducteur d'au moins 20.



IEC 278/95

Figure 4 – Colling volume in a drum

8.2 Packing factor

The amount of conductor that can be coiled in a drum depends on the voids between turns of the conductor. If the packing factor is defined as the ratio of available volume to the total volume, two extreme cases can be considered, each one corresponding to a packing factor as indicated in figures 5a and 5b.

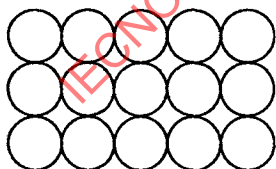
The packing factor¹⁰⁾ k_p applicable to figure 5a (maximum void between conductor layers) becomes equal to:

$$k_p = \pi/4 = 0,785 \quad (36)$$

In case of figure 5b where the voids between conductors are minimum, k_p becomes equal to:

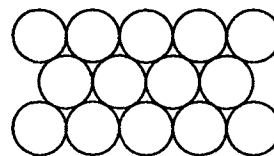
$$k_p = \pi/2 \times 1,732 = 0,907 \quad (37)$$

Usually, $k_p = 0,87$ is considered sufficient for practical operations.



IEC 279/95

Figure 5a – Maximum void



IEC 280/95

Figure 5b – Minimum void

Figure 5 – Void between turns

¹⁰⁾ This packing factor is valid for ratios of drum width to diameter of conductor in the order of 20 and more.

8.3 Espace entre la dernière couche et le douvage (garde au sol)

Il est courant de laisser un espace d'à peu près deux fois le diamètre du conducteur entre la surface extérieure du conducteur et le douvage du touret. En sachant que les petits conducteurs sont habituellement bobinés sur des petits tourets et les gros conducteurs sur des plus grands tourets, les valeurs données au tableau 6 sont recommandées.

Tableau 6 – Espace entre douvage et surface du conducteur

Diamètre extérieur d_1 m	Espace moyen entre le douvage et le conducteur cm
1,2	5
1,4	5
1,6	7
1,8	8
2,0	8
2,2	10
2,5	10

L'espace donné dans le tableau 6 correspond à peu près à un facteur de garde au sol de $k_s = 0,8$ appliqué au volume V_{dr} .

En utilisant l'équation (35), la longueur maximale du conducteur sur un touret peut être calculée ainsi:

$$V_{dr} k_s k_p = D^2 L \pi / 4 \quad (38)$$

ce qui mène à:

$$L = 0,886 V_{dr} / D^2 \approx 0,89 V_{dr} / D^2 \quad (39)$$

où

k_s est le facteur de garde au sol = 0,8

k_p est le facteur de remplissage = 0,87

V_{dr} est le volume utile du touret (m^3)

D est le diamètre du conducteur (m)

L est la longueur maximale de conducteur (m)

8.4 Exemple numérique

Hypothèses:

$d_1 = 1,6$ m (diamètre extérieur)

$V_{dr} = 1,357$ m^3

$D = 0,0171$ m (diamètre du conducteur)

Par conséquent, la longueur totale de conducteur est:

$$L = 0,89 \times 1,357 / 0,0171^2 = 4\,130 \text{ m}$$

8.3 Space between last conductor layer and lagging

It is usual to leave a space of approximately two conductor diameters between the external surface of the conductor and the lagging. Considering that small conductors are usually coiled on small drums and big conductors on larger size drums, the values given in table 6 are recommended.

Table 6 – Space between lagging and conductor surface

Outside drum diameter d_1 m	Approximate space between lagging and conductor cm
1,2	5
1,4	5
1,6	7
1,8	8
2,0	8
2,2	10
2,5	10

The space given in table 6 corresponds approximately to a reduction factor $k_s = 0,8$ applied to volume V_{dr} .

Using equation (35), the maximum conductor length in a drum can now be calculated as follows:

$$V_{dr} k_s k_p = D^2 L \pi / 4 \quad (38)$$

This leads to:

$$L = 0,886 V_{dr} / D^2 \approx 0,89 V_{dr} / D^2 \quad (39)$$

where

k_s is the space factor = 0,8

k_p is the packing factor = 0,87

V_{dr} is the drum volume (m^3)

D is the conductor diameter (m)

L is the maximum conductor length (m)

8.4 Numerical example

Assume a drum with:

$d_1 = 1,6$ m (outside diameter)

$V_{dr} = 1,357$ m^3

$D = 0,0171$ m (conductor diameter)

Thus the maximum length of conductor is:

$$L = 0,89 \times 1,357 / 0,0171^2 = 4\,130 \text{ m}$$

Annexe A (informative)

Capacité de courant transporté

Toutes les valeurs données dans les tableaux bilingues de cette annexe sont basées sur les hypothèses suivantes:

- vitesse du vent transversal, $v = 1 \text{ m/s}$
- intensité du rayonnement solaire, $S_i = 900 \text{ W/m}^2$
- coefficient d'absorption du rayonnement solaire, $\gamma = 0,5$
- coefficient d'émissivité par rapport au corps noir, $K_e = 0,6$
- température de l'aluminium $T_2 = 353 \text{ K}$ et 373 K (égale à 80 °C et 100 °C)
- température ambiante $T_1 = 293 \text{ K}$ (égale à 20 °C).

Il est important de noter que toute modification de ces conditions, en particulier la vitesse du vent et la température ambiante, conduit à des valeurs différentes de la capacité de courant transporté. Dans un tel cas, il convient de calculer les nouvelles valeurs de la CCC en utilisant l'équation (8).

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61597:1995

Annex A (informative)

Current carrying capacity

All values in the bilingual tables of this annex are based on the following assumptions:

- speed of cross wind, $v = 1 \text{ m/s}$
- intensity of solar radiation, $S_i = 900 \text{ W/m}^2$
- solar absorption coefficient, $\gamma = 0,5$
- emissivity with respect to black body, $K_e = 0,6$
- aluminium temperature $T_2 = 353 \text{ K}$ and 373 K (equal to 80 °C and 100 °C)
- ambient temperature, $T_1 = 293 \text{ K}$ (equal to 20 °C):

It is important to note that any change in these conditions, especially wind speed and ambient temperature, will result in different values of current carrying capacity. In such case, new values of CCC should be calculated in accordance with equation (8).

IECNORM.COM :: Click to view the full PDF of IEC 61597:1995

Tableau A.1 – CCC pour conducteurs de type A1
Table A.1 – CCC for type A1 conductors

Fréquence: 50 Hz
 Frequency: 50 Hz

Numéro de code Code number	Toronné Stranding	Diamètre Diameter mm	Résistance à 80 °C Resistance at 80 °C Ω/km	Résistance à 100 °C Resistance at 100 °C Ω/km	CCC A	
					$T_z = 80\text{ °C}$	$T_z = 100\text{ °C}$
10	7	4,05	3,5592	3,7902	108	122
16	7	5,12	2,2245	2,3689	146	163
25	7	6,40	1,4237	1,5161	194	217
40	7	8,09	0,8898	0,9475	262	293
63	7	10,2	0,5650	0,6016	351	393
100	19	12,9	0,3576	0,3808	472	529
125	19	14,5	0,2865	0,3050	545	612
160	19	16,4	0,2239	0,2384	638	718
200	19	18,3	0,1793	0,1909	737	829
250	19	20,5	0,1436	0,1529	852	959
315	37	23,0	0,1146	0,1219	987	1 113
400	37	26,0	0,0905	0,0963	1 152	1 300
450	37	27,5	0,0807	0,0858	1 240	1 401
500	37	29,0	0,0728	0,0774	1 327	1 500
560	61	30,7	0,0653	0,0694	1 425	1 612
630	61	32,6	0,0584	0,0620	1 535	1 738
710	61	34,6	0,0522	0,0554	1 653	1 873
800	61	36,8	0,0466	0,0494	1 783	2 022
900	61	39,0	0,0419	0,0444	1 914	2 173
1000	61	41,1	0,0381	0,0403	2 039	2 319
1120	91	43,5	0,0345	0,0365	2 181	2 481
1250	91	46,0	0,0313	0,0331	2 330	2 652
1400	91	48,7	0,0286	0,0301	2 480	2 832
1500	91	50,4	0,0271	0,0284	2 575	2 948

Tableau A.2 – CCC pour conducteurs de type A2
Table A.2 – CCC for type A2 conductors

Fréquence: 50 Hz
Frequency: 50 Hz

Numéro de code Code number	Toronné Stranding	Diamètre Diameter mm	Résistance à 80 °C Resistance at 80 °C Ω/km	Résistance à 100 °C Resistance at 100 °C Ω/km	CCC A	
					$T_z = 80\text{ °C}$	$T_z = 100\text{ °C}$
16	7	5,49	2,1783	2,3073	150	168
25	7	6,86	1,3941	1,4766	200	224
40	7	8,68	0,8713	0,9229	270	303
63	7	10,9	0,5532	0,5860	361	406
100	19	13,9	0,3502	0,3709	487	548
125	19	15,5	0,2805	0,2971	562	633
160	19	17,6	0,2192	0,2322	569	743
200	19	19,6	0,1756	0,1860	760	858
250	19	22,0	0,1406	0,1489	879	993
315	37	24,7	0,1122	0,1188	1 019	1 152
400	37	27,9	0,0887	0,0938	1 188	1 346
450	37	29,6	0,0790	0,0836	1 282	1 452
500	37	31,2	0,0714	0,0755	1 370	1 553
560	61	33,0	0,0640	0,0676	1 472	1 671
630	61	35,0	0,0572	0,0604	1 585	1 800
710	61	37,2	0,0512	0,0540	1 706	1 941
800	61	39,5	0,0457	0,0483	1 840	2 091
900	91	41,9	0,0411	0,0433	1 975	2 251
1000	91	44,1	0,0374	0,0394	2 104	2 398
1120	91	46,7	0,0339	0,0356	2 249	2 569
1250	91	49,4	0,0308	0,0323	2 401	2 746

Tableau A.3 – CCC pour conducteurs de type A3
Table A.3 – CCC for type A3 conductors

Fréquence: 50 Hz
 Frequency: 50 Hz

Numéro de code Code number	Toronné Stranding	Diamètre Diameter mm	Résistance à 80 °C Resistance at 80 °C Ω/km	Résistance à 100 °C Resistance at 100 °C Ω/km	CCC A	
					$T_z = 80\text{ °C}$	$T_z = 100\text{ °C}$
16	7	5,52	2,1783	2,3073	151	169
25	7	6,90	1,3941	1,4766	200	224
40	7	8,72	0,8713	0,9229	270	303
63	7	11,9	0,5532	0,5860	361	406
100	19	14,0	0,3502	0,3709	488	549
125	19	15,6	0,2805	0,2971	563	634
160	19	17,6	0,2192	0,2322	659	743
200	19	19,7	0,1756	0,1860	761	859
250	19	22,1	0,1406	0,1489	880	994
315	37	24,8	0,1122	0,1188	1 020	1 153
400	37	28,0	0,0887	0,0938	1 190	1 348
450	37	29,7	0,0790	0,0836	1 283	1 454
500	37	31,3	0,0714	0,0755	1 371	1 555
560	61	33,2	0,0640	0,0676	1 474	1 614
630	61	35,2	0,0572	0,0604	1 587	1 804
710	61	37,3	0,0512	0,0540	1 708	1 942
800	61	39,6	0,0457	0,0483	1 841	2 093
900	91	42,1	0,0411	0,0433	1 978	2 254
1000	91	44,4	0,0374	0,0394	2 108	2 403
1120	91	46,9	0,0339	0,0356	2 252	2 573

Tableau A.4 – CCC pour conducteurs de type A1/A2
Tableau A.4 – CCC for type A1/A2 conductors

Fréquence: 50 Hz
 Frequency: 50 Hz

Numéro de code Code number	Toronné Stranding	Diamètre Diameter mm	Résistance à 80 °C Resistance at 80 °C Ω/km	Résistance à 100 °C Resistance at 100 °C Ω/km	CCC A	
					$T_z = 80\text{ °C}$	$T_z = 100\text{ °C}$
16	4/3	5,28	2,1962	2,3337	148	166
25	4/3	6,60	1,4060	1,4941	197	220
40	4/3	8,35	0,8780	0,9330	266	298
63	4/3	10,5	0,5582	0,5932	356	399
100	4/3	13,2	0,3515	0,3735	479	538
125	12/7	14,9	0,2829	0,3007	553	621
160	12/7	16,8	0,2208	0,2346	648	729
200	12/7	18,8	0,1775	0,1886	747	841
250	12/7	21,0	0,1423	0,1511	862	972
250	18/19	21,3	0,1426	0,1513	865	976
315	30/7	23,4	0,1142	0,1214	993	1 121
315	18/19	23,9	0,1134	0,1204	1 003	1 133
400	30/7	26,3	0,0902	0,0958	1 158	1 308
400	18/19	27,0	0,0894	0,0949	1 172	1 325
450	30/7	27,9	0,0804	0,0855	1 248	1 410
450	18/19	28,6	0,0796	0,0845	1 264	1 429
500	30/7	29,4	0,0724	0,0770	1 336	1 510
500	18/19	30,1	0,0717	0,0761	1 352	1 530
560	30/7	31,2	0,0648	0,0688	1 438	1 627
560	54/7	31,0	0,0651	0,0691	1 432	1 620
630	42/19	33,4	0,0588	0,0624	1 541	1 745
630	24/37	34,1	0,0582	0,0618	1 559	1 765
710	42/19	35,5	0,0523	0,0555	1 664	1 886
710	24/37	36,2	0,0517	0,0548	1 684	1 910

Tableau A.4 – CCC pour conducteurs de type A1/A2 (fin)
Table A.4 – CCC for type A1/A2 conductors (concluded)

Numéro de code Code number	Toronné Stranding	Diamètre Diameter mm	Résistance à 80 °C Resistance at 80 °C Ω/km	Résistance à 100 °C Resistance at 100 °C Ω/km	CCC A	
					$T_z = 80\text{ °C}$	$T_z = 100\text{ °C}$
800	42/19	37,6	0,0467	0,0495	1 793	2 034
800	24/37	38,4	0,0463	0,0486	1 812	2 066
900	42/19	39,9	0,0417	0,0442	1 932	2 193
900	54/37	40,2	0,0426	0,0451	1 916	2 176
1000	72/19	41,8	0,0388	0,0412	2 031	2 305
1000	54/37	42,4	0,0386	0,0408	2 046	2 327
1120	72/19	44,2	0,0349	0,0370	2 179	2 476
1120	54/37	44,9	0,0347	0,0367	2 196	2 499
1250	72/19	46,7	0,0315	0,0334	2 333	2 653
1250	54/37	47,4	0,0313	0,0331	2 351	2 677
1400	72/19	49,4	0,0283	0,0300	2 505	2 850

IECNORM.COM :: Click to view the full PDF of IEC TR 1597:1995

Tableau A.5 – CCC pour conducteurs de type A1/A3
Table A.5 – CCC for type A1/A3 conductors

Fréquence: 50 Hz

Frequency: 50 Hz

Numéro de code Code number	Toronné Stranding	Diamètre Diameter mm	Résistance à 80 °C Resistance at 80 °C Ω/km	Résistance à 100 °C Resistance at 100 °C Ω/km	CCC A	
					$T_z = 80\text{ °C}$	$T_z = 100\text{ °C}$
16	4/3	5,29	2,1941	2,3315	148	166
25	4/3	6,62	1,4009	1,4886	197	221
40	4/3	8,37	0,8792	0,9343	266	298
63	4/3	10,5	0,5570	0,5919	356	400
100	4/3	13,2	0,3512	0,3732	479	538
125	12/7	14,9	0,2825	0,3003	553	622
160	12/7	16,9	0,2211	0,2350	649	730
200	12/7	18,8	0,1770	0,1880	748	843
250	12/7	21,1	0,1426	0,1514	862	972
250	18/19	21,4	0,1421	0,1509	867	978
315	30/7	23,4	0,1143	0,1215	993	1 120
315	18/19	24,0	0,1132	0,1202	1 005	1 135
400	30/7	26,4	0,0903	0,0960	1 158	1 308
400	18/19	27,0	0,0894	0,0949	1 172	1 325
450	30/7	28,0	0,0803	0,0854	1 250	1 412
450	18/19	28,7	0,0796	0,0845	1 265	1 430
500	30/7	29,5	0,0724	0,0769	1 337	1 513
500	18/19	30,2	0,0718	0,0762	1 353	1 531
560	30/7	31,2	0,0648	0,0688	1 438	1 627
560	54/7	31,1	0,0650	0,0691	1 434	1 622
630	42/19	33,4	0,0587	0,0623	1 542	1 747
630	24/37	34,2	0,0582	0,0618	1 560	1 767
710	42/19	35,5	0,0523	0,0555	1 664	1 886
710	24/37	36,3	0,0516	0,0548	1 687	1 912

Tableau A.5 – CCC pour conducteurs de type A1/A3 (fin)
Table A.5 – CCC for type A1/A3 conductors (concluded)

Numéro de code Code number	Toronné Stranding	Diamètre Diameter mm	Résistance à 80 °C Resistance at 80 °C Ω/km	Résistance à 100 °C Resistance at 100 °C Ω/km	CCC A	
					$T_z = 80\text{ °C}$	$T_z = 100\text{ °C}$
800	42/19	37,7	0,0466	0,0495	1 796	2 036
800	24/37	38,5	0,0462	0,0486	1 815	2 068
900	42/19	40,0	0,0417	0,0442	1 933	2 195
900	54/37	40,3	0,0426	0,0451	1 917	2 178
1000	72/19	41,8	0,0388	0,0411	2 031	2 308
1000	54/37	42,5	0,0386	0,0409	2 047	2 326
1120	72/19	44,3	0,0349	0,0370	2 181	2 478
1120	54/37	45,0	0,0347	0,0367	2 198	2 501
1250	72/19	46,8	0,0315	0,0334	2 335	2 654
1250	54/37	47,5	0,0313	0,0331	2 353	2 679
1400	72/19	49,5	0,0283	0,0300	2 506	2 851

IECNORM.COM :: Click to view the full PDF of IEC 61597:1995

Tableau A.6 – CCC pour conducteurs de type A1/Sxy
Table A.6 – CCC for type A1/Sxy conductors

Fréquence: 50 Hz
Frequency: 50 Hz

Numéro de code Code number	Toronné Stranding	Diamètre Diameter mm	Résistance à 80 °C Resistance at 80 °C Ω/km	Résistance à 100 °C Resistance at 100 °C Ω/km	CCC A	
					$T_z = 80\text{ °C}$	$T_z = 100\text{ °C}$
16	6/1*	5,53	2,2293	2,3740	149	166
25	6/1*	6,91	1,4268	1,5194	198	221
40	6/1*	8,74	0,8918	0,9496	267	299
63	6/1*	11,0	0,5662	0,6030	358	401
100	6/1*	13,8	0,3566	0,3798	481	540
125	18/1	14,9	0,2867	0,3053	549	617
125	26/7	15,7	0,2873	0,3059	557	626
160	18/1	16,8	0,2241	0,2387	643	723
160	26/7	17,7	0,2246	0,2391	652	734
200	18/1	18,8	0,1794	0,1910	743	836
200	26/7	19,8	0,1797	0,1914	754	848
250	22/7	21,6	0,1437	0,1531	865	974
250	26/7	22,2	0,1438	0,1531	872	982
315	45/7	23,9	0,1145	0,1218	998	1 126
315	26/7	24,9	0,1143	0,1217	1 012	1 141
400	45/7	26,9	0,0904	0,0962	1 164	1 314
400	54/7	27,6	0,0904	0,0962	1 173	1 325
450	45/7	28,5	0,0805	0,0857	1 255	1 418
450	54/7	29,3	0,0805	0,0857	1 266	1 430
500	45/7	30,1	0,0727	0,0773	1 343	1 518
500	54/7	30,9	0,0725	0,0771	1 355	1 533
560	45/7	31,8	0,0650	0,0692	1 444	1 632
560	54/19	32,7	0,0648	0,0690	1 458	1 649
630	45/7	33,8	0,0580	0,0617	1 557	1 762

* Les effets magnétiques dans l'âme d'acier sont négligés.
Magnetic effects in steel core are ignored.

Tableau A.6 – CCC pour conducteurs de type A1/Sxy (fin)
Table A.6 – CCC for type A1/Sxy conductors (concluded)

Numéro de code Code number	Toronné Stranding	Diamètre Diameter mm	Résistance à 80 °C Resistance at 80 °C Ω/km	Résistance à 100 °C Resistance at 100 °C Ω/km	CCC A	
					$T_z = 80\text{ °C}$	$T_z = 100\text{ °C}$
630	54/19	34,7	0,0578	0,0615	1 572	1 779
710	45/7	35,9	0,0517	0,0549	1 680	1 903
710	54/19	36,8	0,0515	0,0547	1 696	1 922
800	72/7	37,6	0,0463	0,0491	1 800	2 042
800	84/7	38,3	0,0462	0,0491	1 812	2 054
800	54/19	39,1	0,0460	0,0489	1 828	2 072
900	72/7	39,9	0,0415	0,0440	1 936	2 198
900	84/7	46,0	0,0414	0,0439	2 025	2 303
1000	72/7	42,1	0,0377	0,0400	2 065	2 345
1120	72/19	44,5	0,0341	0,0360	2 209	2 516
1120	84/19	45,3	0,0338	0,0358	2 231	2 537
1250	72/19	47,0	0,0309	0,0356	2 360	2 690
1250	84/19	47,9	0,0307	0,0325	2 382	2 711

Tableau A.7 – CCC pour conducteurs de type A2/Sxy
Table A.7 – CCC for type A2/Sxy conductors

Fréquence: 50 Hz
Frequency: 50 Hz

Numéro de code Code number	Toronné Stranding	Diamètre Diameter mm	Résistance à 80 °C Resistance at 80 °C Ω/km	Résistance à 100 °C Resistance at 100 °C Ω/km	CCC A	
					$T_z = 80\text{ °C}$	$T_z = 100\text{ °C}$
16	6/1*	5,93	2,1830	2,3122	153	172
25	6/1*	7,41	1,3971	1,4798	204	229
40	6/1*	9,38	0,8732	0,9249	276	309
63	6/1*	11,8	0,5544	0,5873	369	415
100	18/1	14,3	0,3506	0,3713	491	552
125	18/1	16,0	0,2808	0,2974	566	638
125	26/7	16,8	0,2813	0,2979	574	647
160	18/1	18,0	0,2195	0,2324	663	748
160	26/7	19,0	0,2199	0,2329	673	760
200	18/1	20,2	0,1757	0,1861	767	866
200	26/7	21,3	0,1760	0,1864	778	879
250	22/7	23,1	0,1408	0,1491	891	1 007
250	26/7	23,8	0,1408	0,1491	899	1 017
315	45/7	25,6	0,1121	0,1187	1 008	1 139
315	26/7	26,7	0,1119	0,1185	1 044	1 181
400	45/7	28,9	0,0886	0,0937	1 022	1 362
400	54/7	29,7	0,0885	0,0937	1 212	1 373
450	45/7	30,6	0,0789	0,0835	1 295	1 468
450	54/7	31,5	0,0788	0,0835	1 308	1 481
500	45/7	32,3	0,0712	0,0753	1 386	1 572
500	54/7	33,2	0,0710	0,0751	1 400	1 588
560	45/7	34,2	0,0637	0,0674	1 491	1 692
560	54/19	35,1	0,0635	0,0672	1 505	1 708
630	72/7	39,4	0,0570	0,0603	1 646	1 870

* Les effets magnétiques dans l'âme d'acier sont négligés.
Magnetic effects in steel core are ignored.

Tableau A.7 – CCC pour conducteurs de type A2/Sxy (fin)
Table A.7 – CCC for type A2/Sxy conductors (concluded)

Numéro de code Code number	Toronné Stranding	Diamètre Diameter mm	Résistance à 80 °C Resistance at 80 °C Ω/km	Résistance à 100 °C Resistance at 100 °C Ω/km	CCC A	
					$T_z = 80\text{ °C}$	$T_z = 100\text{ °C}$
630	54/19	37,2	0,0567	0,0599	1 622	1 843
710	72/7	41,8	0,0508	0,0537	1 775	2 019
710	54/19	39,5	0,0505	0,0533	1 750	1 991
800	72/7	40,4	0,0454	0,0479	1 859	2 115
800	84/7	41,1	0,0453	0,0478	1 870	2 129
900	72/7	42,8	0,0407	0,0429	1 998	2 276
900	84/7	43,6	0,0406	0,0428	2 012	2 292
1000	84/19	45,9	0,0367	0,0388	2 150	2 448
1120	84/19	48,6	0,0332	0,0349	2 301	2 628

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 61597:1995

Tableau A.8 – CCC pour conducteurs de type A3/Sxy
Table A.8 – CCC for type A3/Sxy conductors

Fréquence: 50 Hz

Frequency: 50 Hz

Numéro de code Code number	Toronné Stranding	Diamètre Diameter mm	Résistance à 80 °C Resistance at 80 °C Ω/km	Résistance à 100 °C Resistance at 100 °C Ω/km	CCC A	
					$T_z = 80\text{ °C}$	$T_z = 100\text{ °C}$
16	6/1*	5,96	2,1830	2,3122	154	172
25	6/1*	7,45	1,3971	1,4798	204	229
40	6/1*	9,42	0,8732	0,9249	276	310
63	6/1*	11,8	0,5544	0,5873	369	415
100	18/1	14,3	0,3506	0,3713	491	552
125	18/1	16,0	0,2808	0,2974	566	638
125	26/7	16,9	0,2813	0,2979	575	648
160	18/1	18,1	0,2195	0,2324	664	749
160	26/7	19,1	0,2199	0,2329	674	761
200	18/1	20,3	0,1757	0,1861	768	867
200	26/7	21,4	0,1760	0,1864	779	880
250	22/7	23,2	0,1408	0,1491	892	1 009
250	26/7	23,9	0,1408	0,1491	900	1 018
315	45/7	25,7	0,1121	0,1187	1 031	1 167
315	26/7	26,8	0,1119	0,1185	1 045	1 183
400	45/7	29,0	0,0886	0,0937	1 203	1 363
400	54/7	29,8	0,0885	0,0937	1 213	1 375
450	45/7	30,8	0,0789	0,0835	1 298	1 471
450	54/7	31,6	0,0788	0,0835	1 309	1 483
500	45/7	32,4	0,0712	0,0753	1 387	1 573
500	54/7	3,33	0,0710	0,0751	1 401	1 589
560	45/7	34,3	0,0637	0,0674	1 492	1 693
560	54/19	35,3	0,0635	0,0672	1 508	1 711
630	72/7	39,6	0,0570	0,0603	1 649	1 873

* Les effets magnétiques dans l'âme d'acier sont négligés.
Magnetic effects in steel core are ignored.

Tableau A.8 – CCC pour conducteurs de type A3/Sxy (fin)
Table A.8 – CCC for type A3/Sxy conductors (concluded)

Numéro de code Code number	Toronné Stranding	Diamètre Diameter mm	Résistance à 80 °C Resistance at 80 °C Ω/km	Résistance à 100 °C Resistance at 100 °C Ω/km	CCC A	
					$T_z = 80\text{ °C}$	$T_z = 100\text{ °C}$
630	54/19	37,4	0,0567	0,0599	1 624	1846
710	72/7	42,0	0,0508	0,0537	1 778	2 022
710	54/19	39,7	0,0505	0,0533	1 753	1 994
800	72/7	40,5	0,0454	0,0479	1 860	2 117
800	84/7	41,3	0,0453	0,0478	1 873	2 132
900	72/7	43,0	0,0407	0,0429	2 001	2 280
900	84/7	43,8	0,0406	0,0428	2 015	2 296
1000	84/19	46,2	0,0367	0,0388	2 154	2 453
1120	84/19	48,9	0,0332	0,0349	2 305	2 633

IECNORM.COM :: Click to view the full PDF of IEC TR 61597:1995