

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
865-1**

Deuxième édition
Second edition
1993-09

**Courants de court-circuit –
Calcul des effets**

**Partie 1:
Définitions et méthodes de calcul**

**Short-circuit currents –
Calculation of effects**

**Part 1:
Definitions and calculation methods**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 865-1: 1993

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 auprès du Bureau Central de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement

Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 50: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI), qui se présente sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande. Voir également le dictionnaire multilingue de la CEI.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit tirés du VEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Symboles graphiques et littéraux

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera:

- la CEI 27: *Symboles littéraux à utiliser en électro-technique;*
- la CEI 417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles;*
- la CEI 617: *Symboles graphiques pour schémas;*

et pour les appareils électromédicaux,

- la CEI 878: *Symboles graphiques pour équipements électriques en pratique médicale.*

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 27, de la CEI 417, de la CEI 617 et/ou de la CEI 878, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

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 from the IEC Central Office.

Information on the revision work, the issue of revised editions and amendments may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
Published yearly
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates

Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC 50: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field. Full details of the IEV will be supplied on request. See also the IEC Multilingual Dictionary.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the IEV or have been specifically approved for the purpose of this publication.

Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications:

- IEC 27: *Letter symbols to be used in electrical technology;*
- IEC 417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets;*
- IEC 617: *Graphical symbols for diagrams;*

and for medical electrical equipment,

- IEC 878: *Graphical symbols for electromedical equipment in medical practice.*

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 27, IEC 417, IEC 617 and/or IEC 878, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

IEC publications prepared by the same technical committee

The attention of readers is drawn to the end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
865-1**

Deuxième édition
Second edition
1993-09

**Courants de court-circuit –
Calcul des effets**

**Partie 1:
Définitions et méthodes de calcul**

**Short-circuit currents –
Calculation of effects**

**Part 1:
Definitions and calculation methods**

© CEI 1993 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 Varembé Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE **XA**

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

CORRIGENDUM 1

Page 64, tableau 2

Dans la troisième colonne, pour un court-circuit biphasé, au lieu de:

1,8

lire:

- (un tiret)

Page 65, table 2

In the third column, for a line-to-line short circuit, instead of:

1,8

read:

- (dash)

Page 74, figure 2

Sur la gauche des dessins, ajouter:

a)
et b) respectivement.

Page 75, figure 2

Add, at the left-hand side of the drawings:

a)
and b) respectively.

Page 104, annexe A, article A.2

Remplacer la dernière ligne de l'équation existante par la nouvelle ligne suivante:

$$2 \left(\arctan \frac{(a/d) + 1}{b/d} - 2 \arctan \frac{a/d}{b/d} + \arctan \frac{(a/d) - 1}{b/d} \right) \left\} \frac{a/d \cdot b/d}{6}$$

Page 105, annexe A, clause A.2

Replace the last line of the existing equation by the following new line:

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60865-1:1993

Withdr2wn

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	6
Section 1: Généralités	
Articles	
1.1 Domaine d'application et objet	8
1.2 Références normatives	8
1.3 Equations, symboles et unités	10
1.3.1 Symboles relatifs à la section 2 – Effets électromagnétiques	10
1.3.2 Symboles relatifs à la section 3 – Effets thermiques	16
1.4 Définitions	18
1.4.1 Définitions relatives à la section 2 – Effets électromagnétiques	18
1.4.1.1 Conducteur principal	18
1.4.1.2 Sous-conducteur	18
1.4.1.3 Support encastré	18
1.4.1.4 Support simple	18
1.4.1.5 Pièce de liaison	18
1.4.1.6 Force de tension d'un court-circuit, F_t	18
1.4.1.7 Force de chute, F_f	18
1.4.1.8 Force de pincement, F_{pi}	20
1.4.1.9 Durée du premier passage du courant de court-circuit, T_{k1}	20
1.4.2 Définitions relative à la section 3 – Effets thermiques	20
1.4.2.1 Courant thermique équivalent de courte durée, I_{th}	20
1.4.2.2 Courant de tenue de courte durée assigné, I_{thr}	20
1.4.2.3 Densité du courant thermique équivalent de courte durée, S_{th}	20
1.4.2.4 Densité du courant de tenue de courte durée assigné, S_{thr} , pour les conducteurs	20
1.4.2.5 Durée du courant de court-circuit, T_k	20
1.4.2.6 Courte durée assignée, T_{kr}	20
Section 2: Effet électromagnétique sur les conducteurs rigides et les conducteurs souple	
2.1 Généralités	22
2.1.1 Influences sur la réduction des contraintes	22
2.1.2 Prise en compte du réenclenchement automatique	22
2.2 Installations comportant des conducteurs rigides	24
2.2.1 Calcul des forces électromagnétiques	24
2.2.1.1 Calcul de la valeur de crête de la force entre les conducteurs principaux pendant un court-circuit triphasé	24
2.2.1.2 Calcul de la valeur de crête de la force entre les conducteurs principaux pendant un court-circuit biphasé	24
2.2.1.3 Calcul de la valeur de crête des forces entre sous-conducteurs coplanaires	24
2.2.1.4 Distance équivalente entre conducteurs principaux et entre sous-conducteurs ...	26

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
Section 1: General	
Clause	
1.1 Scope and object	9
1.2 Normative references	9
1.3 Equations, symbols and units	11
1.3.1 Symbols for section 2 – Electromagnetic effects	11
1.3.2 Symbols for section 3 – Thermal effects	17
1.4 Definitions	19
1.4.1 Definitions for section 2 – Electromagnetic effects	19
1.4.1.1 Main conductor	19
1.4.1.2 Sub-conductor	19
1.4.1.3 Fixed support	19
1.4.1.4 Simple support	19
1.4.1.5 Connecting piece	19
1.4.1.6 Short-circuit tensile force, F_t	19
1.4.1.7 Drop force, F_f	19
1.4.1.8 Pinch force, F_{pi}	21
1.4.1.9 Duration of the first short-circuit current flow, T_{k1}	21
1.4.2 Definitions for section 3 - Thermal effects	21
1.4.2.1 Thermal equivalent short-time current, I_{th}	21
1.4.2.2 Rated short-time withstand current, I_{thr}	21
1.4.2.3 Thermal equivalent short-time current density, S_{th}	21
1.4.2.4 Rated short-time withstand current density, S_{thr} , for conductors	21
1.4.2.5 Duration of short-circuit current, T_k	21
1.4.2.6 Rated short time, T_{kr}	21
Section 2: The electromagnetic effect on rigid conductors and flexible conductors	
2.1 General	23
2.1.1 Influence on stress reduction	23
2.1.2 Consideration of automatic reclosing	23
2.2 Rigid conductor arrangements	25
2.2.1 Calculation of electromagnetic forces	25
2.2.1.1 Calculation of peak force between the main conductors during a three-phase short circuit	25
2.2.1.2 Calculation of peak force between the main conductors during a line-to-line short circuit	25
2.2.1.3 Calculation of peak value of forces between coplanar sub-conductors	25
2.2.1.4 Effective distance between main conductors and between sub-conductors	27

Articles	Pages
2.2.2 Calcul des contraintes dans les conducteurs rigides et des forces sur les supports	26
2.2.2.1 Généralités	26
2.2.2.2 Calcul des contraintes dans les conducteurs rigides	28
2.2.2.3 Module de section et facteur q des conducteurs principaux composés de sous-conducteurs	30
2.2.2.4 Contrainte admissible dans un conducteur	30
2.2.2.5 Calcul des forces exercées sur les supports de conducteurs rigides	32
2.2.2.6 Calcul tenant compte de l'oscillation des conducteurs	32
2.3 Installations comportant des conducteurs souples	36
2.3.1 Généralités	36
2.3.2 Effets sur le conducteur principal	36
2.3.2.1 Dimensions et paramètres caractéristiques	38
2.3.2.2 Force de tension F_t provoquée par une oscillation pendant un court-circuit (force de tension d'un court-circuit)	42
2.3.2.3 Force de tension F_f provoquée par une chute après un court-circuit (force de chute)	42
2.3.2.4 Déplacement horizontal de la portée b_h et distance minimale dans l'air $a_{\min}$	44
2.3.3 Force de tension F_{pi} provoquée par l'effet de pincement	46
2.3.3.1 Dimensions et paramètres caractéristiques	46
2.3.3.2 Force de tension F_{pi} dans le cas de sous-conducteurs s'entrechoquant	48
2.3.3.3 Force de tension F_{pi} dans le cas de sous-conducteurs ne s'entrechoquant pas	50
2.4 Charges de structure résultant des effets électromagnétiques	52
2.4.1 Charge de conception pour les supports isolants, leurs supports et leurs connecteurs	52
2.4.2 Charge de conception pour les structures, les isolateurs et les connecteurs, avec les forces de tension transmises par les chaînes d'isolateurs	54
2.4.3 Charges de conception pour les fondations	54
Section 3. Effets thermiques sur les conducteurs nus et sur le matériel électrique	
3.1 Généralités	56
3.2 Calcul de l'échauffement	56
3.2.1 Généralités	56
3.2.2 Calcul du courant thermique équivalent de courte durée	56
3.2.3 Calcul de l'échauffement et de la densité du courant de tenue de courte durée assigné des conducteurs	58
3.2.4 Détermination de la résistance thermique au court-circuit pour différentes durées du courant de court-circuit	60
3.2.4.1 Matériel électrique	60
3.2.4.2 Conducteurs	60
TABLEAUX	62
FIGURES	72
ANNEXES	
A Equations pour la détermination des diagrammes	104
B Procédure d'itération pour le calcul du facteur η pour la force de tension F_{pi} dans le cas de conducteurs en faisceaux ne s'entrechoquant pas, selon CEI 865, 2.3.3.3 équation (62)	114

Clause	Page
2.2.2 Calculation of stresses in rigid conductors and forces on supports	27
2.2.2.1 General	27
2.2.2.2 Calculation of stresses in rigid conductors	27
2.2.2.3 Section modulus and factor q of main conductors composed of sub-conductors	31
2.2.2.4 Permitted conductor stress	31
2.2.2.5 Calculation of forces on supports of rigid conductors	33
2.2.2.6 Calculation with special regard to conductor oscillation	33
2.3 Flexible conductor arrangements	37
2.3.1 General	37
2.3.2 Effects on main conductors	37
2.3.2.1 Characteristic dimensions and parameters	39
2.3.2.2 Tensile force F_t during short circuit caused by swing out (short-circuit tensile force)	43
2.3.2.3 Tensile force F_t after short circuit caused by drop (drop force)	43
2.3.2.4 Horizontal span displacement b_h and minimum air clearance a_{min}	45
2.3.3 Tensile force F_{pi} caused by the pinch effect	47
2.3.3.1 Characteristic dimensions and parameters	47
2.3.3.2 Tensile force F_{pi} in the case of clashing sub-conductors	49
2.3.3.3 Tensile force F_{pi} in the case of non-clashing sub-conductors	51
2.4 Structure loads due to electromagnetic effects	53
2.4.1 Design load for post insulators, their supports and connectors	53
2.4.2 Design load for structures, insulators and connectors, with tensile forces transmitted by insulator chains	55
2.4.3 Design load for foundations	55
 Section 3: The thermal effect on bare conductors and electrical equipment	
3.1 General	57
3.2 Calculation of temperature rise	57
3.2.1 General	57
3.2.2 Calculation of thermal equivalent short-time current	57
3.2.3 Calculation of temperature rise and rated short-time withstand current density for conductors	59
3.2.4 Calculation of the thermal short-circuit strength for different durations of the short-circuit current	61
3.2.4.1 Electrical equipment	61
3.2.4.2 Conductors	61
TABLES	63
FIGURES	73
 ANNEXES	
A Equations for calculation of diagrams	105
B Iteration-procedure for calculation of factor η for the tensile force F_{pi} in the case of non-clashing bundled conductors according to IEC 865, 2.3.3.3 equation (62)	115

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

COURANTS DE COURT-CIRCUIT – CALCUL DES EFFETS –

Partie 1: Définitions et méthodes de calcul

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 Norme internationale CEI 865-1 a été établie par le comité d'études 73 de la CEI: Courants de court-circuit.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 1986 et constitue une révision technique.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

DIS	Rapport de vote
73(BC)16	73(BC)18

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

L'annexe A fait partie intégrante de cette norme.

L'annexe B est donnée uniquement à titre d'information.

La CEI 865 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général: Courants de court-circuit – Calcul des effets:

- Partie 1: 1993: Définitions et méthodes de calcul;
- Partie 2: 1994: Exemples de calcul (en préparation).

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SHORT-CIRCUIT CURRENTS – CALCULATION OF EFFECTS –**Part 1: Definitions and calculation methods****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.

International Standard IEC 865-1 has been prepared by IEC technical committee 73: Short-circuit currents.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 1986 and constitutes a technical revision.

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

DIS	Report on Voting
73(CO)16	73(CO)18

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

Annex A forms an integral part of this standard.

Annex B is for information only.

IEC 865 consists of the following parts, under the general title: Short-circuit currents – Calculation of effects:

- Part 1: 1993: Definitions and calculation methods;
- Part 2: 1994: Examples of calculation (in preparation).

COURANTS DE COURT-CIRCUIT – CALCUL DES EFFETS –

Partie 1: Définitions et méthodes de calcul

Section 1: Généralités

1.1 Domaine d'application et objet

La présente Norme internationale est applicable aux effets mécaniques et thermiques des courants de court-circuit. Elle comporte des procédures normalisées pour le calcul des effets des courants de court-circuit, réparties en deux sections comme suit:

- Section 2 - Effets électromagnétiques sur les conducteurs rigides et les conducteurs souples.
- Section 3 - Effets thermiques sur les conducteurs nus et le matériel électrique.

Pour les câbles et les conducteurs isolés se référer, par exemple, aux CEI 949 et CEI 986.

La présente norme ne traite que des réseaux à courant alternatif avec des tensions assignées jusqu'à 420 kV inclus.

Il convient de noter en particulier les points suivants:

- 1) Le calcul des courants de court-circuit est basé sur la CEI 909.
- 2) La durée de court-circuit utilisée dans cette norme dépend du concept de la protection et est considérée dans ce sens.
- 3) Ces procédures normalisées sont adaptées aux besoins pratiques et contiennent des simplifications avec des marges de sécurité. Des essais et/ou des méthodes de calcul plus détaillées peuvent être utilisés.
- 4) Dans la section 2 de cette norme, dans le cas des installations avec des conducteurs rigides, seules les contraintes provoquées par les courants de court-circuit sont calculées. De plus, d'autres contraintes peuvent exister, par exemple celles causées par les poids morts, le vent, la glace, les forces de fonctionnement, les séismes. Il convient que la combinaison de ces charges avec celles provenant d'un court-circuit fasse partie d'un accord et/ou soit indiquée par des normes, par exemple des règles d'installation.

Les forces de tension dans le cas des installations avec des conducteurs souples comprennent les effets des poids morts. En ce qui concerne la combinaison des autres charges, les considérations ci-dessus sont valables.

1.2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente Norme internationale. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes des accords fondés sur la présente Norme internationale sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

SHORT-CIRCUIT CURRENTS – CALCULATION OF EFFECTS –

Part 1: Definitions and calculation methods

Section 1: General

1.1 Scope and object

This International Standard is applicable to the mechanical and thermal effects of short-circuit currents. It contains standardized procedures for the calculation of the effects of the short-circuit currents in two sections as follows:

- Section 2 - The electromagnetic effect on rigid conductors and flexible conductors.
- Section 3 - The thermal effect on bare conductors and electrical equipment.

For cables and insulated conductors reference is made, for example, to IEC 949 and IEC 986.

Only a.c. systems for rated voltages up to and including 420 kV are dealt with in this standard.

The following points should particularly be noted:

- 1) The calculation of short-circuit currents should be based on IEC 909.
- 2) Short-circuit duration used in this standard depends on the protection concept and should be considered in that sense.
- 3) These standardized procedures are adjusted to practical requirements and contain simplifications with safety margins. Testing or more detailed methods of calculation or both may be used.
- 4) In section 2 of this standard, for arrangements with rigid conductors, only the stresses caused by short-circuit currents are calculated. Furthermore, other stresses can exist, e.g. caused by dead-load, wind, ice, operating forces, earthquake. The combination of these loads with the short-circuit loading should be part of an agreement and/or be given by standards, e.g. erection-codes.

The tensile forces in arrangements with flexible conductors include the effects of dead-load. With respect to the combination of other loads the considerations given above are valid.

1.2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text constitute provisions of this International Standard. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

CEI 909: 1988, *Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif*

CEI 949: 1988, *Calcul des courants de court-circuit admissibles au plan thermique, tenant compte des effets d'un échauffement non adiabatique*

CEI 986: 1989, *Guide aux limites de température de court-circuit des câbles électriques de tension assignée de 1,8/3 (3,6) kV à 18/30 (36) kV*

1.3 Equations, symboles et unités

Toutes les équations utilisées dans la présente norme sont des équations de quantité qui comportent des symboles représentant des quantités physiques avec à la fois des valeurs numériques et des dimensions.

Les symboles utilisés dans la présente norme et les unités SI concernées sont donnés dans les listes ci-après.

1.3.1 Symboles relatifs à la section 2 - Effets électromagnétiques

A_s	Section d'un sous-conducteur	m^2
a	Entraxe des conducteurs	m
a_m	Distance équivalente entre conducteurs principaux adjacents	m
a_{min}	Distance minimale dans l'air	m
a_s	Distance équivalente entre sous-conducteurs	m
a_{1n}	Entraxe du sous-conducteur 1 et du sous-conducteur n	m
a_{1s}	Entraxe des sous-conducteurs	m
a_{sw}	Entraxe équivalent des sous-conducteurs dans le faisceau	m
b	Dimension d'un sous-conducteur perpendiculairement à la direction de la force	m
b_c	Flèche statique équivalente d'un conducteur en milieu de portée	m
b_h	Déplacement horizontal maximal	m
b_m	Dimension d'un conducteur principal perpendiculairement à la direction de la force	m
c	Facteur relatif à l'influence des pièces de liaison	1
c_{th}	Constante du matériau	$m^4/(A^2s)$
C_D	Facteur de dilatation	1
C_F	Facteur de forme	1
D	Diamètre extérieur d'un conducteur tubulaire	m
d	Dimension d'un sous-conducteur parallèlement à la direction de la force	m
d_m	Dimension d'un conducteur principal parallèlement à la direction de la force	m
d_s	Diamètre d'un conducteur souple	m
E	Module de Young	N/m^2
E_s	Module de Young réel	N/m^2

IEC 909: 1988, *Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems.*

IEC 949: 1988, *Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects*

IEC 986: 1989, *Guide to the short-circuit temperature limits of electric cables with a rated voltage from 1,8/3 (3,6) kV to 18/30 (36) kV*

1.3 Equations, symbols and units

All equations used in this standard are quantity equations in which quantity symbols represent physical quantities possessing both numerical values and dimensions.

The symbols used in this standard and the SI-units concerned are given in the following lists.

1.3.1 Symbols for section 2 - Electromagnetic effects

A_s	Cross-section of one sub-conductor	m^2
a	Centre-line distance between conductors	m
a_m	Effective distance between neighbouring main conductors	m
a_{min}	Minimum air clearance	m
a_s	Effective distance between sub-conductors	m
a_{1n}	Centre-line distance between sub-conductor 1 and sub-conductor n	m
a_{1s}	Centre-line distance between sub-conductors	m
a_{sw}	Effective centre-line distance between the sub-conductors in the bundle	m
b	Dimension of a sub-conductor perpendicular to the direction of the force	m
b_c	Equivalent static conductor sag at midspan	m
b_h	Maximum horizontal displacement	m
b_m	Dimension of a main conductor perpendicular to the direction of the force	m
c	Factor for the influence of connecting pieces	1
c_{th}	Material constant	$m^4/(A^2s)$
C_D	Dilatation factor	1
C_F	Form factor	1
D	Outer diameter of a tubular conductor	m
d	Dimension of a sub-conductor in the direction of the force	m
d_m	Dimension of a main conductor in the direction of the force	m
d_s	Diameter of a flexible conductor	m
E	Young's modulus	N/m^2
E_s	Actual Young's modulus	N/m^2

F	Force exercée entre deux conducteurs parallèles de grande longueur pendant un court-circuit	N
F_d	Force sur le support de conducteurs rigides (valeur de crête)	N
F_f	Force de chute	N
F_m	Force entre conducteurs principaux pendant un court-circuit	N
F_{m2}	Force entre conducteurs principaux pendant un court-circuit biphasé	N
F_{m3}	Force sur le conducteur principal central pendant un court-circuit triphasé symétrique	N
F_s	Force entre sous-conducteurs pendant un court-circuit	N
F_{st}	Force de tension statique dans un conducteur principal souple	N
F_t	Force de tension due au court-circuit	N
F_{pi}	Force de pincement	N
F'	Force électromagnétique caractéristique par unité de longueur sur des conducteurs souples principaux	N/m
F_v	Force entre les sous-conducteurs dans un faisceau par suite du courant de court-circuit	N
f	Fréquence du réseau	Hz
f_c	Fréquence propre correspondant à un conducteur principal	Hz
f_{cs}	Fréquence propre correspondant à un sous-conducteur	Hz
f_η	Facteur caractérisant la contraction du faisceau	1
g_n	Valeur conventionnelle de l'accélération de la pesanteur	m/s ²
I''_{k3}	Courant de court-circuit triphasé symétrique initial (valeur efficace)	A
I''_{k2}	Courant de court-circuit biphasé symétrique initial (valeur efficace)	A
I''_{k1}	Courant de court-circuit monophasé à la terre initial (valeur efficace)	A
i_p	Valeur de crête du courant de court-circuit	A
i_{p2}	Valeur de crête du courant de court-circuit biphasé	A
i_{p3}	Valeur de crête du courant de court-circuit triphasé symétrique	A
i_1, i_2	Valeurs instantanées des courants dans les conducteurs	A
J	Moment quadratique de la section d'un conducteur principal	m ⁴
J_s	Moment quadratique de la section d'un sous-conducteur	m ⁴
j	Paramètre déterminant la configuration d'un faisceau pendant le passage du courant de court-circuit	1
k	Nombre de jeux d'entretoises ou de raidisseurs	1
k_{1n}	Facteur relatif à la distance équivalente entre le sous-conducteur 1 et le sous-conducteur n	1
k_{1s}	Facteur relatif à la distance équivalente d'un conducteur	1
l	Entraxe des supports	m
l_c	Longueur à la corde d'un conducteur principal souple dans la portée	m
l_i	Longueur d'une chaîne d'isolateurs	m

F	Force acting between two parallel long conductors during a short circuit	N
F_d	Force on support of rigid conductors (peak value)	N
F_f	Drop force	N
F_m	Force between main conductors during a short circuit	N
F_{m2}	Force between main conductors during a line-to-line short circuit	N
F_{m3}	Force on the central main conductor during a balanced three-phase short circuit	N
F_s	Force between sub-conductors during a short circuit	N
F_{st}	Static tensile force in flexible main conductor	N
F_t	Short-circuit tensile force	N
F_{pi}	Pinch force	N
F'	Characteristic electromagnetic force per unit length on flexible main conductors	N/m
F_v	Short-circuit current force between the sub-conductors in a bundle	N
f	System frequency	Hz
f_c	Relevant natural frequency of a main conductor	Hz
f_{cs}	Relevant natural frequency of a sub-conductor	Hz
f_η	Factor characterising the contraction of the bundle	1
g_n	Conventional value of acceleration of gravity	m/s ²
I''_{k3}	Three-phase initial symmetrical short-circuit current (r.m.s.)	A
I''_{k2}	Line-to-line initial symmetrical short-circuit current (r.m.s.)	A
I''_{k1}	Line-to-earth initial short-circuit current (r.m.s.)	A
i_p	Peak short-circuit current	A
i_{p2}	Peak short-circuit current in case of a line-to-line short circuit	A
i_{p3}	Peak short-circuit current in case of a balanced three-phase short circuit	A
i_1, i_2	Instantaneous values of the currents in the conductors	A
J	Second moment of main conductor area	m ⁴
J_s	Second moment of sub-conductor area	m ⁴
j	Parameter determining the bundle configuration during short-circuit current flow	1
k	Number of sets of spacers or stiffening elements	1
k_{1n}	Factor for the effective distance between sub-conductor 1 and sub-conductor n	1
k_{ls}	Factor for effective conductor distance	1
l	Centre-line distance between supports	m
l_c	Cord length of a flexible main conductor in the span	m
l_i	Length of one insulator chain	m

l_s	Entreaxe des pièces de liaison ou entreaxe d'une pièce de liaison et du support adjacent	m
m'	Masse d'un conducteur principal par unité de longueur	kg/m
m'_s	Masse d'un sous-conducteur par unité de longueur	kg/m
m_z	Masse totale d'un jeu de pièces de liaison	kg
N	Norme de rigidité d'une installation comportant des conducteurs souples	1/N
n	Nombre de sous-conducteurs d'un conducteur principal	1
q	Facteur de plasticité	1
$R_{p0,2}$	Contrainte correspondant à la limite élastique	N/m ²
r	Rapport entre la force électromécanique sur un conducteur dans des conditions de court-circuit et la pesanteur	1
S	Constante d'élasticité résultante des deux supports d'une portée	N/m
s	Epaisseur de la paroi d'un tube	m
T	Période d'oscillation du conducteur	s
T_k	Durée du courant de court-circuit	s
T_{k1}	Durée du premier passage du courant de court-circuit	s
T_{pi}	Temps écoulé entre l'apparition d'un court-circuit et le moment où F_{pi} est atteinte	s
T_{res}	Période résultante de l'oscillation du conducteur pendant le passage du courant de court-circuit	s
V_F	Rapport entre les forces dynamiques et statiques exercées sur les supports	1
V_r	Rapport entre les contraintes d'un conducteur principal avec et sans réenclenchement automatique tripolaire	1
V_{rs}	Rapport entre les contraintes d'un sous-conducteur avec et sans réenclenchement automatique tripolaire	1
V_σ	Rapport entre les contraintes dynamique et statique d'un conducteur principal	1
$V_{\sigma s}$	Rapport entre les contraintes dynamique et statique d'un sous-conducteur	1
y_a	Entaxe des sous-conducteurs ne s'entrechoquant pas pendant le passage du courant de court-circuit	m
Z	Module de section d'un conducteur principal	m ³
Z_s	Module de section d'un sous-conducteur	m ³
α	Facteur relatif à la force sur un support	1
β	Facteur relatif à la contrainte d'un conducteur principal	1
γ	Facteur relatif à l'évaluation de la fréquence propre appropriée	1
δ_1	Direction angulaire de la force	degrés
δ_k	Angle d'oscillation à la fin du passage du courant de court-circuit	degrés
δ_m	Angle maximal d'oscillation	degrés
ϵ_{ela}	Extension élastique	1
ϵ_{th}	Dilatation thermique	1

l_s	Centre-line distance between connecting pieces or between one connecting piece and the adjacent support	m
m'	Mass per unit length of main conductor	kg/m
m'_s	Mass per unit length of one sub-conductor	kg/m
m_z	Total mass of one set of connecting pieces	kg
N	Stiffness norm of an installation with flexible conductors	1/N
n	Number of sub-conductors of a main conductor	1
q	Factor of plasticity	1
$R_{p0,2}$	Stress corresponding to the yield point	N/m ²
r	The ratio of electromechanical force on a conductor under short-circuit conditions to gravity	1
S	Resultant spring constant of both supports of one span	N/m
s	Wall thickness of tubes	m
T	Period of conductor oscillation	s
T_k	Duration of short-circuit current	s
T_{k1}	Duration of the first short-circuit current flow	s
T_{pi}	Time from short-circuit initiation until reaching F_{pi}	s
T_{res}	Resulting period of the conductor oscillation during the short-circuit current flow	s
V_F	Ratio of dynamic and static force on supports	1
V_r	Ratio of stress for a main conductor with and without three-phase automatic reclosing	1
V_{rs}	Ratio of stress for a sub-conductor with and without three-phase automatic reclosing	1
V_σ	Ratio of dynamic and static main conductor stress	1
$V_{\sigma s}$	Ratio of dynamic and static sub-conductor stress	1
y_a	Centre-line distance between non-clashing sub-conductors during short-circuit current flow	m
Z	Section modulus of main conductor	m ³
Z_s	Section modulus of sub-conductor	m ³
α	Factor for force on support	1
β	Factor for main conductor stress	1
γ	Factor for relevant natural frequency estimation	1
δ_l	Angular direction of the force	degrees
δ_k	Swing-out angle at the end of the short-circuit current flow	degrees
δ_m	Maximum swing-out angle	degrees
ϵ_{ela}	Elastic expansion	1
ϵ_{th}	Thermal expansion	1

$\varepsilon_{st}, \varepsilon_{pi}$	Facteur de contrainte de la contraction d'un faisceau	1
ζ	Facteur de contrainte d'un conducteur principal souple	1
η	Facteur pour le calcul de F_{pi} dans le cas de sous-conducteurs ne s'entrechoquant pas	1
κ	Facteur relatif au calcul de la valeur de crête du courant de court-circuit	1
μ_0	Constante magnétique, perméabilité du vide	H/m
v_1, v_2, v_3, v_4, v_e	Facteurs pour le calcul de F_{pi}	1
ξ	Facteur pour le calcul de F_{pi} dans le cas de sous-conducteurs s'entrechoquant	1
σ_m	Contrainte de flexion provoquée par les forces entre conducteurs principaux	N/m ²
σ_s	Contrainte de flexion provoquée par les forces entre sous-conducteurs	N/m ²
σ_{tot}	Contrainte résultante d'un conducteur	N/m ²
σ_{fin}	Valeur la plus faible de F_{pi} lorsque le module de Young devient constant	N/m ²
χ	Quantité pour l'angle maximal d'oscillation	1
ϕ, ψ	Facteurs relatifs à la force de tension dans un conducteur souple	1

1.3.2 Symboles relatifs à la section 3 - Effets thermiques

A	Section d'un conducteur principal	m ²
I_k	Courant de court-circuit permanent (valeur efficace)	A
I'_k	Courant de court-circuit symétrique initial (valeur efficace)	A
I_{th}	Courant thermique équivalent de courte durée (valeur efficace)	A
I_{thi}	Valeur individuelle du courant thermique équivalent de courte durée (valeur efficace) lors de courts-circuits répétés	A
I_{thr}	Courant de tenue de courte durée assigné (valeur efficace)	A
K	Facteur pour le calcul de S_{thr}	As ^{0,5} /m ²
m	Facteur relatif à l'effet thermique de la composante continue	1
n	Facteur relatif à l'effet thermique de la composante alternative	1
S_{th}	Densité du courant thermique équivalent de courte durée (valeur efficace)	A/m ²
S_{thr}	Densité du courant de tenue de courte durée assigné (valeur efficace) pendant 1 s	A/m ²
T_k	Durée du courant de court-circuit	s
T_{ki}	Durée d'un passage individuel du courant de court-circuit lors de courts-circuits répétés	s
T_{kr}	Courte durée assignée	s
θ_b	Température d'un conducteur au début d'un court-circuit	°C
θ_e	Température d'un conducteur à la fin d'un court-circuit	°C

$\epsilon_{st}, \epsilon_{pi}$	Strain factor of the bundle contraction	1
ζ	Stress factor of the flexible main conductor	1
η	Factor for calculating F_{pi} in the case of non-clashing sub-conductors	1
κ	Factor for the calculation of the peak short-circuit current	1
μ_0	Magnetic constant, permeability of vacuum	H/m
v_1, v_2, v_3, v_4, v_e	Factors for calculating F_{pi}	1
ξ	Factor for calculating F_{pi} in the case of clashing sub-conductors	1
σ_m	Bending stress caused by the forces between main conductors	N/m ²
σ_s	Bending stress caused by the forces between sub-conductors	N/m ²
σ_{tot}	Resulting conductor stress	N/m ²
σ_{fin}	Lowest value of σ when Young's modulus becomes constant	N/m ²
χ	Quantity for the maximum swing-out angle	1
ϕ, ψ	Factors for the tensile force in a flexible conductor	1

1.3.2 Symbols for section 3 - Thermal effects

A	Main conductor cross-section	m ²
I_k	Steady-state short-circuit current (r.m.s.)	A
I'_k	Initial symmetrical short-circuit current (r.m.s.)	A
I_{th}	Thermal equivalent short-time current (r.m.s.)	A
I_{thi}	Individual thermal equivalent short-time current at repeated short-circuits (r.m.s.)	A
I_{thr}	Rated short-time withstand current (r.m.s.)	A
K	Factor for calculating S_{thr}	As ^{0.5} /m ²
m	Factor for the heat effect of the d.c. component	1
n	Factor for the heat effect of the a.c. component	1
S_{th}	Thermal equivalent short-time current density (r.m.s.)	A/m ²
S_{thr}	Rated short-time withstand current density (r.m.s) for 1 s	A/m ²
T_k	Duration of short-circuit current	s
T_{ki}	Duration of individual short-circuit current flow at repeated short circuits	s
T_{kr}	Rated short-time	s
θ_b	Conductor temperature at the beginning of a short circuit	°C
θ_e	Conductor temperature at the end of a short circuit	°C

1.4 Définitions

Pour les besoins de la présente norme, les définitions suivantes s'appliquent. Il y a lieu de se référer au VEI (CEI 50) lorsqu'il est applicable.

1.4.1 Définitions relatives à la section 2 - Effets électromagnétiques

1.4.1.1 Conducteur principal

Conducteur unique ou assemblage de plusieurs conducteurs parcouru par le courant total d'une phase.

1.4.1.2 Sous-conducteur

Conducteur parcouru par une partie du courant total d'une phase et faisant partie du conducteur principal.

1.4.1.3 Support encastré

Support d'un conducteur rigide qui empêche tout déplacement angulaire de ce conducteur à l'emplacement de ce support.

1.4.1.4 Support simple

Support d'un conducteur rigide qui permet son déplacement angulaire à l'emplacement de ce support.

1.4.1.5 Pièce de liaison

Toute masse additionnelle dans les limites d'une portée qui ne fait pas partie du conducteur proprement dit. Ceci inclut, entre autres: les entretoises, les raidisseurs, les recouvrements de barres, les dérivations, etc.

1.4.1.5.1 Entretoise

Élément mécanique, rigide ou flexible, placé entre sous-conducteurs et qui, au point d'installation, maintient l'écartement entre les sous-conducteurs.

1.4.1.5.2 Raidisseur

Entretoise spéciale destinée à réduire la contrainte mécanique de conducteurs rigides.

1.4.1.6 Force de tension d'un court-circuit, F_t

Force de tension maximale dans un conducteur principal souple due à l'oscillation atteinte pendant le court-circuit.

NOTE - Des forces de crête pouvant être plus élevées que les forces de tension dues au court-circuit peuvent se produire dans les pinces d'ancrage des conducteurs et les boulons des connecteurs. Voir l'article 2.4.

1.4.1.7 Force de chute, F_f

Force de tension maximale dans un conducteur principal souple qui se produit lorsque la portée retombe après une oscillation.

1.4 Definitions

For the purpose of this standard the following definitions apply. Reference is made to IECV (IEC 50) when applicable.

1.4.1 Definitions for section 2 – Electromagnetic effects

1.4.1.1 Main conductor

A conductor or an arrangement composed of a number of conductors which carries the total current in one phase.

1.4.1.2 Sub-conductor

A single conductor which carries a certain part of the total current in one phase and is a part of the main conductor.

1.4.1.3 Fixed support

A support of a rigid conductor which does not permit the conductor to move angularly at the point of the support.

1.4.1.4 Simple support

A support of a rigid conductor which permits angular movement at the point of support.

1.4.1.5 Connecting piece

Any additional mass within a span which does not belong to the uniform conductor material. This includes among others: Spacers, stiffening elements, bar overlappings, branchings, etc.

1.4.1.5.1 Spacer

A mechanical element between sub-conductors, rigid or flexible, which, at the point of installation, maintains the clearance between sub-conductors.

1.4.1.5.2 Stiffening element

A special spacer intended to reduce the mechanical stress of rigid conductors.

1.4.1.6 Short-circuit tensile force, F_t

Maximum tensile force in a flexible main conductor due to swing out reached during the short circuit.

NOTE - Peak forces can occur in the conductor anchors and connector bolts, which can be greater than the short-circuit tensile forces. See clause 2.4.

1.4.1.7 Drop force, F_f

Maximum tensile force in a flexible main conductor which occurs when the span drops down after swing out.

1.4.1.8 Force de pincement, F_{pi}

Force de tension maximale dans un conducteur souple en faisceau due à l'attraction des sous-conducteurs dans le faisceau.

1.4.1.9 Durée du premier passage du courant de court-circuit, T_{k1}

Intervalle de temps entre l'apparition du court-circuit et la première coupure du courant.

1.4.2 Définitions relatives à la section 3 - Effets thermiques

1.4.2.1 Courant thermique équivalent de courte durée, I_{th}

Courant, en valeur efficace, ayant le même effet thermique et la même durée que le courant de court-circuit réel qui peut comporter une composante continue et diminuer avec le temps.

NOTE - Dans le cas de courts-circuits répétés (dus à des réenclenchements répétés) une valeur résultante du courant thermique équivalent de courte durée est déterminée (voir 3.2.2).

1.4.2.2 Courant de tenue de courte durée assigné, I_{thr}

Courant, en valeur efficace, que le matériel électrique peut supporter pendant une courte durée assignée, dans des conditions prescrites d'utilisation et de comportement.

NOTES

- 1 Il est possible d'indiquer plusieurs couples de valeurs du courant de tenue de courte durée assigné et de la courte durée assignée pour l'effet thermique, la valeur de 1 s est utilisée dans la plupart des spécifications CEI.
- 2 Le courant de tenue de courte durée assigné, ainsi que la courte durée assignée correspondante, sont indiqués par le constructeur du matériel.

1.4.2.3 Densité du courant thermique équivalent de courte durée, S_{th}

Rapport entre le courant thermique équivalent de courte durée et la section du conducteur.

1.4.2.4 Densité du courant de tenue de courte durée assigné, S_{thr} , pour les conducteurs

Densité de courant, en valeur efficace, qu'un conducteur peut supporter pendant la courte durée assignée.

NOTE - La densité du courant de tenue de courte durée assigné est déterminée conformément à l'article 3.2.

1.4.2.5 Durée du courant de court-circuit, T_k

Somme des durées des passages du courant de court-circuit, depuis l'apparition du premier court-circuit jusqu'à la coupure finale du courant dans toutes les phases.

1.4.2.6 Courte durée assignée, T_{kr}

Durée pendant laquelle

- un matériel électrique peut transporter un courant égal à son courant de tenue de courte durée assigné;
- un conducteur peut supporter une densité de courant égale à sa densité du courant de tenue de courte durée assigné.

1.4.1.8 *Pinch force, F_{pi}*

Maximum tensile force in a bundled flexible conductor due to the attraction of the sub-conductors in the bundle.

1.4.1.9 *Duration of the first short-circuit current flow, T_{k1}*

The time interval between the initiation of the short circuit and the first breaking of the current.

1.4.2 *Definitions for section 3 – Thermal effects*

1.4.2.1 *Thermal equivalent short-time current, I_{th}*

The r.m.s. value of current having the same thermal effect and the same duration as the actual short-circuit current, which may contain d.c. component and may subside in time.

NOTE - If repeated short circuits occur (resulting from repeated reclosures) a resulting thermal equivalent short-time current is evaluated (see 3.2.2).

1.4.2.2 *Rated short-time withstand current, I_{thr}*

The r.m.s. value of current that the electrical equipment can carry during a rated short time under prescribed conditions of use and behaviour.

NOTES

- 1 It is possible to state several pairs of values of rated short-time withstand current and rated short time; for thermal effect 1 s is used in most IEC specifications.
- 2 The rated short-time withstand current as well as the corresponding rated short time are stated by the manufacturer of the equipment.

1.4.2.3 *Thermal equivalent short-time current density, S_{th}*

The ratio of the thermal equivalent short-time current and the cross-section area of the conductor.

1.4.2.4 *Rated short-time withstand current density, S_{thr} , for conductors*

The r.m.s. value of the current density which a conductor is able to withstand for the rated short time.

NOTE - The rated short-time withstand current density is determined according to 3.2.

1.4.2.5 *Duration of short-circuit current, T_k*

The sum of the time durations of the short-circuit current flow from the initiation of the first short circuit to the final breaking of the current in all phases.

1.4.2.6 *Rated short time, T_{kr}*

The time duration for which:

- an electrical equipment can withstand a current equal to its rated short-time withstand current;
- a conductor can withstand a current density equal to its rated short-time withstand current density.

Section 2: Effet électromagnétique sur les conducteurs rigides et les conducteurs souples

2.1 Généralités

Avec les méthodes de calcul indiquées dans la présente section, il est possible de déterminer les contraintes dans les conducteurs rigides, les forces de tension sur les conducteurs souples et les forces sur les isolateurs et les infrastructures, qui peuvent exposer ces éléments à des flexions, à des tensions et/ou à des compressions et à des déplacements des portées de conducteurs souples.

Des forces électromagnétiques sont induites dans les conducteurs par les courants qui les parcourent. Lorsque de telles forces agissent sur des conducteurs parallèles, elles provoquent des contraintes qui doivent être prises en compte dans les postes. Pour cette raison,

- les forces entre conducteurs parallèles sont exposées dans les articles ci-après;
- les composantes de la force électromagnétique qui s'établit dans des conducteurs avec des angles et/ou des croisements peuvent normalement être négligées.

Dans le cas des installations blindées, la modification des forces électromagnétiques entre les conducteurs à cause du blindage magnétique peut être prise en considération. Toutefois, les forces agissant entre chaque conducteur et son enveloppe, et celles entre les enveloppes, doivent également être prises en compte.

Lorsque des conducteurs parallèles sont longs par rapport à la distance qui les sépare, les forces sont régulièrement réparties le long des conducteurs, et sont données par l'équation

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \frac{l}{a} \quad (1)$$

où

i_1 et i_2 sont les valeurs instantanées des courants dans les conducteurs;

l est l'entraxe des supports;

a est l'entraxe des conducteurs.

Lorsque les courants dans les deux conducteurs ont le même sens, les forces sont attractives. Lorsque les courants sont de sens opposé, les forces sont répulsives.

NOTE - Pour toute information complémentaire, voir le document: «Effets mécaniques des courants de court-circuit dans les postes ouverts», CIGRÉ - 1987, Groupe de travail 23.02 de la Commission d'études 23.

2.1.1 Influence sur la réduction des contraintes

Lors du calcul de la valeur maximale possible du courant de court-circuit, des détails complémentaires d'autres normes CEI peuvent être pris en considération s'il en résulte une réduction des contraintes.

2.1.2 Prise en compte du réenclenchement automatique

Le réenclenchement automatique ne doit être pris en compte dans le cas des conducteurs rigides que si un réenclenchement automatique tripolaire est utilisé.

Section 2: The electromagnetic effect on rigid conductors and flexible conductors

2.1 General

With the calculation methods presented in this section, stresses in rigid conductors, tensile forces in flexible conductors, forces on insulators and substructures, which might expose them to bending, tension and/or compression, and span displacements of flexible conductors can be estimated.

Electromagnetic forces are induced in conductors by the currents flowing through them. Where such electromagnetic forces interact on parallel conductors, they cause stresses that have to be taken into account at the substations. For this reason:

- the forces between parallel conductors are set forth in the following clauses;
- the electromagnetic force components set up in conductors with bends and/or cross-overs may normally be disregarded.

In the case of metal-clad systems, the change of the electromagnetic forces between the conductors due to magnetic shielding can be taken into account. In addition, however, the forces acting between each conductor and its enclosure and between the enclosures shall be considered.

When parallel conductors are long compared to the distance between them, the forces will be evenly distributed along the conductors and are given by the equation

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \frac{l}{a} \quad (1)$$

where

i_1 and i_2 are the instantaneous values of the currents in the conductors;

l is the centre-line distance between the supports;

a is the centre-line distance between the conductors.

When the currents in the two conductors have the same direction, the forces are attractive. When the directions of the currents are opposite, the forces are repulsive.

NOTE - For additional information see: CIGRÉ: The mechanical effects of short-circuit currents in open air substations. Paris: CIGRÉ SC 23, WG 02, 1987.

2.1.1 Influences on stress reduction

When calculating the maximum possible short-circuit current, additional details of other IEC standards may be considered if this results in stress reduction.

2.1.2 Consideration of automatic reclosing

Automatic reclosing shall be taken into account for rigid conductors only if three-phase automatic reclosing is used.

2.2 Installations comportant des conducteurs rigides

2.2.1 Calcul des forces électromagnétiques

2.2.1.1 Calcul de la valeur de crête de la force entre les conducteurs principaux pendant un court-circuit triphasé

Dans une installation triphasée dont les conducteurs principaux sont disposés avec les mêmes entraxes sur un même plan, la force maximale pendant un court-circuit triphasé s'exerce sur le conducteur principal central et est donnée par

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} i_{p3}^2 \frac{l}{a_m} \quad (2)$$

où

i_{p3} est la valeur de crête du courant de court-circuit dans le cas d'un court-circuit triphasé symétrique.
Pour calculer voir CEI 909;

l est l'entraxe maximal des supports;

a_m est la distance équivalente entre conducteurs principaux selon 2.2.1.4.

NOTE - L'équation (2) peut être également utilisée pour le calcul de la valeur de crête de la force résultante lorsque des conducteurs avec des sections circulaires sont placés aux sommets d'un triangle équilatéral, avec a_m représentant la longueur du côté du triangle.

2.2.1.2 Calcul de la valeur de crête de la force entre les conducteurs principaux pendant un court-circuit biphasé

La force maximale s'exerçant entre les conducteurs parcourus par le courant de court-circuit pendant un court-circuit biphasé dans un réseau triphasé ou dans un réseau monophasé à deux conducteurs, est donnée par

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_{p2}^2 \cdot \frac{l}{a_m} \quad (3)$$

où

i_{p2} est la valeur de crête du courant de court-circuit dans le cas d'un court-circuit biphasé;

l est l'entraxe maximal des supports;

a_m est la distance équivalente entre conducteurs principaux selon 2.2.1.4.

2.2.1.3 Calcul de la valeur de crête des forces entre sous-conducteurs coplanaires

La force maximale s'exerce sur les sous-conducteurs extérieurs et est égale, entre deux pièces de liaison, à

$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{i_p}{n} \right)^2 \cdot \frac{l_s}{a_s} \quad (4)$$

où

n est le nombre de sous-conducteurs;

l_s est l'entreaxe maximal existant de deux pièces de liaison adjacentes;

a_s est la distance équivalente entre sous-conducteurs;

i_p est égal à i_{p3} dans le cas d'un réseau triphasé ou à i_{p2} dans le cas d'un réseau monophasé à deux conducteurs.

2.2 Rigid conductor arrangements

2.2.1 Calculation of electromagnetic forces

2.2.1.1 Calculation of peak force between the main conductors during a three-phase short circuit

In a three-phase system with the main conductors arranged with the same centre-line distances on the same plane, the maximum force acts on the central main conductor during a three-phase short circuit and is given by:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} i_{p3}^2 \frac{l}{a_m} \quad (2)$$

where

i_{p3} is the peak value of the short-circuit current in the case of a balanced three-phase short circuit. For calculation, see IEC 909;

l is the maximum centre-line distance between supports;

a_m is the effective distance between main conductors in 2.2.1.4.

NOTE - Equation (2) can also be used for calculating the resulting peak force when conductors with circular cross-sections are in the corners of an equilateral triangle and where a_m is the length of the side of the triangle.

2.2.1.2 Calculation of peak force between the main conductors during a line-to-line short circuit

The maximum force acting between the conductors carrying the short-circuit current during a line-to-line short circuit in a three-phase system or in a two-line single-phase system is given by:

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_{p2}^2 \cdot \frac{l}{a_m} \quad (3)$$

where

i_{p2} is the peak short-circuit current in the case of a line-to-line short circuit;

l is the maximum centre-line distance between supports;

a_m is the effective distance between main conductors in 2.2.1.4

2.2.1.3 Calculation of peak value of forces between coplanar sub-conductors

The maximum force acts on the outer sub-conductors and is between two adjacent connecting pieces given by:

$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{i_p}{n} \right)^2 \cdot \frac{l_s}{a_s} \quad (4)$$

where

n is the number of sub-conductors;

l_s is the maximum existing centre-line distance between two adjacent connecting pieces;

a_s is the effective distance between sub-conductors;

i_p is equal to i_{p3} for a three-phase system or to i_{p2} for a two-line single-phase system.

2.2.1.4 Distance équivalente entre conducteurs principaux et entre sous-conducteurs

Les forces entre les conducteurs parcourus par les courants de court-circuit dépendent de leur configuration géométrique et de leur profil. Pour cette raison, la distance équivalente a_m entre conducteurs principaux a été introduite en 2.2.1.1 et 2.2.1.2 et la distance équivalente a_s entre sous-conducteurs a été introduite en 2.2.1.3. Elles doivent être prises comme suit:

Distance équivalente a_m entre conducteurs principaux coplanaires avec un entraxe a :

- Conducteurs principaux constitués par des sections circulaires simples:

$$a_m = a \quad (5)$$

- Conducteurs principaux constitués par des sections rectangulaires simples et conducteurs principaux composés de sous-conducteurs avec des sections rectangulaires:

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} \quad (6)$$

k_{12} doit être pris sur la figure 1, avec $a_{1s} = a$, $b = b_m$ et $d = d_m$.

Distance équivalente a_s entre les n sous-conducteurs coplanaires d'un conducteur principal:

- Sous-conducteurs avec des sections circulaires:

$$\frac{1}{a_s} = \frac{1}{a_{12}} + \frac{1}{a_{13}} + \frac{1}{a_{14}} + \dots + \frac{1}{a_{1s}} + \dots + \frac{1}{a_{1n}} \quad (7)$$

- Sous-conducteurs avec des sections rectangulaires:

Certaines valeurs de a_s sont données dans le tableau 1. Pour d'autres distances et dimensions de sous-conducteur, l'équation

$$\frac{1}{a_s} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} + \frac{k_{14}}{a_{14}} + \dots + \frac{k_{1s}}{a_{1s}} + \dots + \frac{k_{1n}}{a_{1n}} \quad (8)$$

peut être utilisée. Les valeurs pour $k_{12}, \dots, k_{1n}$ doivent être prises sur la figure 1.

2.2.2 Calcul des contraintes dans les conducteurs rigides et des forces sur les supports

2.2.2.1 Généralités

Les conducteurs peuvent être supportés de différentes façons, soit par des supports encastres, soit par des supports simples, ou par une combinaison de ces deux types. Pour le même courant de court-circuit, les contraintes dans les conducteurs et les forces sur les supports varient en fonction du type et du nombre de supports. Les équations données tiennent également compte de l'élasticité des supports.

Les contraintes dans les conducteurs et les forces sur les supports dépendent également du rapport entre la fréquence propre correspondante du système mécanique et la fréquence du réseau électrique. Par exemple, dans le cas de résonance ou d'une situation proche de la résonance, les contraintes et les forces dans le système peuvent être amplifiées. Si f/f est inférieur à 0,5 la réponse du système décroît, et les contraintes maximales se situent dans les phases extérieures.

2.2.1.4 Effective distance between main conductors and between sub-conductors

The forces between conductors carrying short-circuit currents depend on the geometrical configuration and the profile of the conductors. For this reason the effective distance a_m between main conductors has been introduced in 2.2.1.1 and 2.2.1.2 and the effective distance a_s between sub-conductors in 2.2.1.3. They shall be taken as follows:

Effective distance a_m between coplanar main conductors with the centre-line distance a :

- Main conductors consisting of single circular cross-sections:

$$a_m = a \quad (5)$$

- Main conductors consisting of single rectangular cross-sections and main conductors composed of sub-conductors with rectangular cross-sections:

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} \quad (6)$$

k_{12} shall be taken from figure 1, with $a_{1s} = a$, $b = b_m$ and $d = d_m$.

Effective distance a_s between the n coplanar sub-conductors of a main conductor:

- Sub-conductors with circular cross-sections:

$$\frac{1}{a_s} = \frac{1}{a_{12}} + \frac{1}{a_{13}} + \frac{1}{a_{14}} + \dots + \frac{1}{a_{1s}} + \dots + \frac{1}{a_{1n}} \quad (7)$$

- Sub-conductors with rectangular cross-sections:

Some values for a_s are given in table 1. For other distances and sub-conductor dimensions the equation

$$\frac{1}{a_s} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} + \frac{k_{14}}{a_{14}} + \dots + \frac{k_{1s}}{a_{1s}} + \dots + \frac{k_{1n}}{a_{1n}} \quad (8)$$

can be used. The values for $k_{12}, \dots, k_{1n}$ shall be taken from figure 1.

2.2.2 Calculation of stresses in rigid conductors and forces on supports

2.2.2.1 General

The conductors may be supported in different manners, either fixed or simple or in a combination of both. Depending on the type of support and the number of supports, the stresses in the conductors and the forces on the supports will be different for the same short-circuit current. The equations given also include the elasticity of the supports.

The stresses in the conductors and the forces on the supports also depend on the ratio between the relevant natural frequency of the mechanical system and the electrical system frequency. For example in the case of resonance or near to resonance, the stresses and forces in the system may be amplified. If $f_c/f < 0,5$ the response of the system decreases and the maximum stresses are in the outer phases.

2.2.2.2 Calcul des contraintes dans les conducteurs rigides

Un conducteur est présumé rigide lorsque les forces axiales sont négligées. Dans cette hypothèse, les forces exercées sont des forces de flexion et l'équation générale pour la contrainte de flexion provoquée par les forces entre les conducteurs principaux, est

$$\sigma_m = V_\sigma \cdot V_r \cdot \beta \cdot \frac{F_m l}{8 Z} \quad (9)$$

où F_m , est soit la valeur F_{m3} selon l'équation (2) dans le cas des réseaux triphasés, soit la valeur F_{m2} selon l'équation (3) dans le cas des réseaux monophasés à deux conducteurs, doit être utilisée.

Z est le module de section du conducteur principal et doit être calculé selon la direction des forces entre conducteurs principaux.

La contrainte de flexion provoquée par les forces entre les sous-conducteurs est donnée par

$$\sigma_s = V_{\sigma s} \cdot V_{rs} \cdot \frac{F_s l_s}{16 Z_s} \quad (10)$$

où la valeur F_s doit être calculée selon l'équation (4).

Z_s est le module de section du sous-conducteur et doit être calculé selon la direction des forces entre sous-conducteurs.

V_σ , $V_{\sigma s}$, V_r et V_{rs} sont des facteurs qui tiennent compte du phénomène dynamique et β est un facteur dépendant du type et du nombre de supports. Les valeurs maximales possibles de V_σ , V_r et de $V_{\sigma s}$, V_{rs} doivent être prises dans le tableau 2 et le facteur β doit être pris dans le tableau 3.

NOTE - Pour les poutres du tableau 3 (sauf pour la poutre à une seule portée avec des supports simples) les charges finales réalistes sont calculées avec le facteur β indiqué dans le tableau 3 et le facteur q indiqué dans le tableau 4.

Les portées non-uniformes des poutres continues peuvent être traitées avec un degré suffisant de précision en supposant que la portée maximale est appliquée partout. Ceci signifie que:

- les supports d'extrémité ne sont pas soumis à une contrainte supérieure à celle des supports intérieurs;
- les longueurs de portée inférieures à 20 % de celles des portées adjacentes doivent être évitées. Si cela s'avère ne pas être possible, les conducteurs doivent être découplés à l'aide de joints flexibles à l'emplacement des supports. S'il y a un joint flexible dans une portée, il convient que la longueur de cette portée soit inférieure à 70 % de celles des portées adjacentes.

Si cela n'est pas évident que la poutre soit supportée ou encastrée, le cas le plus défavorable doit être retenu.

Pour un examen plus approfondi, voir 2.2.2.6.

2.2.2.2 Calculation of stresses in rigid conductors

The assumption that the conductor is rigid means that the axial forces are disregarded. Under this assumption the forces acting are bending forces and the general equation for the bending stress caused by the forces between main conductors is given by:

$$\sigma_m = V_\sigma \cdot V_r \cdot \beta \cdot \frac{F_m l}{8 Z} \quad (9)$$

where F_m is either the value F_{m3} of three-phase systems according to equation (2) or F_{m2} of two-line single-phase systems according to equation (3).

Z is the section modulus of the main conductor and shall be calculated with respect to the direction of forces between main conductors.

The bending stress caused by the forces between sub-conductors is given by:

$$\sigma_s = V_{\sigma s} \cdot V_{rs} \cdot \frac{F_s l_s}{16 Z_s} \quad (10)$$

where F_s according to equation (4) shall be used.

Z_s is the section modulus of the sub-conductor and shall be calculated with respect to the direction of forces between sub-conductors.

V_σ , $V_{\sigma s}$, V_r and V_{rs} are factors which take into account the dynamic phenomena, and β is a factor depending on the type and the number of supports. The maximum possible values of V_σ , V_r and $V_{\sigma s}$, V_{rs} shall be taken from table 2 and the factor β shall be taken from table 3.

NOTE - For the beams in table 3 (except the single span beam with simple supports) the realistic ultimate loads are calculated with the factors β given in table 3 and q given in table 4.

Non-uniform spans in continuous beams may be treated, with sufficient degree of accuracy by assuming the maximum span applied throughout. This means that:

- the end supports are not subjected to greater stress than the inner ones,
- span lengths less than 20 % of the adjacent ones shall be avoided. If that does not prove to be possible, the conductors shall be decoupled using flexible joints at the supports. If there is a flexible joint within a span, the length of this span should be less than 70 % of the lengths of the adjacent spans.

If it is not evident whether a beam is supported or fixed, the worst case shall be taken into account.

For further consideration, see 2.2.2.6.

2.2.2.3 *Module de section et facteur q des conducteurs principaux composés de sous-conducteurs*

La contrainte de flexion et, par conséquent, la tenue mécanique du conducteur dépendent du module de section.

Si la contrainte se produit comme indiqué par la figure 2 a), le module de section Z est indépendant du nombre de pièces de liaison et est égal à la somme des modules de section Z_s des sous-conducteurs (Z_s par rapport à l'axe x-x). Le facteur q a alors une valeur de 1,5 pour les sections rectangulaires et de 1,19 pour les sections en U et en I.

Si la contrainte se produit comme indiqué par la figure 2 b) et s'il n'y a qu'un seul raidisseur ou pas de raidisseurs entre deux supports consécutifs, le module de section Z est égal à la somme des modules de section Z_s des sous-conducteurs (Z_s par rapport à l'axe y-y). Le facteur q a alors une valeur de 1,5 pour les sections rectangulaires et de 1,83 pour les sections en U et en I.

Lorsque entre deux supports consécutifs, il y a deux raidisseurs ou plus, il est possible d'utiliser des valeurs de modules de section plus élevées:

- Dans le cas de conducteurs principaux composés de sous-conducteurs de section rectangulaire, avec un espace entre barres correspondant à l'épaisseur de celles-ci, les modules de section sont indiqués dans le tableau 5.
- Dans le cas des groupes de conducteurs avec des sections en U et en I, il convient d'utiliser des modules de section égaux à 50 % des modules de section par rapport à l'axe 0-0.

Le facteur q a alors une valeur de 1,5 pour les sections rectangulaires, et de 1,83 pour les sections en U et en I.

2.2.2.4 *Contrainte admissible dans un conducteur*

Un conducteur unique est supposé capable de supporter les forces de court-circuit lorsque

$$\sigma_m \leq q R_{p0,2} \quad (11)$$

où $R_{p0,2}$ est la contrainte correspondant à la limite élastique.

Le facteur q doit être pris dans le tableau 4, voir également 2.2.2.3.

Dans le cas d'un conducteur principal constitué de deux sous-conducteurs ou plus, la contrainte totale dans le conducteur est donnée par

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_m + \sigma_s \quad (12)$$

NOTE - Pour les sections rectangulaires, σ_{tot} est la somme algébrique de σ_m et de σ_s , indépendamment des directions de charge (voir figure 2).

2.2.2.3 Section modulus and factor q of main conductors composed of sub-conductors

The bending stress and consequently the mechanical withstand of the conductor depend on the section modulus.

If the stress occurs in accordance with figure 2a), the section modulus Z is independent of the number of connecting pieces and is equal to the sum of the section moduli Z_s of the sub-conductors (Z_s with respect to the axis x-x). The factor q has then the value 1,5 for rectangular cross-sections and 1,19 for U and I sections.

If the stress occurs in accordance with figure 2b) and in the case there is only one or no stiffening element within a supported distance, the section modulus Z is equal to the sum of the section moduli Z_s of the sub-conductors (Z_s with respect to the axis y-y). The factor q has then the value 1,5 for rectangular cross-sections and 1,83 for U and I sections.

When within a supported distance there are two or more stiffening elements, higher values of section moduli may be used:

- For main conductors composed of sub-conductors of rectangular cross-sections with a space between the bars equal to the bar thickness, the section moduli are given in table 5.
- For conductor groups having U and I cross-sections, 50 % of the section moduli with respect to the axis 0-0 should be used.

The factor q then has a value of 1,5 for rectangular cross-section and 1,83 for U and I sections.

2.2.2.4 Permitted conductor stress

A single conductor is assumed to withstand the short-circuit forces when:

$$\sigma_m \leq q R_{p0,2} \quad (11)$$

where $R_{p0,2}$ is the stress corresponding to the yield point.

The factor q shall be taken from table 4, see also 2.2.2.3.

When a main conductor consists of two or more sub-conductors the total stress in the conductor is given by:

$$\sigma_{tot} = \sigma_m + \sigma_s \quad (12)$$

NOTE - For rectangular cross-sections σ_{tot} is the algebraic sum of σ_m and σ_s independent of the loading directions (see figure 2).

Le conducteur est supposé supporter les forces de court-circuit lorsque

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

Il est nécessaire de vérifier que le court-circuit n'affecte pas trop la distance entre sous-conducteurs; pour cette raison il est recommandé que

$$\sigma_s \leq R_{p0,2} \quad (14)$$

Le tableau 4 indique les valeurs admissibles les plus élevées de q pour différentes sections. Pour $\sigma_m = q R_{p0,2}$ et $\sigma_{\text{tot}} = q R_{p0,2}$ de petites déformations permanentes peuvent se produire, de l'ordre de 1 % de la distance entre supports pour les valeurs de q indiquées par le tableau 4; elles ne mettent pas la sécurité en cause pourvu que les distances minimales entre les conducteurs principaux ou entre un conducteur principal et la structure reliée à la terre ne soient pas, de ce fait, transgressées.

NOTE - Les normes indiquent souvent pour la limite élastique des matériaux conducteurs, $R_{p0,2}$, des plages entre des valeurs minimales et maximales. Si seules de telles valeurs limites sont disponibles au lieu des valeurs réelles, il convient d'utiliser la valeur minimale en 2.2.2.4 et la valeur maximale dans le tableau 2.

2.2.2.5 Calcul des forces exercées sur les supports de conducteurs rigides

La force dynamique F_d doit être calculée à partir de

$$F_d = V_F V_r \alpha F_m \quad (15)$$

où pour F_m soit la valeur F_{m3} selon l'équation (2) dans le cas des réseaux triphasés, soit la valeur F_{m2} selon l'équation (3) dans le cas des réseaux monophasés à deux conducteurs, doit être utilisée.

Les valeurs maximales possibles de $V_F V_r$ doivent être prises dans le tableau 2.

Le facteur α dépend du type et du nombre de supports et doit être pris dans le tableau 3. En ce qui concerne la charge de conception pour les supports isolants et les connecteurs, voir l'article 2.4.

Pour un examen plus approfondi, voir 2.2.2.6.

2.2.2.6 Calcul tenant compte de l'oscillation des conducteurs

Les équations en 2.2.2.2 et 2.2.2.5 contiennent des facteurs V_σ , $V_{\sigma s}$, V_F , V_r et V_{rs} qui tiennent compte de la nature oscillatoire des contraintes et des forces.

Les limites supérieures de ces facteurs sont indiquées dans le tableau 2. Des valeurs inférieures à celles-ci sont autorisées si elles sont évaluées à l'aide du présent paragraphe. Il est nécessaire de calculer la fréquence propre appropriée f_c en tenant compte de la précision des données.

The conductor is assumed to withstand the short-circuit forces when:

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

It is necessary to verify that the short circuit does not affect the distance between sub-conductors too much, therefore a value

$$\sigma_s \leq R_{p0,2} \quad (14)$$

is recommended.

In table 4 the highest acceptable values for q for different cross-sections are given. For $\sigma_m = q R_{p0,2}$ respectively $\sigma_{\text{tot}} = q R_{p0,2}$ small permanent deformations may occur, approximately 1 % of the distance between supports for q -values according to table 4, which do not jeopardize the safety of operation as long as by this the minimum clearances between main conductors or between a main conductor and the earthed structure are not violated.

NOTE - For the yield point of conductor materials, $R_{p0,2}$, the standards often state ranges with minimum and maximum values. If only such limit values rather than actual readings are available, the minimum value should be used in 2.2.2.4 and the maximum value in table 2.

2.2.2.5 Calculation of forces on supports of rigid conductors

The dynamic force F_d shall be calculated from:

$$F_d = V_F V_r \alpha F_m \quad (15)$$

where F_m is either the value F_{m3} of three-phase systems according to equation (2) or F_{m2} of two-line single-phase systems according to equation (3) shall be used.

The maximum possible values of $V_F V_r$ shall be taken from table 2.

The factor α is dependent on the type and the number of supports and shall be taken from table 3. Regarding the design load on post insulators and connectors, see clause 2.4.

For further consideration, see 2.2.2.6.

2.2.2.6 Calculation with special regard to conductor oscillation

The equations in 2.2.2.2 and 2.2.2.5 contain factors V_σ , $V_{\sigma s}$, V_F , V_r and V_{rs} which take into account oscillatory nature of the stresses and forces.

The upper limits of these factors are given in table 2. Lower values than these are permitted, if they are estimated by this subclause. It is necessary to calculate the relevant natural frequency f_c taking into account the accuracy of the data.

2.2.2.6.1 Calcul de la fréquence propre appropriée

La fréquence propre correspondant à un conducteur peut être calculée à partir de

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m'}} \quad (16)$$

L'équation (16) est directement applicable aux conducteurs principaux constitués par des sections uniques.

Le facteur γ dépend du type et du nombre de supports et est indiqué dans le tableau 3.

Pour un conducteur principal composé de sous-conducteurs de section rectangulaire, la fréquence propre correspondant au conducteur principal doit être calculée à partir de

$$f_c = c \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} \quad (17)$$

Le facteur c doit être pris sur les graphiques b) ou c) de la figure 3. Dans le cas où il n'y a pas de pièces de liaison, c est égal à 1.

Pour un conducteur principal composé de sous-conducteurs de sections en U ou en I, f_c est calculée à partir de l'équation (16). J et m' doivent s'appliquer à la conception du conducteur principal.

Pour le calcul de la contrainte dans un sous-conducteur, en tenant compte de la fréquence propre correspondante, l'équation

$$f_{cs} = \frac{3,56}{l_s^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} \quad (18)$$

doit être utilisée.

NOTE - Les moments d'inertie d'aire plane J et J_s sont calculés selon les figures 2 a) ou 2 b).

2.2.2.6.2 Facteurs V_F , V_σ , V_{cs} , V_r et V_{rs}

Les facteurs V_F , V_σ , V_{cs} , V_r et V_{rs} en tant que fonctions des rapports f_c/f et f_{cs}/f , où f est la fréquence du réseau, sont légèrement différents dans le cas d'un court-circuit triphasé ou dans celui d'un court-circuit biphasé et dépendent également de l'amortissement mécanique du système de conducteurs. Pour les calculs pratiques, ces facteurs doivent être pris sur la figure 4.

NOTES

- 1 Une durée du court-circuit $T_k \leq 0,1$ s peut provoquer une réduction appréciable de la contrainte dans les structures lorsque f_c/f est ≤ 1 .
- 2 Dans le cas de supports élastiques, la fréquence propre correspondante est inférieure à celle calculée avec l'équation (16). Ceci doit être pris en considération lorsque la figure 4 est utilisée, si la valeur de f_c/f est supérieure à 2,4.

Dans le cas de réenclenchements automatiques tripolaires, les facteurs V_r et V_{rs} doivent être pris sur la figure 5 ; dans les autres cas V_r et V_{rs} sont égaux à 1.

2.2.2.6.1 Calculation of relevant natural frequency

The relevant natural frequency of a conductor can be calculated from:

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m'}} \quad (16)$$

Equation (16) is directly applicable to main conductors consisting of single cross-sections.

The factor γ is dependent on the type and number of supports and is given in table 3.

If the main conductor is composed of sub-conductors of rectangular cross-section, the relevant natural frequency of the main conductor shall be calculated from:

$$f_c = c \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} \quad (17)$$

The factor c shall be taken from graph b) or c) of figure 3. In the case of no connecting pieces $c = 1$.

For a main conductor composed of sub-conductors of U and I sections f_c is calculated from equation (16): J and m' shall apply to the main conductor design.

For the calculation of sub-conductor stress, taking the relevant natural frequency into account, the equation

$$f_{cs} = \frac{3,56}{l_s^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} \quad (18)$$

shall be used.

NOTE - The second moments of area J and J_s are calculated according to figures 2 a) or 2 b).

2.2.2.6.2 The factors V_F , V_σ , V_{os} , V_r and V_{rs}

The factors V_F , V_σ , V_{os} , V_r and V_{rs} as functions of the ratio f_c/f and f_{cs}/f , where f is the system frequency, are a little different if a three-phase short circuit or a line-to-line short circuit is to be concerned, and they are also dependent on the mechanical damping of the conductor system. For practical calculations these factors shall be taken from figure 4.

NOTES

- 1 Short-circuit duration $T_k \leq 0,1$ s can cause an appreciable reduction of the stress in structures with $f_c/f \leq 1$.
- 2 In the case of elastic supports the relevant natural frequency is lower than calculated with equation (16). This is to be considered when using figure 4, if the value of f_c/f is greater than 2,4.

For three-phase automatic reclosing, the factors V_r and V_{rs} shall be taken from figure 5; in other cases $V_r = 1$, $V_{rs} = 1$.

2.3 Installations comportant des conducteurs souples

2.3.1 Généralités

Les forces de tension maximales résultant de l'effet d'un court-circuit sur les conducteurs principaux sont déterminées après calcul des paramètres caractéristiques pour la configuration et le type de court-circuit, selon 2.3.2.1. Dans une portée, il y a une différence entre la force de tension F_t pendant le court-circuit, selon 2.3.2.2, et la force de tension F_f lorsque le conducteur retombe après le court-circuit, selon 2.3.2.3. La force de tension F_{pi} provoquée par l'effet de pincement dans les faisceaux de conducteurs est calculée en 2.3.3. Le déplacement horizontal maximal de la portée et la distance minimale dans l'air entre les conducteurs sont déterminés en 2.3.2.4.

Dans les installations comportant des conducteurs souples, les contraintes se produisant lors des courts-circuits biphasés et lors des courts-circuits triphasés équilibrés sont approximativement les mêmes. Cependant, dans le cas des courts-circuits biphasés, l'oscillation des conducteurs a pour conséquence typique de diminuer les distances minimales, (c'est-à-dire lorsque les conducteurs adjacents parcourus par le courant de court-circuit se déplacent l'un vers l'autre après le court-circuit). Dans le cas d'un court-circuit triphasé équilibré, le conducteur central ne se déplace que légèrement, par suite de son inertie et du fait que les forces agissent sur lui alternativement dans les deux directions. Pour cette raison, F_t , F_f et b_h sont calculés pour un court-circuit biphasé.

Les forces de tensions F_t , F_f et F_{pi} incluent les forces de tension provoquées par les poids morts.

Les calculs ci-après doivent être effectués sur la base de la force de tension statique F_{st} existant à la température hivernale minimale du lieu, par exemple $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et aussi sur la base de la force de tension statique F_{st} existant à la température de fonctionnement maximale, par exemple $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pour chaque force de tension, le cas le plus défavorable doit être retenu pour la conception.

NOTES

- 1 Les équations suivantes s'appliquent pour des longueurs de portée allant jusqu'à environ 60 m et des rapports entre la flèche et la longueur de la portée jusqu'à environ 8 %. Pour des portées plus longues, le mouvement du conducteur peut avoir pour conséquences des contraintes inférieures à celles calculées à l'aide des équations. Si ceci peut être prouvé à l'aide de calculs ou de mesures, des charges inférieures peuvent être retenues.
- 2 Les paragraphes suivants s'appliquent aux portées horizontales dans la configuration côte à côte. D'autres configurations peuvent avoir pour conséquence des forces de tension inférieures. Cependant, à cause des calculs compliqués qui seraient nécessaires, il est recommandé, pour le calcul de ces cas, d'utiliser également les équations données.
- 3 Il convient de prendre en considération la contribution, à la force de gravité, des masses additionnelles concentrées.
- 4 Dans le cas des conducteurs souples, l'effet d'amplification résultant du réenclenchement automatique ne nécessite pas d'être pris en considération.

2.3.2 Effets sur le conducteur principal

Les paragraphes suivants s'appliquent à des conducteurs uniques et aux configurations symétriques de faisceaux dont les points centraux sont situés sur un cercle, avec des distances égales entre les sous-conducteurs adjacents.

2.3 Flexible conductor arrangements

2.3.1 General

The maximum tensile forces due to the effect of a short circuit on main conductors, are determined after calculation of the characteristic parameters for the configuration and type of short circuit as in 2.3.2.1. In a span there is a difference between the tensile force F_t during the short circuit, as in 2.3.2.2, and the tensile force F_f after the short circuit as in 2.3.2.3, when the conductor drops back. In 2.3.3, the tensile force F_{pi} caused by the pinch effect in the conductor bundles is calculated. The maximum horizontal displacement of the span and the minimum air clearance between conductors are determined in 2.3.2.4.

In installations with flexible conductors, the stresses occurring in line-to-line short circuits and balanced three-phase short circuits are approximately equal. However, for line-to-line short circuits, conductor swing out typically results in decreasing minimum clearances, (i.e. when adjacent conductors carrying short-circuit current move towards one another after the short circuit). In the case of balanced three-phase short circuit, the center conductor moves only slightly because of its inertia and the alternating bidirectional forces which act on it. Consequently F_t , F_f and b_h are therefore calculated for a line-to-line short circuit.

The tensile forces F_t , F_f and F_{pi} include the tensile forces caused by the dead-load.

The following calculations shall be carried out on the basis of the static tensile force F_{st} existing at the local minimum winter temperature, e.g. $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, and also on the basis of the static tensile force F_{st} existing at the maximum operating temperature, e.g. $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. For each tensile force, the worst case shall be taken into account for design purposes.

NOTES

- 1 The following equations apply for span lengths up to approximately 60 m and ratios of sag to span-length to approx. 8 %. For longer spans, the movement of the conductor can result in lower stresses than calculated using the equations. If this can be proved by computation or measurement, lower loads may be taken into account.
- 2 The following subclauses apply for horizontal spans in side-by-side configuration. Other configurations may result in lower tensile forces. However, because of the complicated computation involved, it is recommended to use the given equations for calculating these cases also.
- 3 The contribution of additional concentrated masses within the span to the gravitational force should be considered.
- 4 For flexible conductors, magnification effect due to automatic reclosing need not be considered.

2.3.2 Effects on main conductor

The following subclauses apply to single conductors and to regular bundle configurations, where the midpoints are located on a circle with equal distances between adjacent sub-conductors.

2.3.2.1 Dimensions et paramètres caractéristiques

La charge électromagnétique caractéristique par unité de longueur sur des conducteurs principaux souples dans des réseaux triphasés est donnée par

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I''_{k3})^2}{a} \frac{l_c}{l} \quad (19)$$

où

I''_{k3} est le courant de court-circuit symétrique initial triphasé (valeur efficace);

a est l'entraxe entre les points centraux des conducteurs principaux;

l_c est la longueur à la corde du conducteur principal dans la portée.

Dans le cas des conducteurs détendus qui exercent des forces de flexion sur les isolateurs supports, l_c est égale à l . Dans le cas des portées avec des conducteurs tendus, $l_c = l - 2l_i$, où l_i est la longueur d'une chaîne d'isolateurs.

NOTES

1 Dans le cas des réseaux monophasés à deux conducteurs, remplacer $0,75(I''_{k3})^2$ dans l'équation (19) par $(I''_2)^2$.

2 La procédure de calcul ne tient pas compte de la contribution de la composante apériodique du courant de court-circuit. Toutefois, cela n'influence les résultats de façon significative que si la durée du passage du courant de court-circuit est inférieure à 0,1 s. Dans ce cas, il y a lieu de se reporter au document: «Effets mécaniques des courants de court-circuit dans les postes ouverts», CIGRÉ - 1987, Groupe de Travail 23.02 de la Commission d'études 23.

Le rapport entre la force électromagnétique lors d'un court-circuit et la force de gravité sur un conducteur, est un paramètre important donné par

$$r = \frac{F'}{n m'_s g_n} \quad (20)$$

et qui donne la direction de la force résultante exercée sur le conducteur:

$$\delta_1 = \arctan r \quad (21)$$

La flèche statique équivalente du conducteur en milieu de portée est donnée par

$$b_c = \frac{n m'_s g_n l^2}{8 F_{st}} \quad (22)$$

La période T des oscillations du conducteur est donnée par

$$T = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{b_c}{g_n}} \quad (23)$$

et s'applique au cas des faibles angles d'oscillation sans passage de courant dans le conducteur.

La période résultante T_{res} de l'oscillation du conducteur pendant le passage du courant de court-circuit est donnée par

2.3.2.1 Characteristic dimensions and parameters

The characteristic electromagnetic load per unit length on flexible main conductors in three-phase systems is given by:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I''_{k3})^2}{a} \frac{l_c}{l} \quad (19)$$

where

I''_{k3} is the three-phase initial symmetrical short-circuit current (r.m.s.);

a is the centre-line distance between main conductor mid-points;

l_c is the cord length of the main conductor in the span.

For slack conductors which exert bending forces on the support insulators $l_c = l$. For spans with strained conductors $l_c = l - 2l_i$, where l_i is the length of one insulator chain.

NOTES

- 1 In the case of two-line single-phase systems replace $0,75(I''_{k3})^2$ in equation (19) by $(I''_{k2})^2$.
- 2 The calculation procedure does not consider the contribution of the aperiodic component of the short-circuit current. This will, however, significantly influence the result only if the duration of the short-circuit current flow is less than 0,1 s. In this case reference is made to : CIGRÉ: The mechanical effects of short-circuit currents in open air substations. Paris: CIGRÉ SC 23, WG 02, 1987.

The ratio of electromagnetic force under short-circuit conditions to the gravitational force on a conductor is an important parameter given by:

$$r = \frac{F'}{n m'_s g_n} \quad (20)$$

and gives the direction of the resulting force exerted on the conductor:

$$\delta_1 = \arctan r \quad (21)$$

The equivalent static conductor sag at midspan is given by

$$b_c = \frac{n m'_s g_n l^2}{8 F_{st}} \quad (22)$$

The period T of the conductor oscillations is given by

$$T = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{b_c}{g_n}} \quad (23)$$

and applies for small swing-out angles without current flow in the conductor.

The resulting period T_{res} of the conductor oscillation during the short-circuit current flow is given by:

$$T_{\text{res}} = \frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left[\frac{\delta_1}{90^\circ} \right]^2 \right]} \quad (24)$$

où δ_1 doit être indiqué en degrés.

La norme de rigidité est donnée par

$$N = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{n E_s A_s} \quad (25)$$

Si la valeur exacte de S n'est pas connue dans l'équation (25), il convient d'utiliser pour S la valeur de 10^5 N/m dans le cas des conducteurs détendus qui exercent des forces de flexion sur les isolateurs supports. Dans le cas des portées avec des conducteurs tendus, les spécifications pour S sont à l'étude.

E_s est le module de Young réel

$$E_s = \begin{cases} E \left[0,3 + 0,7 \sin \left(\frac{F_{st}}{n A_s \sigma_{fin}} 90^\circ \right) \right] & \text{pour } \frac{F_{st}}{n A_s} \leq \sigma_{fin} \\ E & \text{pour } \frac{F_{st}}{n A_s} > \sigma_{fin} \end{cases} \quad (26)$$

où

$$\sigma_{fin} = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (27)$$

σ_{fin} est la plus faible valeur de σ quand le module de Young devient constant. Le module de Young final, E , pour les conducteurs câblés doit être utilisé.

Le facteur de contrainte ζ du conducteur principal est donné par

$$\zeta = \frac{(ng_n m'_s l)^2}{24 F_{st}^3 N} \quad (28)$$

Pendant le passage du courant de court-circuit ou à la fin de celui-ci, la portée a oscillé, par rapport à la position en régime établi, d'un angle donné par:

$$\delta_k = \begin{cases} \delta_1 \left[1 - \cos \left[360^\circ \frac{T_{k1}}{T_{res}} \right] \right] & \text{si } 0 \leq \frac{T_{k1}}{T_{res}} \leq 0,5 \\ 2 \delta_1 & \text{si } \frac{T_{k1}}{T_{res}} > 0,5 \end{cases} \quad (29)$$

$$T_{\text{res}} = \frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left[\frac{\delta_1}{90^\circ} \right]^2 \right]} \quad (24)$$

where δ_1 shall be given in degrees.

The stiffness norm is given by:

$$N = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{n E_s A_s} \quad (25)$$

If the exact value of S is not known in equation (25), the value $S = 10^5$ N/m should be used for slack conductors which exert bending forces on support insulators. For spans with strained conductors specifications for S are under consideration.

E_s is the actual Young's modulus

$$E_s = \begin{cases} E \left[0,3 + 0,7 \sin \left(\frac{F_{\text{st}}}{n A_s \sigma_{\text{fin}}} 90^\circ \right) \right] & \text{for } \frac{F_{\text{st}}}{n A_s} \leq \sigma_{\text{fin}} \\ E & \text{for } \frac{F_{\text{st}}}{n A_s} > \sigma_{\text{fin}} \end{cases} \quad (26)$$

where

$$\sigma_{\text{fin}} = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (27)$$

σ_{fin} is the lowest value of σ when Young's modulus becomes constant. The final Young's modulus E for stranded conductors shall be used.

The stress factor ζ of the main conductor is given by:

$$\zeta = \frac{(n g_n m'_s l)^2}{24 F_{\text{st}}^3 N} \quad (28)$$

During or at the end of the short-circuit current flow, the span will have oscillated out of the steady-state position to the angle given by:

$$\delta_k = \begin{cases} \delta_1 \left[1 - \cos \left[360^\circ \frac{T_{k1}}{T_{\text{res}}} \right] \right] & \text{for } 0 \leq \frac{T_{k1}}{T_{\text{res}}} \leq 0,5 \\ 2 \delta_1 & \text{for } \frac{T_{k1}}{T_{\text{res}}} > 0,5 \end{cases} \quad (29)$$

Dans la mesure où la durée du premier passage du courant de court-circuit, T_{k1} , telle que définie en 1.4.1.9, est connue, l'angle maximal d'oscillation δ_m peut être déterminé à l'aide de la figure 6 ou calculé comme ci-après. Autrement, ou si la valeur de T_{k1} est supérieure à $0,4 T$, la valeur $0,4 T$ doit alors être utilisée pour T_{k1} dans les équations (29), (32) et (37).

Pendant ou après le passage du courant de court-circuit, la portée a oscillé jusqu'à l'angle maximal d'oscillation δ_m qui est obtenu comme suit:

$$\chi = \begin{cases} 1 - r \sin \delta_k & \text{si } 0 \leq \delta_k \leq 90^\circ \\ 1 - r & \text{si } \delta_k > 90^\circ \end{cases} \quad (30)$$

$$\text{et} \quad \delta_m = \begin{cases} 1,25 \arccos \chi & \text{si } 0,766 \leq \chi \leq 1 \\ 10^\circ + \arccos \chi & \text{si } -0,985 \leq \chi < 0,766 \\ 180^\circ & \text{si } \chi < -0,985 \end{cases} \quad (31)$$

NOTE - L'angle d'oscillation calculé δ_m , est la valeur maximale qui peut se produire pour le cas le plus défavorable qui correspond à une durée de court-circuit inférieure ou égale à la durée indiquée de court-circuit T_{k1} .

2.3.2.2 Force de tension F_t provoquée par une oscillation pendant un court-circuit (force de tension d'un court-circuit)

Le paramètre de charge ϕ est obtenu comme suit:

$$\phi = \begin{cases} 3(\sqrt{1+r^2} - 1) & \text{si } T_{k1} \geq T_{res}/4 \\ 3(r \sin \delta_k + \cos \delta_k - 1) & \text{si } T_{k1} < T_{res}/4 \end{cases} \quad (32)$$

Le facteur ψ est une fonction de ζ et de ϕ et est déterminé sur la figure 7. Il peut être calculé comme une solution réelle de l'équation

$$\phi^2 \psi^3 + \phi(2+\zeta)\psi^2 + (1+2\zeta)\psi - \zeta(2+\phi) = 0 \quad (33)$$

avec $0 \leq \psi \leq 1$

La force de tension F_t est donnée par :

$$F_t = \begin{cases} F_{st}(1 + \phi\psi) & \text{si } n = 1, \text{ conducteur unique} \\ 1,1 F_{st}(1 + \phi\psi) & \text{si } n \geq 2, \text{ conducteurs en faisceaux} \end{cases} \quad (34)$$

2.3.2.3 Force de tension F_f provoquée par une chute après un court-circuit (force de chute)

A la fin du court-circuit la portée oscille ou retombe. La valeur maximale F_f pour une portée à la fin de la chute n'est significative que pour $r > 0,6$ si $\delta_m \geq 70^\circ$. Dans ce cas, la force de chute est donnée par:

Insofar as the duration of the first short-circuit current flow T_{k1} as defined in 1.4.1.9 is known, the maximum swing-out angle δ_m may be determined as per figure 6 or calculated as given below. Otherwise, or if T_{k1} is greater than the value $0,4 T$, then the value $0,4 T$ shall be used for T_{k1} in equations (29), (32) and (37).

During or after the short-circuit current flow the span will have oscillated to the maximum swing-out angle δ_m which is obtained as follows:

$$\chi = \begin{cases} 1 - r \sin \delta_k & \text{for } 0 \leq \delta_k \leq 90^\circ \\ 1 - r & \text{for } \delta_k > 90^\circ \end{cases} \quad (30)$$

and

$$\delta_m = \begin{cases} 1,25 \arccos \chi & \text{for } 0,766 \leq \chi \leq 1 \\ 10^\circ + \arccos \chi & \text{for } -0,985 \leq \chi < 0,766 \\ 180^\circ & \text{for } \chi < -0,985 \end{cases} \quad (31)$$

NOTE - The calculated swing-out angle δ_m is the maximum value which can occur for the "worst case" which is a short-circuit duration less than or equal to the stated short-circuit duration T_{k1} .

2.3.2.2 Tensile force F_t during short circuit caused by swing out (short-circuit tensile force)

The load parameter ϕ is obtained as follows

$$\phi = \begin{cases} 3(\sqrt{1+r^2}-1) & \text{for } T_{k1} \geq T_{res}/4 \\ 3(r \sin \delta_k + \cos \delta_k - 1) & \text{for } T_{k1} < T_{res}/4 \end{cases} \quad (32)$$

The factor ψ is a function of ζ and ϕ and is determined in figure 7. It can be calculated as a real solution of the equation

$$\phi^2 \psi^3 + \phi(2+\zeta)\psi^2 + (1+2\zeta)\psi - \zeta(2+\phi) = 0 \quad (33)$$

with $0 \leq \psi \leq 1$

The tensile force F_t is given by

$$F_t = \begin{cases} F_{st}(1 + \phi\psi) & \text{for } n = 1, \text{ single conductor} \\ 1,1 F_{st}(1 + \phi\psi) & \text{for } n \geq 2, \text{ bundled conductors} \end{cases} \quad (34)$$

2.3.2.3 Tensile force F_f after short circuit caused by drop (drop force)

On termination of the short circuit the span oscillates or drops back. The maximum value F_f for a span on termination of the drop is only significant for $r > 0,6$ if $\delta_m \geq 70^\circ$. In this case the drop force is given by:

$$F_f = 1,2 F_{st} \sqrt{1 + 8 \zeta \frac{\delta_m}{180^\circ}} \quad (35)$$

NOTE - Dans les portées courtes, la rigidité à la flexion de la portée réduit sa chute, ce qui signifie que cette chute est calculée par excès si la longueur de la portée est inférieure à environ 100 fois le diamètre du conducteur unique, c'est-à-dire $l < 100 d_s$.

2.3.2.4 Déplacement horizontal de la portée b_h et distance minimale dans l'air $a_{\min}$

L'extension élastique est donnée par

$$\epsilon_{ela} = N (F_t - F_{st}) \quad (36)$$

La dilatation thermique est donnée par

$$\epsilon_{th} = \begin{cases} c_{th} \left[\frac{I''_{k3}}{n A_s} \right]^2 T_{res} / 4 & \text{si } T_{k1} \geq T_{res} / 4 \\ c_{th} \left[\frac{I''_{k3}}{n A_s} \right]^2 T_{k1} & \text{si } T_{k1} < T_{res} / 4 \end{cases} \quad (37)$$

Prendre comme valeur de c_{th} :

$0,27 \cdot 10^{-18} \text{ m}^4/(\text{A}^2\text{s})$ pour les conducteurs en aluminium, en alliage d'aluminium et en aluminium-acier avec un rapport de section Al/Ac > 6 ;

$0,17 \cdot 10^{-18} \text{ m}^4/(\text{A}^2\text{s})$ pour les conducteurs en aluminium-acier, avec un rapport de section Al/Ac ≤ 6 ;

$0,088 \cdot 10^{-18} \text{ m}^4/(\text{A}^2\text{s})$ pour le cuivre.

NOTE - Dans le cas de réseaux monophasés à deux conducteurs, remplacer I''_{k3} dans l'équation (37) par I''_{k2} .

Le facteur C_D tient compte des augmentations de la flèche résultant de l'extension élastique et de la dilatation thermique du conducteur et est donné par

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left[\frac{l}{b_c} \right]^2 (\epsilon_{ela} + \epsilon_{th})} \quad (38)$$

Le facteur C_F tient compte d'une augmentation possible de la flèche dynamique du conducteur résultant d'une modification de la forme de la courbe du conducteur et est donné par

$$C_F = \begin{cases} 1,05 & \text{si } r \leq 0,8 \\ 0,97 + 0,1 r & \text{si } 0,8 < r < 1,8 \\ 1,15 & \text{si } r \geq 1,8 \end{cases} \quad (39)$$

$$F_f = 1,2 F_{st} \sqrt{1 + 8 \zeta \frac{\delta_m}{180^\circ}} \quad (35)$$

NOTE - In short spans the bending stiffness of the span reduces the span drop, which means that the span drop is calculated to be too large if the span length is less than approximately 100 times the diameter of the single conductor, i.e. $l < 100 d_s$.

2.3.2.4 Horizontal span displacement b_h and minimum air clearance $a_{\min}$

The elastic expansion is given by:

$$\epsilon_{ela} = N (F_t - F_{st}) \quad (36)$$

The thermal expansion is given by:

$$\epsilon_{th} = \begin{cases} c_{th} \left[\frac{I''_{k3}}{n A_s} \right]^2 T_{res} / 4 & \text{for } T_{kl} \geq T_{res} / 4 \\ c_{th} \left[\frac{I''_{k3}}{n A_s} \right]^2 T_{kl} & \text{for } T_{kl} < T_{res} / 4 \end{cases} \quad (37)$$

For c_{th} use:

$0,27 \cdot 10^{-18} \text{ m}^4/(\text{A}^2\text{s})$ for aluminium, aluminium alloy and aluminium/steel conductors with a cross section ratio of $\text{Al/St} > 6$;

$0,17 \cdot 10^{-18} \text{ m}^4/(\text{A}^2\text{s})$ for aluminium/steel conductors with a cross section ratio of $\text{Al/St} \leq 6$;

$0,088 \cdot 10^{-18} \text{ m}^4/(\text{A}^2\text{s})$ for copper.

NOTE - In the case of two-line single-phase systems, replace I''_{k3} in equation (37) by I''_{k2} .

The factor C_D allows for sag increases caused by elastic and thermal elongation of the conductor and is given by

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left[\frac{l}{b_c} \right]^2 (\epsilon_{ela} + \epsilon_{th})} \quad (38)$$

The factor C_F allows for a possible increase in the dynamic sag of the conductor caused by a change in shape of the conductor curve and is given by:

$$C_F = \begin{cases} 1,05 & \text{for } r \leq 0,8 \\ 0,97 + 0,1 r & \text{for } 0,8 < r < 1,8 \\ 1,15 & \text{for } r \geq 1,8 \end{cases} \quad (39)$$

Le déplacement horizontal maximal d'une portée, b_h , par suite d'un court-circuit, est donné par l'équation suivante pour les portées avec des conducteurs détendus, $l_c = l$, raccordés à des isolateurs supports et à du matériel:

$$b_h = \begin{cases} C_F C_D b_c & \text{si } \delta_m \geq 90^\circ \\ C_F C_D b_c \sin \delta_m & \text{si } \delta_m < 90^\circ \end{cases} \quad \text{si } l_c = l; \quad (40)$$

Le déplacement horizontal maximal d'une portée, b_h , par suite d'un court-circuit, est donné par l'équation suivante pour les portées avec des conducteurs tendus, $l_c = l - 2l_i$, raccordés à des portiques par des chaînes d'isolateurs de traction:

$$b_h = \begin{cases} C_F C_D b_c \sin \delta_1 & \text{si } \delta_m \geq \delta_1 \\ C_F C_D b_c \sin \delta_m & \text{si } \delta_m < \delta_1 \end{cases} \quad \text{si } l_c = l - 2l_i; \quad (41)$$

δ_m , δ_1 et b_c sont définis en 2.3.2.1.

Sous l'effet d'un court-circuit, les conducteurs dans une configuration sur un seul plan sont déplacés au milieu de la portée, dans le cas le plus défavorable, sur un cercle de rayon b_h autour de la ligne droite entre les deux points d'ancrage adjacents. La distance entre les points milieux des deux conducteurs principaux pendant un court-circuit biphasé est donnée, dans le cas le plus défavorable, par

$$a_{\min} = a - 2b_h \quad (42)$$

2.3.3 Force de tension F_{pi} provoquée par l'effet de pincement

2.3.3.1 Dimensions et paramètres caractéristiques

Ce qui suit s'applique à des configurations symétriques de faisceaux pour lesquelles les points milieux des sous-conducteurs sont situés sur un cercle, avec des distances égales a_s entre les sous-conducteurs adjacents.

Si la distance entre les sous-conducteurs et la configuration des entretoises sont telles que les sous-conducteurs du faisceau s'entrechoquent effectivement pendant un court-circuit, la force de tension F_{pi} peut être négligée, au contraire de la force de tension F_t calculée en 2.3.2.2, pour des configurations symétriques de faisceaux comportant jusqu'à quatre sous-conducteurs.

Les sous-conducteurs sont considérés comme s'entrechoquant effectivement si la distance a_s entre les points milieux des sous-conducteurs adjacents, ainsi que la distance l_s entre deux entretoises adjacentes, satisfont soit aux équations (43), soit aux équations (44):

$$a_s/d_s \leq 2,0 \quad \text{et} \quad l_s \geq 50 a_s \quad (43)$$

$$a_s/d_s \leq 2,5 \quad \text{et} \quad l_s \geq 70 a_s \quad (44)$$

Si la configuration symétrique du faisceau ne remplit pas les conditions indiquées ci-dessus, les équations suivantes s'appliquent pour le calcul de F_{pi} .

The maximum horizontal displacement within a span, b_h , due to a short circuit is given by the following for spans with slack conductors $l_c = l$ connected to support insulators and equipment

$$b_h = \begin{cases} C_F C_D b_c & \text{for } \delta_m \geq 90^\circ \\ C_F C_D b_c \sin \delta_m & \text{for } \delta_m < 90^\circ \end{cases} \text{ for } l_c = l; \quad (40)$$

The maximum horizontal displacement within a span, b_h , due to a short circuit is given by the following for spans with strained conductors $l_c = l - 2l_i$ connected to portals with tension insulator strings

$$b_h = \begin{cases} C_F C_D b_c \sin \delta_1 & \text{for } \delta_m \geq \delta_1 \\ C_F C_D b_c \sin \delta_m & \text{for } \delta_m < \delta_1 \end{cases} \text{ for } l_c = l - 2l_i; \quad (41)$$

δ_m , δ_1 and b_c are defined in 2.3.2.1.

Due to a short circuit, conductors in a single plane configuration are displaced at the midpoint of the span in the worst case in a circle of radius b_h about straight line connection of the two adjacent anchor points. The distance between the midpoints of the two main conductors during a line-to-line two-phase short circuit is given in the worst case by

$$a_{\min} = a - 2b_h \quad (42)$$

2.3.3 Tensile force F_{pi} caused by the pinch effect

2.3.3.1 Characteristic dimensions and parameters

The following applies to regular bundle configurations, where the midpoints of the sub-conductors are located on a circle with equal distances a_s between adjacent sub-conductors.

If the clearance between sub-conductors and the configuration of the spacers are such that the sub-conductors of the bundle effectively clash during a short circuit, the tensile force F_{pi} may be ignored in contrast to the tensile force F_t calculated in 2.3.2.2 for regular bundle configurations of up to four sub-conductors.

Sub-conductors are considered to clash effectively if the clearance a_s between the midpoints of adjacent sub-conductors, as well as the distance l_s between two adjacent spacers fulfil either equations (43) or (44):

$$a_s/d_s \leq 2,0 \text{ and } l_s \geq 50 a_s \quad (43)$$

$$a_s/d_s \leq 2,5 \text{ and } l_s \geq 70 a_s \quad (44)$$

If the regular bundle configuration does not fulfil the conditions stated above, the following equations apply to calculating F_{pi} .

La force du courant de court-circuit est déterminée par

$$F_v = (n - 1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I''_{k3}}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \frac{v_2}{v_3} \quad (45)$$

NOTE - Dans le cas de réseaux monophasés à deux conducteurs, remplacer I''_{k3} dans les équations (45), (46), (52) et (55) par I''_{k2} .

Le facteur v_2 est donné par la figure 8 comme une fonction de

$$v_1 = f \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \sqrt{\frac{(a_s - d_s) m'_s}{\frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I''_{k3}}{n} \right)^2 \cdot \frac{n-1}{a_s}}} \quad (46)$$

où f est la fréquence du réseau et où le facteur v_3 est celui donné par la figure 9.

Si le courant de court-circuit initial monophasé à la terre I''_{k1} est supérieur au courant de court-circuit symétrique initial triphasé I''_{k3} , ce dernier doit être remplacé par I''_{k1} dans les équations (45), (46), (52) et (55).

Les facteurs de contrainte caractérisant la contraction du faisceau doivent être calculés à partir de

$$\epsilon_{st} = 1,5 \frac{F_{st} l_s^2 N}{(a_s - d_s)^2} \left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^2 \quad (47)$$

$$\epsilon_{pi} = 0,375 n \frac{F_v l_s^3 N}{(a_s - d_s)^3} \left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^3 \quad (48)$$

Le paramètre

$$j = \sqrt{\frac{\epsilon_{pi}}{1 + \epsilon_{st}}} \quad (49)$$

détermine la configuration du faisceau pendant le passage du courant de court-circuit, comme suit:

- $j \geq 1$ Les sous-conducteurs s'entrechoquent. La force de tension F_{pi} est calculée en 2.3.3.2;
- $j < 1$ Les sous-conducteurs réduisent leur distance mais ne s'entrechoquent pas. La force de tension F_{pi} est calculée en 2.3.3.3.

2.3.3.2 Force de tension F_{pi} dans le cas de sous-conducteurs s'entrechoquant

Si j est supérieur ou égal à 1, la force de tension F_{pi} est obtenue à partir de

$$F_{pi} = F_{st} \left(1 + \frac{v_e}{\epsilon_{st}} \xi \right) \quad (50)$$

The short-circuit current force is given by:

$$F_v = (n - 1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I''_{k3}}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \frac{v_2}{v_3} \quad (45)$$

NOTE - In the case of two-line single-phase systems, replace I''_{k3} in equation (45), (46), (52) and (55) by I''_{k2} .

The factor v_2 is given by figure 8, as a function of

$$v_1 = f \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \cdot \sqrt{\frac{(a_s - d_s) m'_s}{\frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I''_{k3}}{n} \right)^2 \cdot \frac{n-1}{a_s}}} \quad (46)$$

where f is the system frequency, and the factor v_3 is given by figure 9.

If the line-to-earth initial short-circuit current I''_{k1} is greater than the three-phase initial symmetrical short-circuit current I''_{k3} , the latter shall be replaced by I''_{k1} in equations (45), (46), (52) and (55).

The strain factors characterizing the contraction of the bundle shall be calculated from

$$\epsilon_{st} = 1,5 \frac{F_{st} l_s^2 N}{(a_s - d_s)^2} \left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^2 \quad (47)$$

$$\epsilon_{pi} = 0,375 n \frac{F_v l_s^2 N}{(a_s - d_s)^3} \left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^3 \quad (48)$$

The parameter

$$j = \sqrt{\frac{\epsilon_{pi}}{1 + \epsilon_{st}}} \quad (49)$$

determines the bundle configuration during short-circuit current flow as follows:

- $j \geq 1$ The sub-conductors clash. The tensile force F_{pi} is calculated in 2.3.3.2;
- $j < 1$ The sub-conductors reduce their distance but do not clash. The tensile force F_{pi} is calculated in 2.3.3.3.

2.3.3.2 Tensile force F_{pi} in the case of clashing sub-conductors

If $j \geq 1$, the tensile force F_{pi} is obtained from

$$F_{pi} = F_{st} \left(1 + \frac{v_e}{\epsilon_{st}} \xi \right) \quad (50)$$

ξ est donné par la solution réelle de

$$\xi^3 + \epsilon_{st} \xi^2 - \epsilon_{pi} = 0 \quad (51)$$

avec $j^{2/3} \leq \xi \leq j$, lequel doit être déterminé de façon analytique ou pris sur la figure 10.

v_e est donné par

$$v_e = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} n(n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I''_{k3}}{n} \right)^2 N \cdot v_2 \left(\frac{l_s}{a_s - d_s} \right)^4 \frac{\left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^4}{\xi^3} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (52)$$

avec

$$v_4 = \frac{a_s - d_s}{d_s} \quad (53)$$

2.3.3.3 Force de tension F_{pi} dans le cas de sous-conducteurs ne s'entrechoquant pas

Si j est inférieur à 1, la force de tension F_{pi} est obtenue à partir de

$$F_{pi} = E_{st} \left(1 + \frac{v_e}{\epsilon_{st}} \eta^2 \right) \quad (54)$$

η est alors donné par un des diagrammes de la figure 11, en fonction du paramètre a_s/d_s .

v_e est donné par

$$v_e = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} n(n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I''_{k3}}{n} \right)^2 N \cdot v_2 \left(\frac{l_s}{a_s - d_s} \right)^4 \frac{\left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^4}{\eta^4} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (55)$$

avec

$$v_4 = \eta \frac{a_s - d_s}{a_s - \eta (a_s - d_s)} \quad (56)$$

ξ is given by the real solution of

$$\xi^3 + \epsilon_{st} \xi^2 - \epsilon_{pi} = 0 \quad (51)$$

with $j^{2/3} \leq \xi \leq j$, which shall be determined analytically or shall be taken from figure 10.

v_e is given by

$$v_e = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} n(n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I''_{k3}}{n} \right)^2 N \cdot v_2 \left(\frac{l_s}{a_s - d_s} \right)^4 \frac{\left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^4}{\xi^3} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (52)$$

with

$$v_4 = \frac{a_s - d_s}{d_s} \quad (53)$$

2.3.3.3 Tensile force F_{pi} in the case of non-clashing sub-conductors

If $j < 1$, the tensile force F_{pi} is obtained from

$$F_{pi} = F_{st} \left(1 + \frac{v_e}{\xi_{st}} \eta^2 \right) \quad (54)$$

η is then given by one of the diagrams in figure 11, depending on the parameter a_s/d_s .

v_e is given by

$$v_e = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} n(n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I''_{k3}}{n} \right)^2 N \cdot v_2 \left(\frac{l_s}{a_s - d_s} \right)^4 \frac{\left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^4}{\eta^4} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (55)$$

with

$$v_4 = \eta \frac{a_s - d_s}{a_s - \eta (a_s - d_s)} \quad (56)$$

NOTES

1 La fonction inversée $j(\eta)$ de la figure 11 peut être calculée de façon analytique avec l'ensemble d'équations suivant:

$$y_a = \frac{1}{2} [a_s - \eta (a_s - d_s)] \quad (57)$$

$$a_{sw} = a_s \frac{2y_a/a_s}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \cdot \frac{\sqrt{\frac{1 - 2y_a/a_s}{2y_a/a_s}}}{\arctan \sqrt{\frac{1 - 2y_a/a_s}{2y_a/a_s}}} \quad (58)$$

$$f_\eta = \frac{a_s v_3}{a_{sw}} \quad (59)$$

$$a_s v_3 = \frac{d_s}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \cdot \frac{\sqrt{a_s/d_s - 1}}{\arctan \sqrt{a_s/d_s - 1}} \quad (60)$$

$$j = \sqrt{\frac{\eta^3 + \epsilon_{st} \eta}{(1 + \epsilon_{st}) f_\eta}} \quad (61)$$

2 La fonction $\eta(j)$ de la figure 11 peut être obtenue en résolvant numériquement l'équation du troisième degré ci-après comportant des coefficients non linéaires, avec $0 < \eta \leq 1$.

$$\eta^3 + \epsilon_{st} \eta - \epsilon_{pi} f_\eta = 0 \quad (62)$$

2.4 Charges de structure résultant des effets électromagnétiques

2.4.1 Charge de conception pour les supports isolants, leurs supports et leurs connecteurs

La force F_d dans le cas des installations comportant des conducteurs rigides et la valeur maximale de F_t , F_f ou F_{pi} , dans le cas des installations comportant des conducteurs souples, ne doit pas être plus élevée que la valeur de tenue indiquée par le constructeur des isolateurs et des supports. Dans le cas d'un isolateur contraint par une force de flexion, la valeur de tenue assignée est indiquée pour une force agissant sur la tête de l'isolateur. Dans le cas d'une force agissant sur un point plus élevé que la tête de l'isolateur, une valeur de tenue inférieure à la valeur de tenue assignée doit être utilisée, basée sur le moment de tenue à la flexion à l'emplacement de la section critique de l'isolateur.

Les connecteurs des conducteurs rigides doivent être spécifiés sur la base de F_d . Les connecteurs des conducteurs souples doivent être spécifiés sur la base de la valeur maximale de $1,5 F_t$, $1,0 F_f$ ou $1,0 F_{pi}$.

NOTE - Le coefficient 1,5 prend en compte le fait que l'énergie des oscillations est absorbée par la masse des isolateurs.

NOTES

1 The inverted function $j(\eta)$ of figure 11 can be calculated analytically with the following set of equations:

$$y_a = \frac{1}{2} [a_s - \eta (a_s - d_s)] \quad (57)$$

$$a_{sw} = a_s \frac{2y_a/a_s}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \cdot \frac{\sqrt{\frac{1 - 2y_a/a_s}{2y_a/a_s}}}{\arctan \sqrt{\frac{1 - 2y_a/a_s}{2y_a/a_s}}} \quad (58)$$

$$f_\eta = \frac{a_s v_3}{a_{sw}} \quad (59)$$

$$a_s v_3 = \frac{d_s}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \cdot \frac{\sqrt{a_s/d_s - 1}}{\arctan \sqrt{a_s/d_s - 1}} \quad (60)$$

$$j = \sqrt{\frac{\eta^3 + \epsilon_{st} \eta}{(1 + \epsilon_{st}) f_\eta}} \quad (61)$$

2 The function $\eta(j)$ of figure 11 can be obtained by solving numerically the following cubic equation with nonlinear coefficients, with $0 < \eta \leq 1$.

$$\eta^3 + \epsilon_{st} \eta - \epsilon_{pi} f_\eta = 0 \quad (62)$$

2.4 Structure loads due to electromagnetic effects

2.4.1 Design load for post insulators, their supports and connectors

The force F_d for rigid conductor arrangements and the maximum value of F_v , F_f or F_{pi} for flexible conductor arrangements shall not be greater than the withstand value given by the manufacturer of supports and insulators. For an insulator stressed by a bending force the rated withstand value is given as a force acting at the insulator head. For a force acting at a point higher than the insulator head a withstand value lower than the rated withstand value shall be used, based on the withstand bending moment at the critical insulator cross-section.

Connectors for rigid conductors shall be rated on the basis of F_d . Connectors for flexible conductors shall be rated on the basis of the maximum value of $1,5 F_v$, $1,0 F_f$ or $1,0 F_{pi}$.

NOTE - The factor 1,5 takes into account that the energy of oscillations is absorbed by the mass of the insulators.

2.4.2 *Charge de conception pour les structures, les isolateurs et les connecteurs, avec les forces de tension transmises par les chaînes d'isolateurs*

La valeur maximale de F_t , F_f ou F_{pi} , dans le cas des portées de conducteurs souples, doit être appliquée à la structure, aux isolateurs et aux connecteurs comme étant une charge statique.

NOTES

- 1 Cette charge de conception peut être traitée comme un cas de charge exceptionnelle (par exemple les séismes) conformément à des normes de conception.
- 2 Dans la conception des structures triphasées pour le cas des courts-circuits triphasés, il convient de se rappeler que la valeur maximale de F_t ou F_f n'apparaît que dans deux phases et que la troisième phase n'est soumise qu'à la tension statique.
- 3 Dans la conception des structures triphasées pour le cas des courts-circuits triphasés, différentes valeurs maximales de F_{pi} peuvent se produire à des moments différents dans les trois phases. Cet effet est à peu près respecté en appliquant la valeur calculée de F_{pi} à deux phases de la structure.

2.4.3 *Charges de conception pour les fondations*

A l'étude.

2.4.2 *Design load for structures, insulators and connectors, with tensile forces transmitted by insulator chains*

The maximum value of F_t , F_f or F_{pi} of flexible conductor spans shall be applied to the structure, the insulators and the connectors as a static load.

NOTES

- 1 This design load may be treated as an exceptional load case (e.g. as earthquakes) according to design standards.
- 2 In the design of three-phase structures for three-phase short circuits it should be remembered that the maximum value of F_t or F_f will appear in two phases, and the third phase will be subjected only to the static tension.
- 3 In the design of three phase structures for three-phase short circuits different maximum values of F_{pi} may occur at different times in the three phases. This effect will be met approximately by applying the calculated F_{pi} to two phases of the structure.

2.4.3 *Design load for foundations*

Under consideration.

Section 3: Effets thermiques sur les conducteurs nus et sur le matériel électrique

3.1 Généralités

La présente section donne des méthodes de calcul des effets thermiques sur les conducteurs nus et sur le matériel électrique.

L'échauffement des conducteurs résultant des courants de court-circuit met en jeu plusieurs phénomènes de caractère non linéaire et d'autres facteurs qui ont été soit négligés, soit établis approximativement, afin de permettre une approche mathématique.

Pour les besoins de la présente section, les hypothèses suivantes ont été faites:

- l'effet de peau (influence magnétique d'un conducteur sur lui-même) et l'effet de proximité (influence magnétique entre conducteurs parallèles proches) sont négligés;
- la relation entre la résistance et la température est supposée linéaire;
- la chaleur spécifique du conducteur est considérée comme constante;
- l'échauffement est considéré comme adiabatique.

3.2 Calcul de l'échauffement

3.2.1 Généralités

La perte de chaleur par un conducteur pendant un court-circuit est très faible, et l'échauffement est considéré comme adiabatique. Les calculs dans la présente section sont basés sur des conditions adiabatiques.

Lors de courts-circuits répétés, séparés par de courts intervalles de temps (par exemple réenclenchement automatique rapide) le refroidissement pendant le court temps mort est d'une importance relativement faible et l'échauffement peut encore être considéré comme adiabatique. Lorsque le temps mort est de plus longue durée (par exemple réenclenchement automatique lent) il est possible de tenir compte de la perte de chaleur.

Les calculs ne prennent pas en compte l'effet de peau ou l'effet de proximité, c'est-à-dire que le courant est considéré comme uniformément réparti dans toute la section du conducteur. Pour les fortes sections, au-dessus de 600 mm², l'effet de peau doit être pris en compte. Pour de tels calculs, il convient de se reporter à la littérature technique.

NOTE - Si le conducteur principal est composé de sous-conducteurs, la répartition non uniforme du courant entre les sous-conducteurs a une influence sur leur échauffement.

3.2.2 Calcul du courant thermique équivalent de courte durée

Le courant thermique équivalent de courte durée doit être calculé à partir de la valeur efficace du courant de court-circuit et des facteurs m et n relatifs aux effets thermiques des composantes continues et alternatives du courant de court-circuit en fonction du temps.

Section 3: The thermal effect on bare conductors and electrical equipment

3.1 General

This section gives calculation methods for the thermal effect on bare conductors and electrical equipment.

The heating of conductors due to short-circuit currents involves several phenomena of a non-linear character and other factors that have been either neglected or approximated in order to make the mathematical approach possible.

For the purpose of this section the following assumptions have been made:

- skin-effect (magnetic influence of a conductor itself) and proximity-effect (magnetic influence of nearby parallel conductors) are disregarded;
- resistance-temperature characteristic is assumed linear;
- the specific heat of the conductor is considered constant;
- the heating is considered adiabatic.

3.2 Calculation of temperature rise

3.2.1 General

The loss of heat from a conductor during the short circuit is very low, and the heating is considered adiabatic. The calculation in this section is based on adiabatic conditions.

When repeated short circuits occur with a short-time interval between them (e.g. rapid automatic reclosing) the cooling in the short dead-time is of relatively little importance, and the heating can still be considered adiabatic. In cases where the dead-time interval is of longer duration (e.g. delayed automatic reclosing), the heat loss may be taken into account.

The calculation does not take into account the skin effect or the proximity effect, i.e. the current is regarded as evenly distributed over the conductor cross-section area. For large cross sections above 600 mm² the skin effect shall be taken into account. For such calculations reference should be made to the literature.

NOTE - If the main conductor is composed of sub-conductors, uneven current distribution between the sub-conductors will influence the temperature rise of sub-conductors.

3.2.2 Calculation of thermal equivalent short-time current

The thermal equivalent short-time current shall be calculated using the short-circuit current r.m.s. value and the factors m and n for the time-dependent heat effects of the d.c. and a.c. components of the short-circuit current.

Le courant thermique équivalent de courte durée peut être exprimé par

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m + n} \quad (63)$$

où

m et n sont des facteurs numériques;

I_k'' est la valeur efficace du courant de court-circuit symétrique initial.

Les valeurs de m et n sont indiquées par la figure 12, en fonction de la durée du courant de court-circuit. Habituellement n est égal à 1 pour un réseau de distribution.

Lorsque plusieurs courts-circuits se produisent à des intervalles rapprochés, le courant thermique équivalent de courte durée résultant est obtenu à partir de

$$I_{th} = \sqrt{\frac{1}{T_k} \sum_{i=1}^n I_{thi}^2 T_{ki}} \quad (64)$$

où

$$T_k = \sum_{i=1}^n T_{ki} \quad (65)$$

Pour le calcul du courant thermique équivalent de courte durée dans un réseau triphasé, le court-circuit triphasé équilibré est normalement décisif.

En ce qui concerne les dispositifs limiteurs de courant, le courant thermique équivalent de courte durée, I_{th} , et la durée associée du courant de court-circuit, T_k , sont indiqués par le constructeur.

3.2.3 Calcul de l'échauffement et de la densité du courant de tenue de courte durée assigné des conducteurs

L'échauffement d'un conducteur résultant d'un court-circuit est fonction de la durée du courant de court-circuit, du courant thermique équivalent de courte durée et du matériau constitutif du conducteur.

En utilisant les diagrammes de la figure 13, l'échauffement d'un conducteur peut être calculé lorsque la densité du courant de tenue de courte durée assigné est connue, ou vice versa.

Les températures de courte durée les plus élevées recommandées pour différents conducteurs sont indiquées par le tableau 6. Si ces températures sont atteintes, une diminution négligeable de la résistance mécanique peut se produire, qui empiriquement ne met pas en cause la sécurité. La température maximale admissible du support doit être prise en compte.

The thermal equivalent short-time current can be expressed by:

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m + n} \quad (63)$$

where

m and n are numerical factors;

I_k'' is the r.m.s. value of the initial symmetrical short-circuit current.

The values m and n are shown in figure 12, as functions of the duration of the short-circuit current. For a distribution network usually $n = 1$.

When a number of short circuits occur with a short time interval between them, the resulting thermal equivalent short-time current is obtained from:

$$I_{th} = \sqrt{\frac{1}{T_k} \sum_{i=1}^n I_{thi}^2 T_{ki}} \quad (64)$$

where

$$T_k = \sum_{i=1}^n T_{ki} \quad (65)$$

For the calculation of the thermal equivalent short-time current in a three-phase system the three-phase balanced short circuit is normally decisive.

For current-limiting devices the thermal equivalent short-time current I_{th} and the associated duration of short-circuit current T_k are given by the manufacturer.

3.2.3 Calculation of temperature rise and rated short-time withstand current density for conductors

The temperature rise of a conductor caused by a short circuit is a function of the duration of the short-circuit current, the thermal equivalent short-time current and the conductor material.

By use of the graphs in figure 13, it is possible to calculate the temperature rise of a conductor when the rated short-time withstand current density is known or vice versa.

The highest recommended short-time temperatures for different conductors are given in table 6. If they are reached, a negligible decrease in strength can occur which does not empirically jeopardize the safety in operation. The maximum permitted temperature of the support shall be taken into account.

3.2.4 Détermination de la résistance thermique au court-circuit pour différentes durées du courant de court-circuit

3.2.4.1 Matériel électrique

Le matériel électrique a une résistance thermique au court-circuit suffisante pourvu que le courant thermique équivalent de courte durée, I_{th} , satisfasse aux relations suivantes:

$$I_{th} \leq I_{thr} \quad \text{si} \quad T_k \leq T_{kr} \quad (66a)$$

ou

$$I_{th} \leq I_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \quad \text{si} \quad T_k \geq T_{kr} \quad (66b)$$

où

I_{thr} est le courant de tenue de courte durée assigné;

T_{kr} est la courte durée assignée.

3.2.4.2 Conducteurs

Les conducteurs nus ont une résistance thermique au court-circuit suffisante pourvu que la densité du courant thermique équivalent de courte durée, S_{th} , satisfasse à la relation suivante, pour toute valeur de T_k :

$$S_{th} \leq S_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \quad (67)$$

La densité du courant de tenue de courte durée assigné S_{thr} est indiquée sur la figure 13 pour $T_{kr} = 1$ s.

L'âme en acier d'un conducteur en aluminium renforcé par de l'acier (Al-Ac) ne doit pas être prise en compte lors du calcul de la surface de la section pour la détermination de la densité de courant.

Dans certains pays, l'équation suivante (intégrale de Joule) est utilisée au lieu de l'équation (67):

$$\int i^2 dt = I_{th}^2 \cdot T_k \leq K^2 \cdot A^2 \quad (68)$$

où

I_{th} doit être obtenu par l'équation (63) ou (64);

T_k doit être obtenu par l'équation (65).

$$K = S_{thr} \sqrt{T_{kr}} \quad (69)$$

3.2.4 Calculation of the thermal short-circuit strength for different durations of the short-circuit current

3.2.4.1 Electrical equipment

Electrical equipment has sufficient thermal short-circuit strength as long as the following relations hold for the thermal equivalent short-time current I_{th} :

$$I_{th} \leq I_{thr} \quad \text{for} \quad T_k \leq T_{kr} \quad (66a)$$

or

$$I_{th} \leq I_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \quad \text{for} \quad T_k \geq T_{kr} \quad (66b)$$

where

I_{thr} is the rated short-time withstand current;

T_{kr} is the rated short-time.

3.2.4.2 Conductors

Bare conductors have sufficient thermal short-circuit strength as long as the following relation holds for the thermal equivalent short-time current density S_{th} for all T_k values:

$$S_{th} \leq S_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \quad (67)$$

The rated short-time withstand current density S_{thr} is shown in figure 13, for $T_{kr} = 1$ s.

The steel core of the aluminium conductor steel reinforced (ACSR) shall not be taken into account when calculating the cross-section area for the estimation of the current density.

In some countries instead of equation (67) the following equation (Joule integral) is used:

$$\int I^2 dt = I_{th}^2 \cdot T_k \leq K^2 \cdot A^2 \quad (68)$$

where

I_{th} shall be taken from equation (63) or (64);

T_k shall be taken from equation (65).

$$K = S_{thr} \sqrt{T_{kr}} \quad (69)$$

Tableau 1 - Distance équivalente entre sous-conducteurs, a_s , en mètres, pour des sections rectangulaires

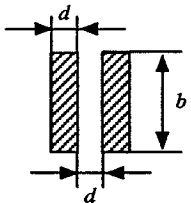
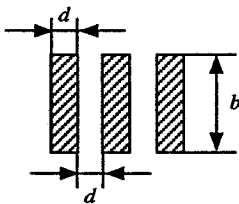
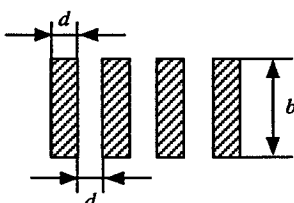
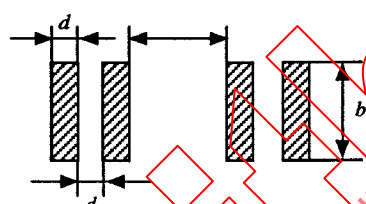
Sections rectangulaires	$\frac{b}{d}$	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20
	0,005	0,020	0,024	0,027	0,033	0,040	—	—	—
	0,010	0,028	0,031	0,034	0,041	0,047	0,054	0,067	0,080
	0,005	—	0,013	0,015	0,018	0,022	—	—	—
	0,010	0,017	0,019	0,020	0,023	0,027	0,030	0,037	0,043
	0,005	—	—	—	—	—	—	—	—
	0,010	0,014	0,015	0,016	0,018	0,020	0,022	0,026	0,031
	0,005	—	0,014	0,015	0,018	0,020	—	—	—
	0,010	0,017	0,018	0,020	0,022	0,025	0,027	0,032	—

Table 1 - Effective distance a_s between sub-conductors in metres,
for rectangular cross-section dimensions

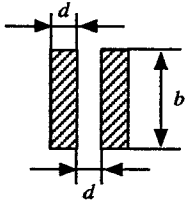
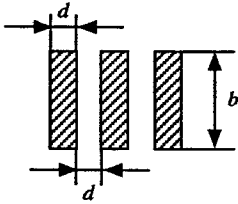
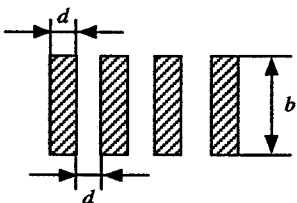
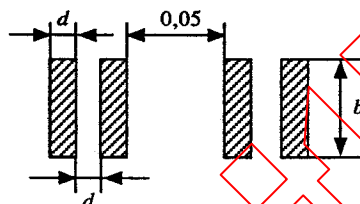
Rectangular cross sections	$\frac{b}{d}$	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20
	0,005	0,020	0,024	0,027	0,033	0,040	—	—	—
	0,010	0,028	0,031	0,034	0,041	0,047	0,054	0,067	0,080
	0,005	—	0,013	0,015	0,018	0,022	—	—	—
	0,010	0,017	0,019	0,020	0,023	0,027	0,030	0,037	0,043
	0,005	—	—	—	—	—	—	—	—
	0,010	0,014	0,015	0,016	0,018	0,020	0,022	0,026	0,031
	0,005	—	0,014	0,015	0,018	0,020	—	—	—
	0,010	0,017	0,018	0,020	0,022	0,025	0,027	0,032	—

Tableau 2 - Valeurs maximales possibles de $V_{\sigma} V_r$, $V_{\sigma s} V_{rs}$, $V_F V_r$

Type de court-circuit	Réseau		
	Sans réenclenchement automatique tripolaire	Avec réenclenchement automatique tripolaire	Avec et sans réenclenchement automatique tripolaire
	$V_{\sigma} V_r$, $V_{\sigma s} V_{rs}$	$V_{\sigma} V_r$, $V_{\sigma s} V_{rs}$	$V_F V_r$
Biphasé	1,0	1,8	$2,0$ si $\frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 0,5$ $\frac{0,8 R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ si $0,5 < \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 1,0$ $1,0$ si $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}}$ gamme ① ② ③
Triphasé	1,0	1,8	$2,7$ si $\frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 0,370$ $\frac{0,8 R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ si $0,370 < \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 1,0$ $1,0$ si $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}}$ gamme ① ② ③

Table 2 - Maximum possible values of $V_{\sigma} V_r$, $V_{\sigma s} V_{rs}$, $V_F V_r$

Type of short circuit	System		
	Without three-phase automatic reclosing	With three-phase automatic reclosing	With and without three-phase automatic reclosing
	$V_{\sigma} V_r$, $V_{\sigma s} V_{rs}$	$V_{\sigma} V_r$, $V_{\sigma s} V_{rs}$	$V_F V_r$
line-to-line	1,0	1,8	$2,0$ for $\frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 0,5$ $\frac{0,8 R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ for $0,5 < \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} < 1,0$ $1,0$ for $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}}$ range ① ② ③
three-phase	1,0	1,8	$2,7$ for $\frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 0,370$ $\frac{0,8 R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ for $0,370 < \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} < 1,0$ $1,0$ for $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}}$ range ① ② ③

Tableau 3 - Facteurs α , β , et γ pour différentes dispositions de supports de jeux de barres

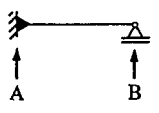
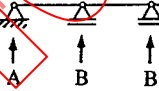
Type de poutre et de support		Facteur α	Facteur β^*	Facteur γ
Poutre à une seule portée	A et B: supports simples 	A: 0,5 B: 0,5	1,0	1,57
	A: support encastré B: support simple 	A: 0,625 B: 0,375	0,73	2,45
	A et B: supports encastrés 	A: 0,5 B: 0,5	0,5	3,56
Poutre continue avec supports simples équidistants	Deux portées 	A: 0,375 B: 1,25	0,73	2,45
	Trois portées et plus 	A: 0,4 B: 1,1	0,73	3,56
* Y compris les effets de la plasticité				

Table 3 - Factors α , β , and γ for different busbar support arrangements

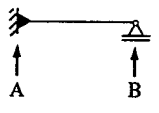
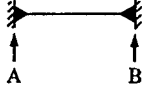
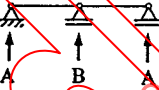
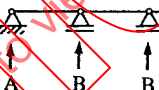
Type of beam and support		Factor α	Factor β^*	Factor γ
Single span beam	A and B: simple supports 	A: 0,5 B: 0,5	1,0	1,57
	A: fixed support B: simple support 	A: 0,625 B: 0,375	0,73	2,45
	A and B: fixed supports 	A: 0,5 B: 0,5	0,5	3,56
Continuous beam with equidistant simple supports	Two spans 	A: 0,375 B: 1,25	0,73	2,45
	Three or more spans 	A: 0,4 B: 1,1	0,73	3,56
* Plasticity effects included				

Tableau 4 - Facteur q

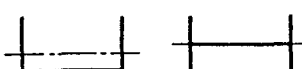
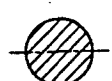
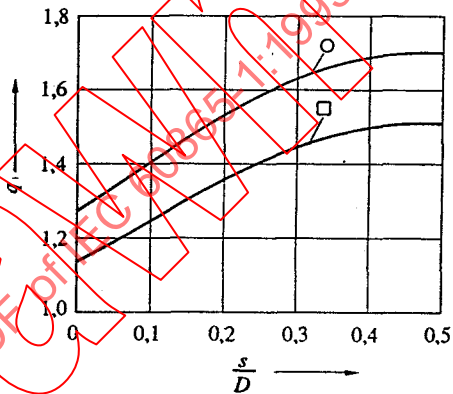
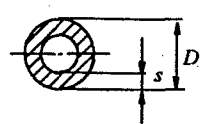
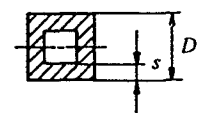
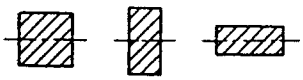
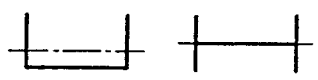
Section	Section
 $q = 1,5$	 $q = 1,83$
	 $q = 1,19$
 $q = 1,7$	
 $q = 1,7 \frac{1 - (1 - 2s/D)^3}{1 - (1 - 2s/D)^4}$	
 $q = 1,5 \frac{1 - (1 - 2s/D)^3}{1 - (1 - 2s/D)^4}$	
q correspond à l'axe de flexion en pointillé. Les forces sont perpendiculaires à cet axe.	

Table 4 - Factor q

Cross section	Cross section
 $q = 1,5$	 $q = 1,83$
	 $q = 1,19$

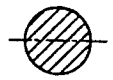
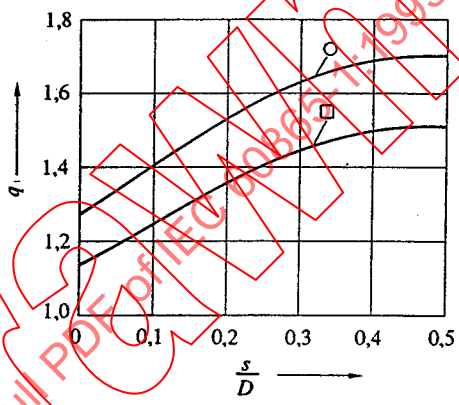
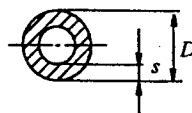
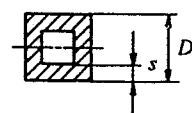
 $q = 1,7$	
 $q = 1,7 \frac{1 - (1 - 2s/D)^3}{1 - (1 - 2s/D)^4}$	
 $q = 1,5 \frac{1 - (1 - 2s/D)^3}{1 - (1 - 2s/D)^4}$	
q is valid for the dotted bending axis. The forces are perpendicular to it.	

Tableau 5 - Modules de section Z de conducteurs principaux avec deux raidisseurs ou plus entre deux supports adjacents.
Les raidisseurs sont représentés en noir.

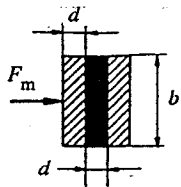
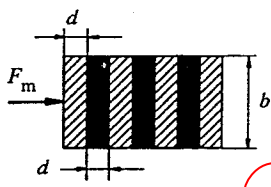
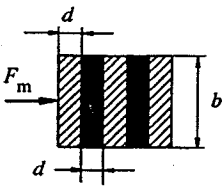
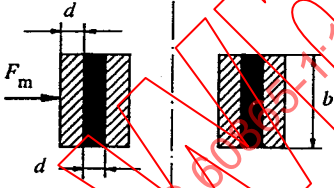
Sections rectangulaires	Z	Sections rectangulaires	Z
	$0,867 d^2 b$		$3,48 d^2 b$
	$1,98 d^2 b$		$1,73 d^2 b$

Tableau 6 - Températures maximales recommandées pour des conducteurs contraints mécaniquement pendant un court-circuit

Type de conducteur	Température maximale recommandée du conducteur pendant un court-circuit
Conducteur nu, massif ou câblé: cuivre, aluminium ou alliage d'aluminium	200 °C
Conducteur nu, massif ou câblé: acier	300 °C

Table 5 - Section moduli Z of main conductors with two or more stiffening elements between two adjacent supports.
The stiffening elements are black.

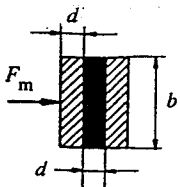
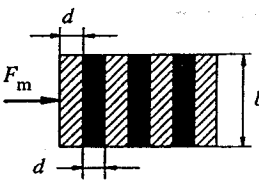
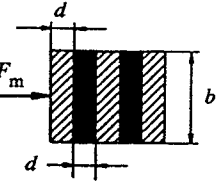
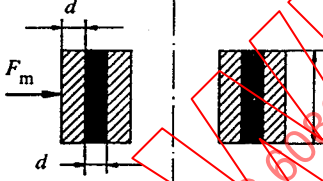
Rectangular sections	Z	Rectangular sections	Z
	$0,867 d^2 b$		$3,48 d^2 b$
	$1,98 d^2 b$		$1,73 d^2 b$

Table 6 - Recommended highest temperatures for mechanically stressed conductors during a short circuit

Type of conductor	Maximum recommended conductor temperature during a short circuit
Bare conductors, solid or stranded: Cu, Al or Al alloy	200 °C
Bare conductors, solid or stranded: steel	300 °C

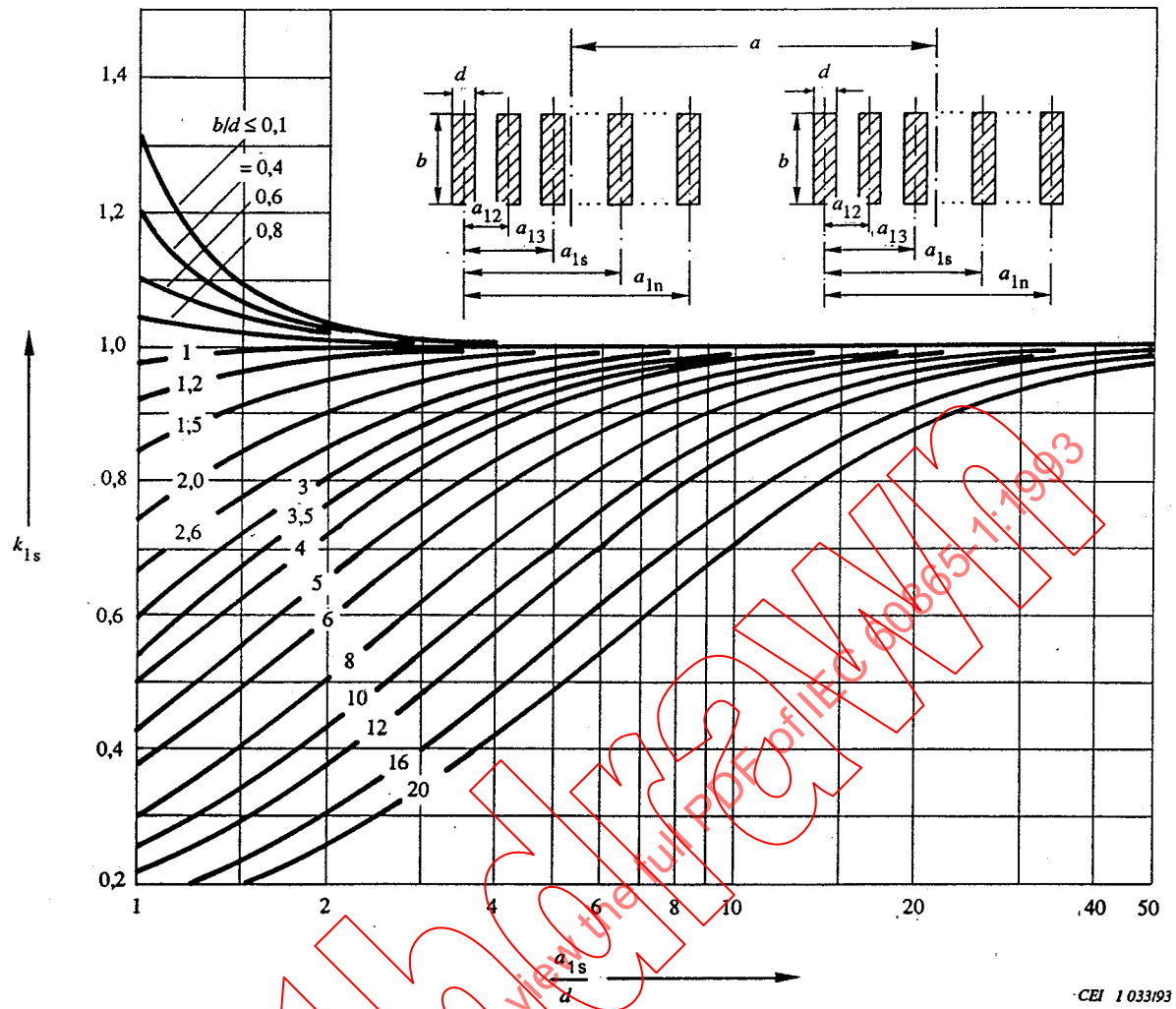


Figure 1 - Facteur k_{1s} pour le calcul de la distance équivalente des conducteurs

L'équation pour la programmation est donnée dans l'annexe A.

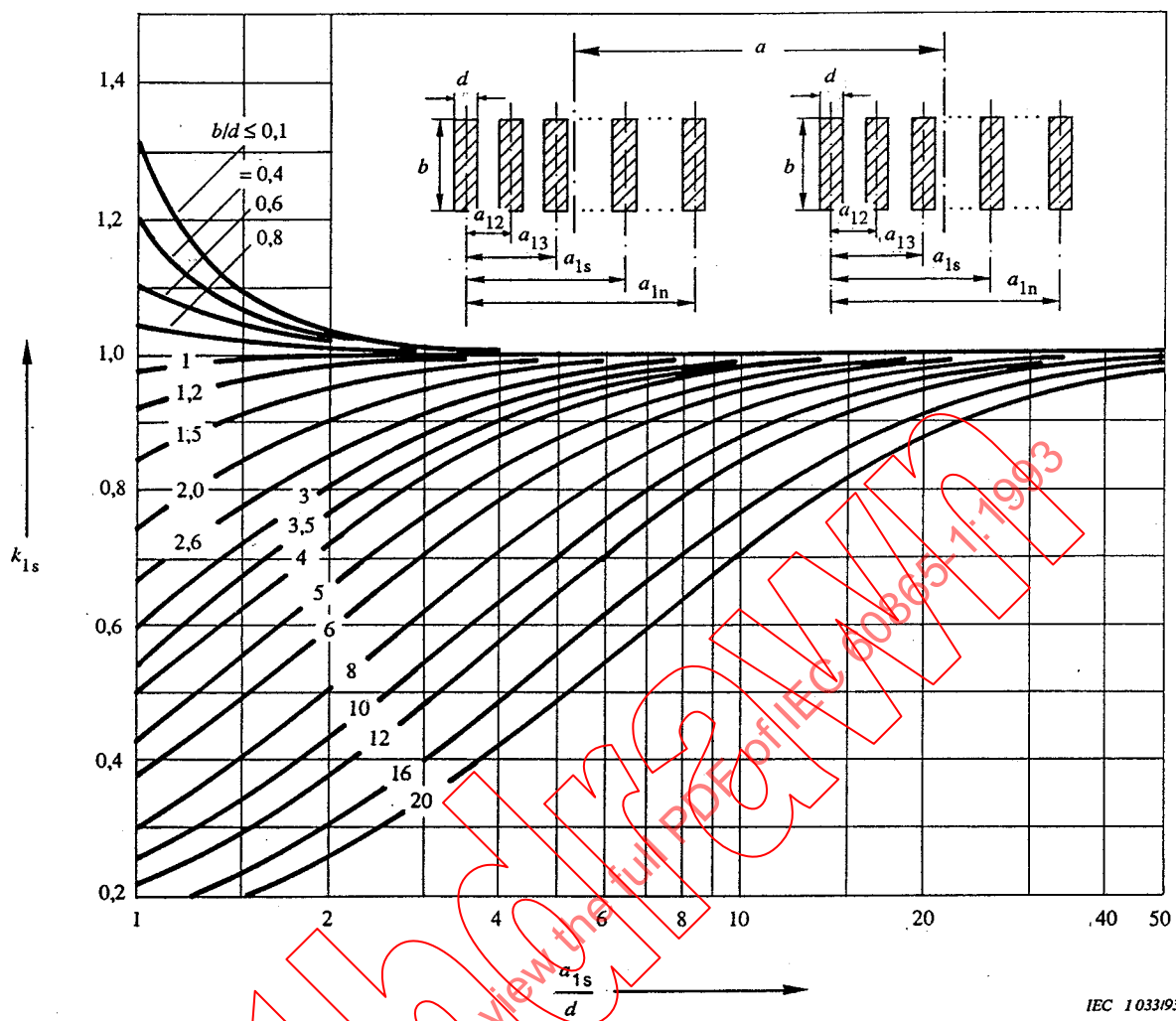
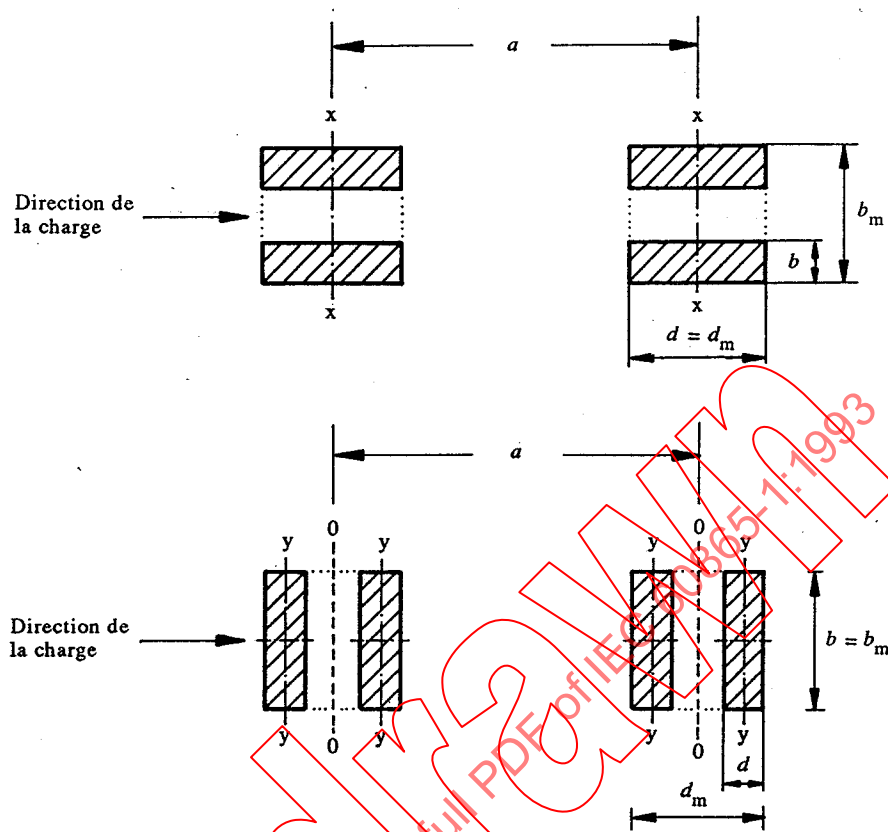


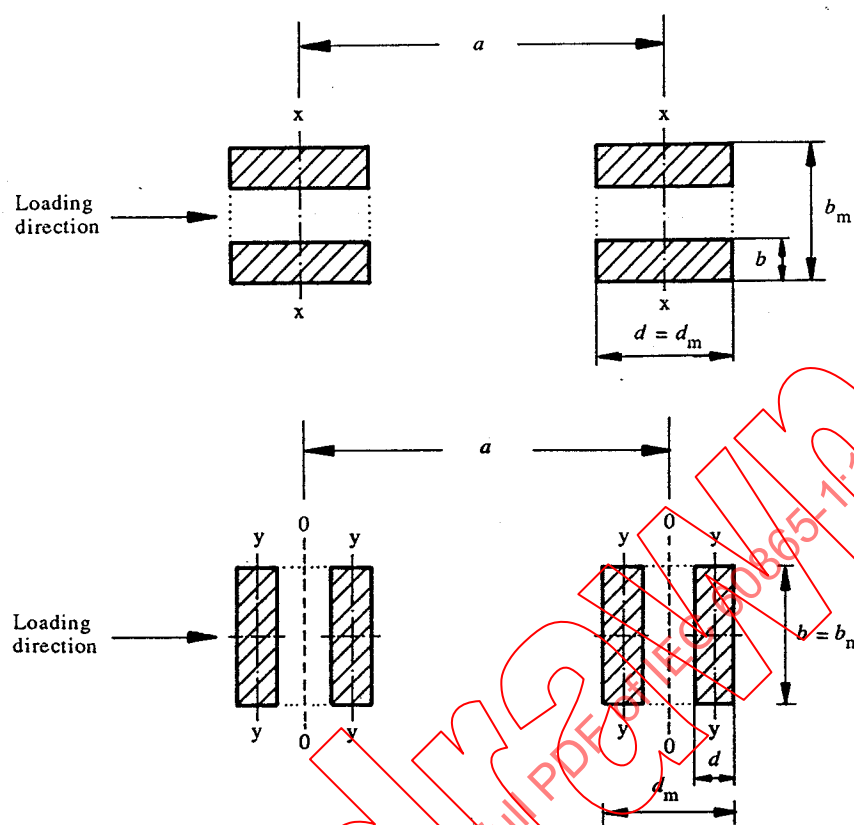
Figure 1 - Factor k_{1s} for calculating the effective conductor distance

For programming, the equation is given in the annex A.



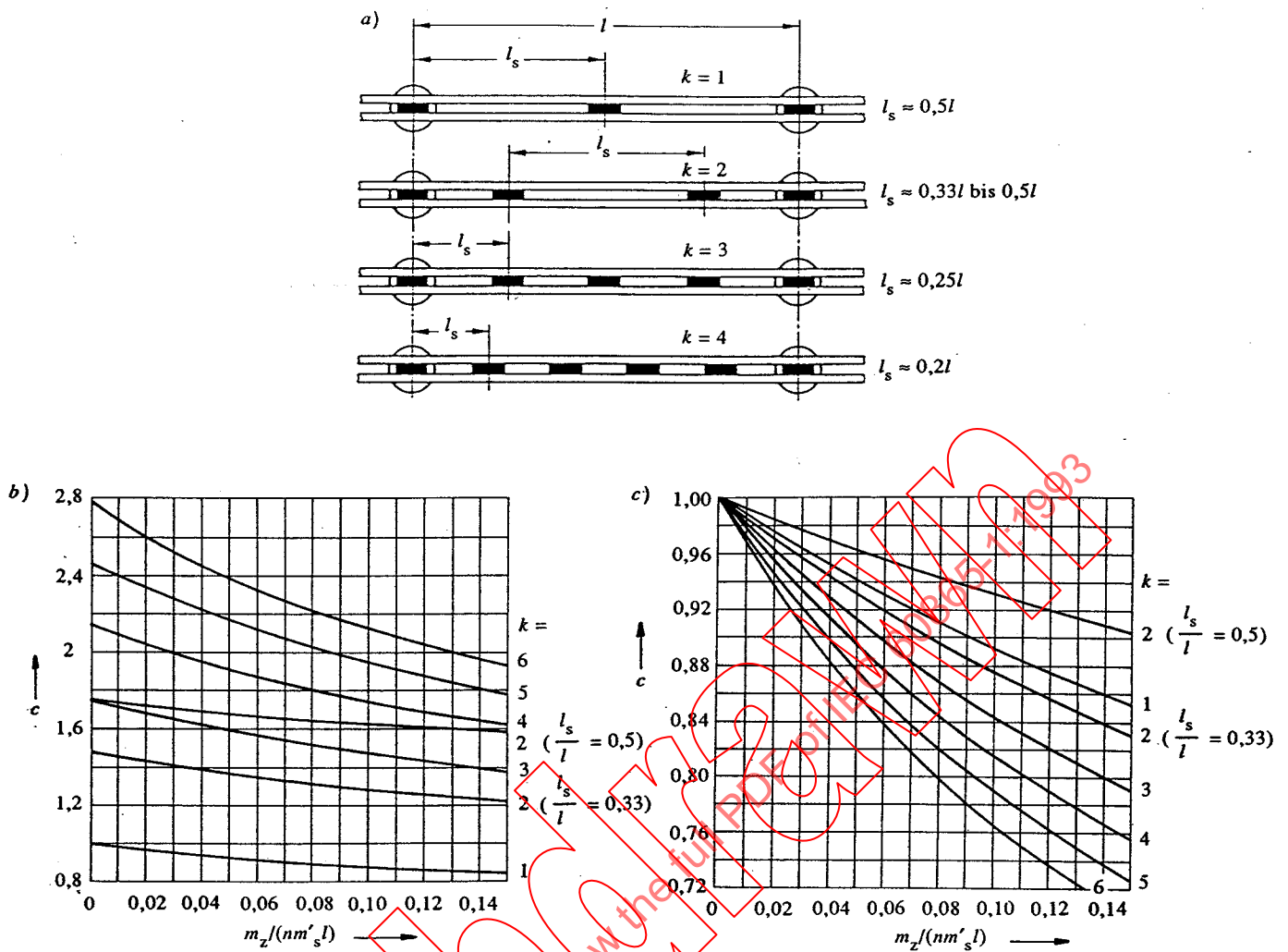
CEI 1034/93

Figure 2 – Direction de la charge et axe de flexion dans le cas de dispositions à conducteurs multiples



IEC 1034/93

Figure 2 – Loading direction and bending axis for multiple conductor arrangements



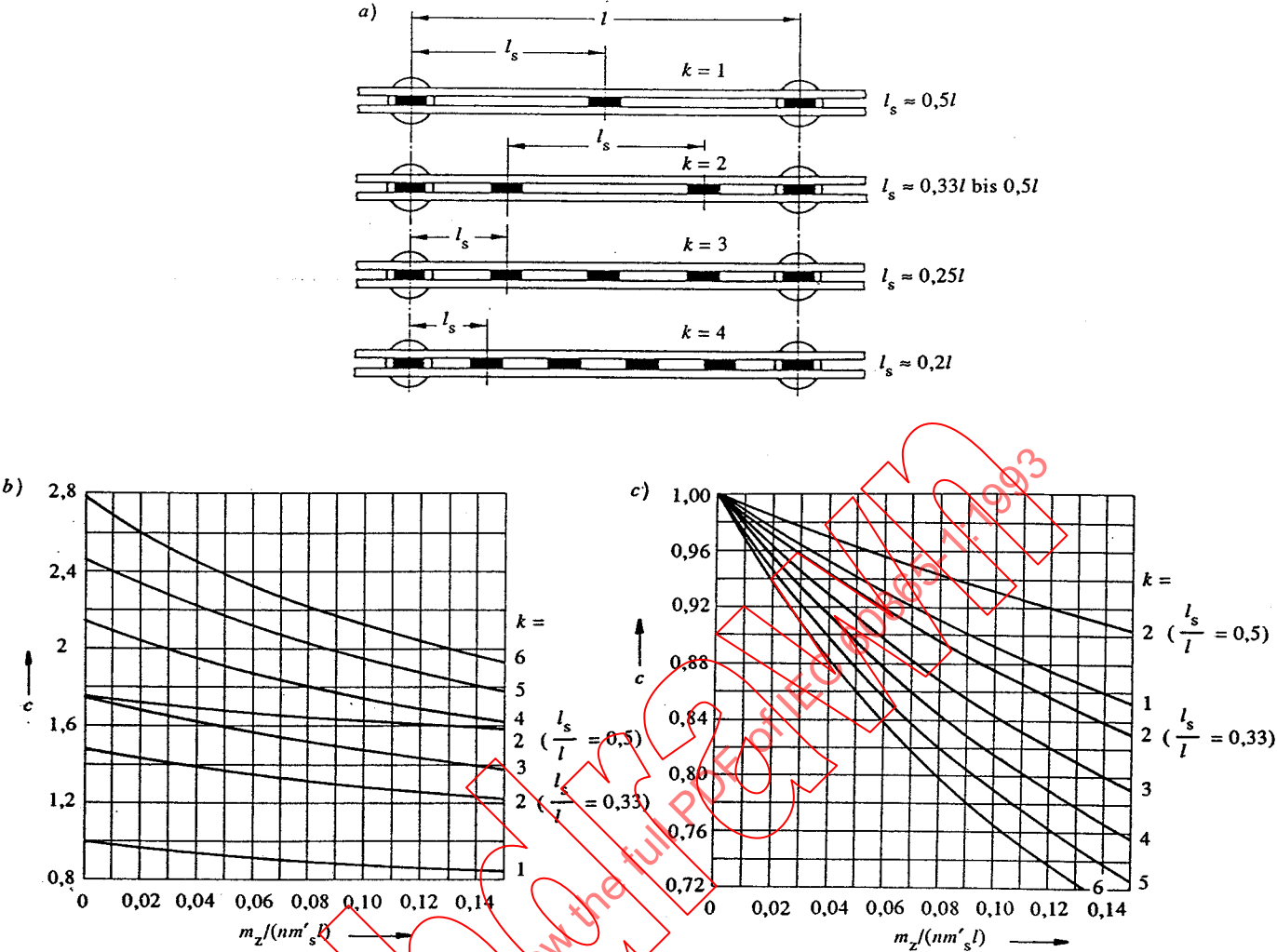
- a) Disposition des pièces de liaison dans la portée.
 b) Pièces de liaison constituées de raidisseurs.
 c) Pièces de liaison constituées d'entretoises ou fonctionnant comme des entretoises.

Figure 3 – Facteur c relatif à l'influence des pièces de liaison dans l'équation (17)

Le facteur c doit être pris sur les figures 3 b) ou 3 c) comme indiqué ci-après:

		Dans une portée, il y a:	
		k raidisseurs	k entretoises
Direction de l'oscillation perpendiculaire à la surface		Facteur c à prendre sur la figure 3 b)	Facteur c à prendre sur la figure 3 c)
Direction de l'oscillation parallèle à la surface		Facteur c à prendre sur la figure 3 c)	Facteur c à prendre sur la figure 3 c)

L'équation pour la programmation est donnée dans l'annexe A.



- a) Arrangement of connecting pieces within the span.
b) Connecting pieces are stiffening elements.
c) Connecting pieces are or operate as spacers.

Figure 3 – Factor c for the influence of connecting pieces in equation (17)

Factor c shall be taken from the figure 3b) or figure 3c) as shown:

	within a span there are	
	k stiffening elements	k spacers
Direction of oscillation perpendicular to the surface	Factor c from figure 3 b)	Factor c from figure 3 c)
Direction of oscillation along the surface	Factor c from figure 3 c)	Factor c from figure 3 c)

For programming, the equation is given in annex A.

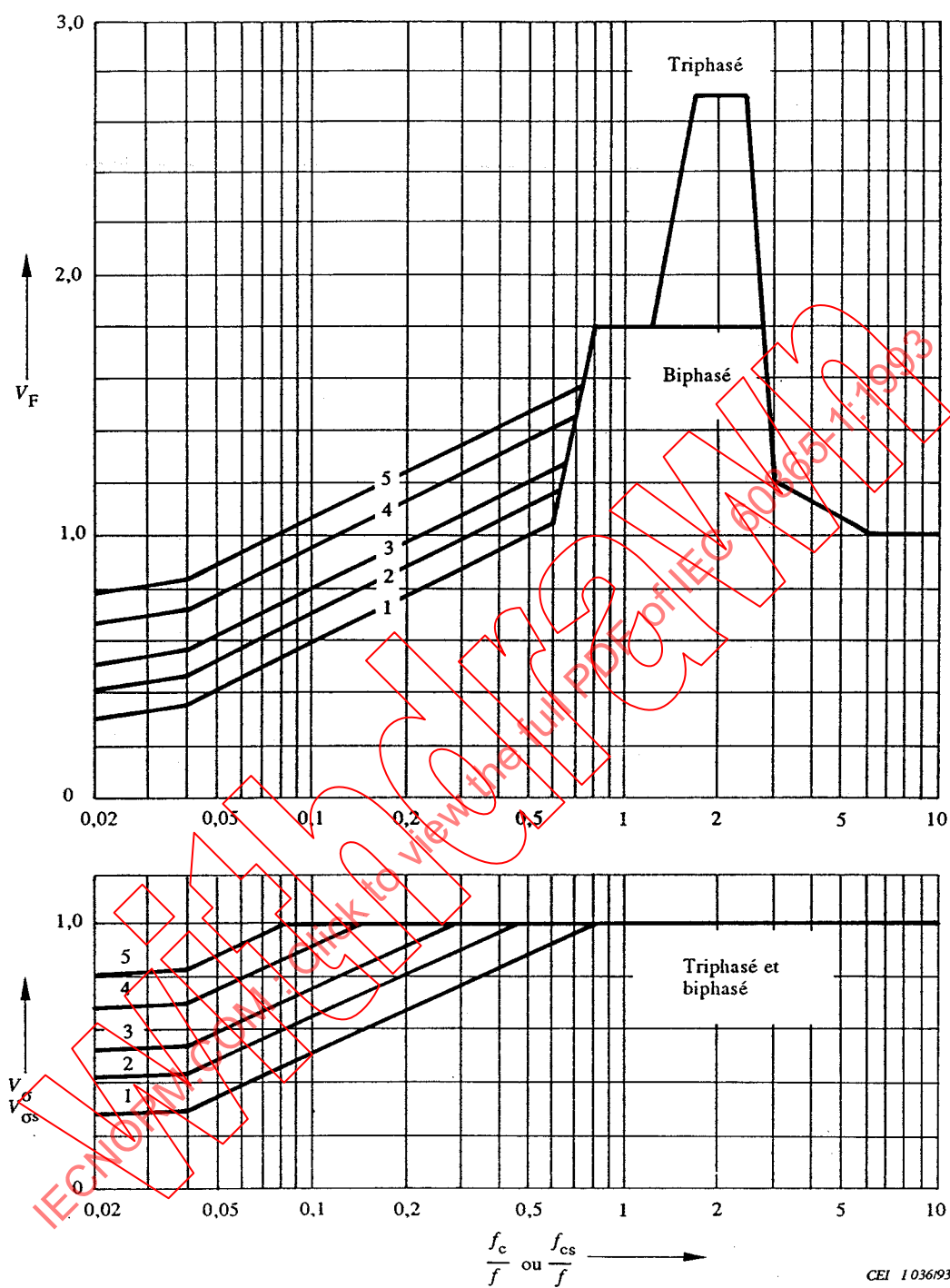


Figure 4 – Facteurs V_F , V_σ et $V_{\sigma s}$ à utiliser dans le cas des courts-circuits triphasés et biphases

Les équations pour la programmation sont données dans l'annexe A.

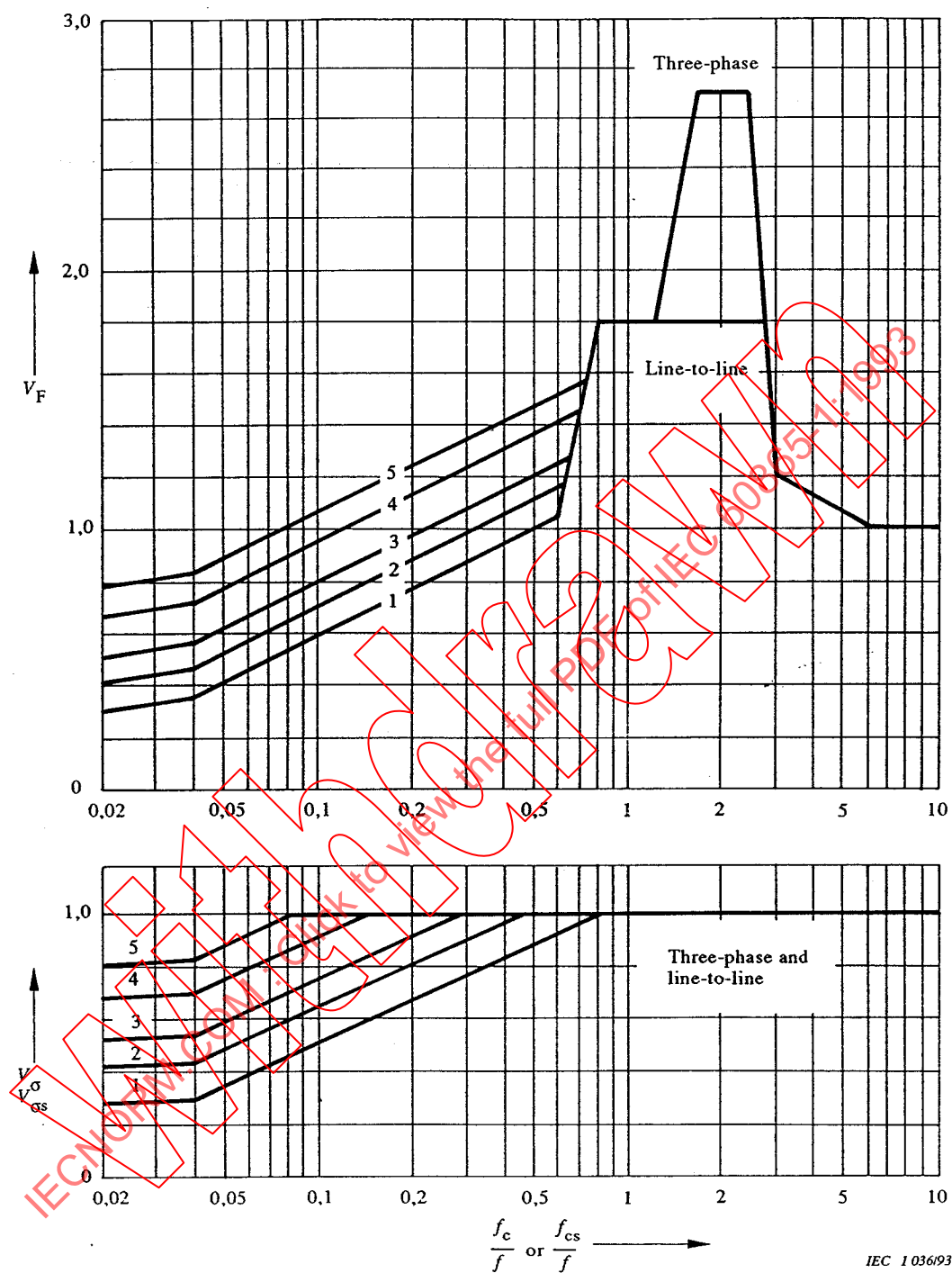


Figure 4 – Factors V_F , V_{σ} and $V_{\sigma s}$ to be used with the three-phase and line-to-line short circuits

For programming, the equations are given in annex A.

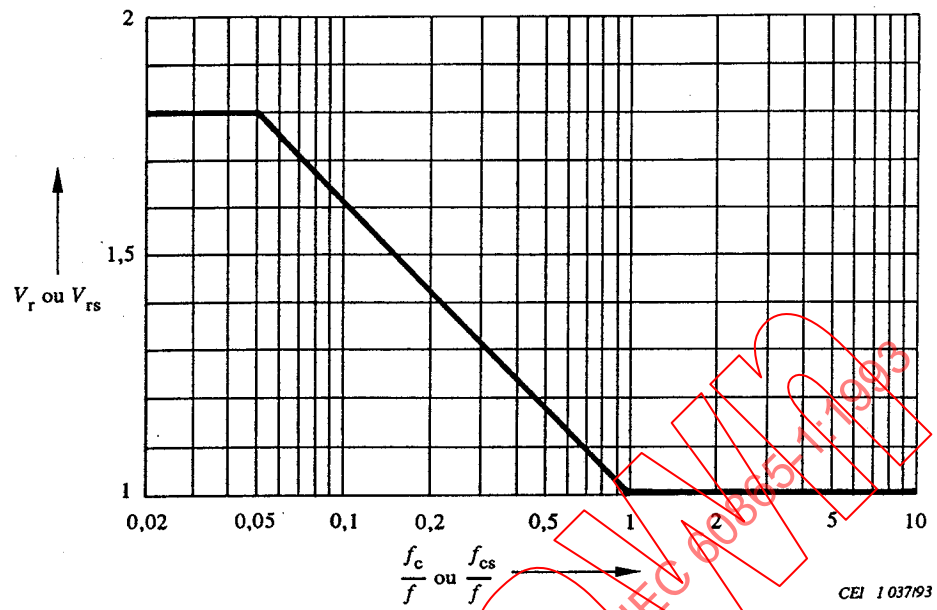


Figure 5 – Facteurs V_r et V_{rs} à utiliser dans le cas de réenclenchement automatique tripolaire

L'équation pour la programmation est donnée dans l'annexe A.

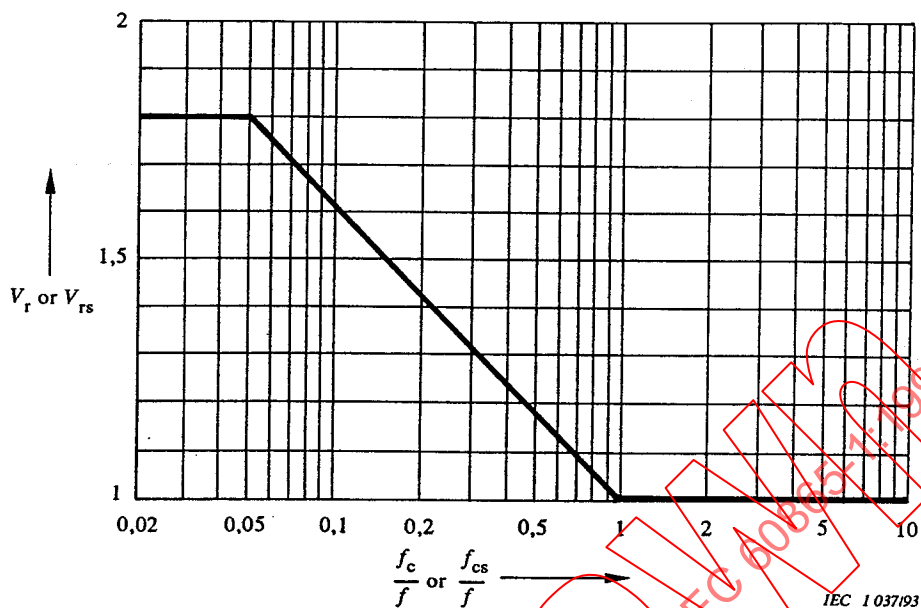


Figure 5 – Factors V_r and V_{rs} to be used with three-phase automatic reclosing

For programming, the equation is given in annex A.

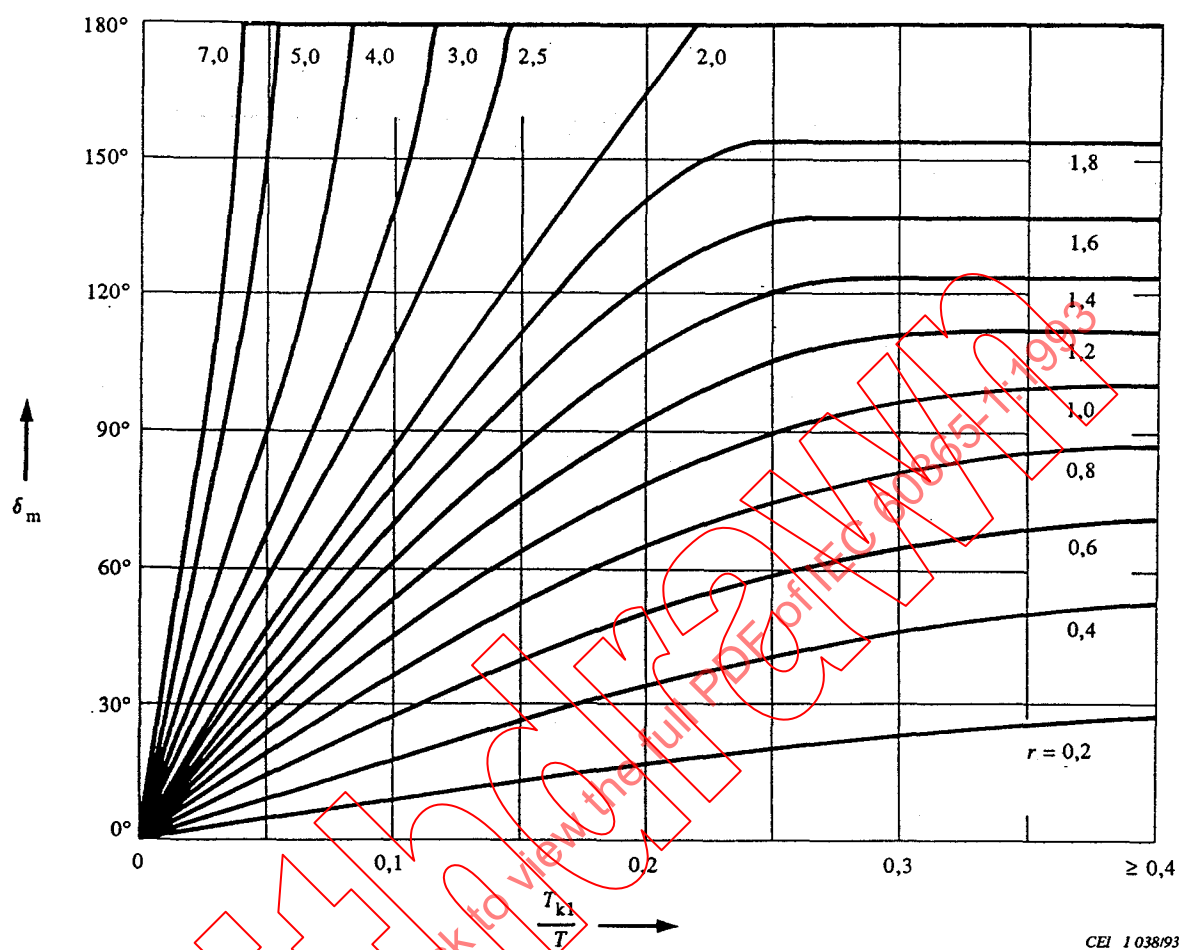
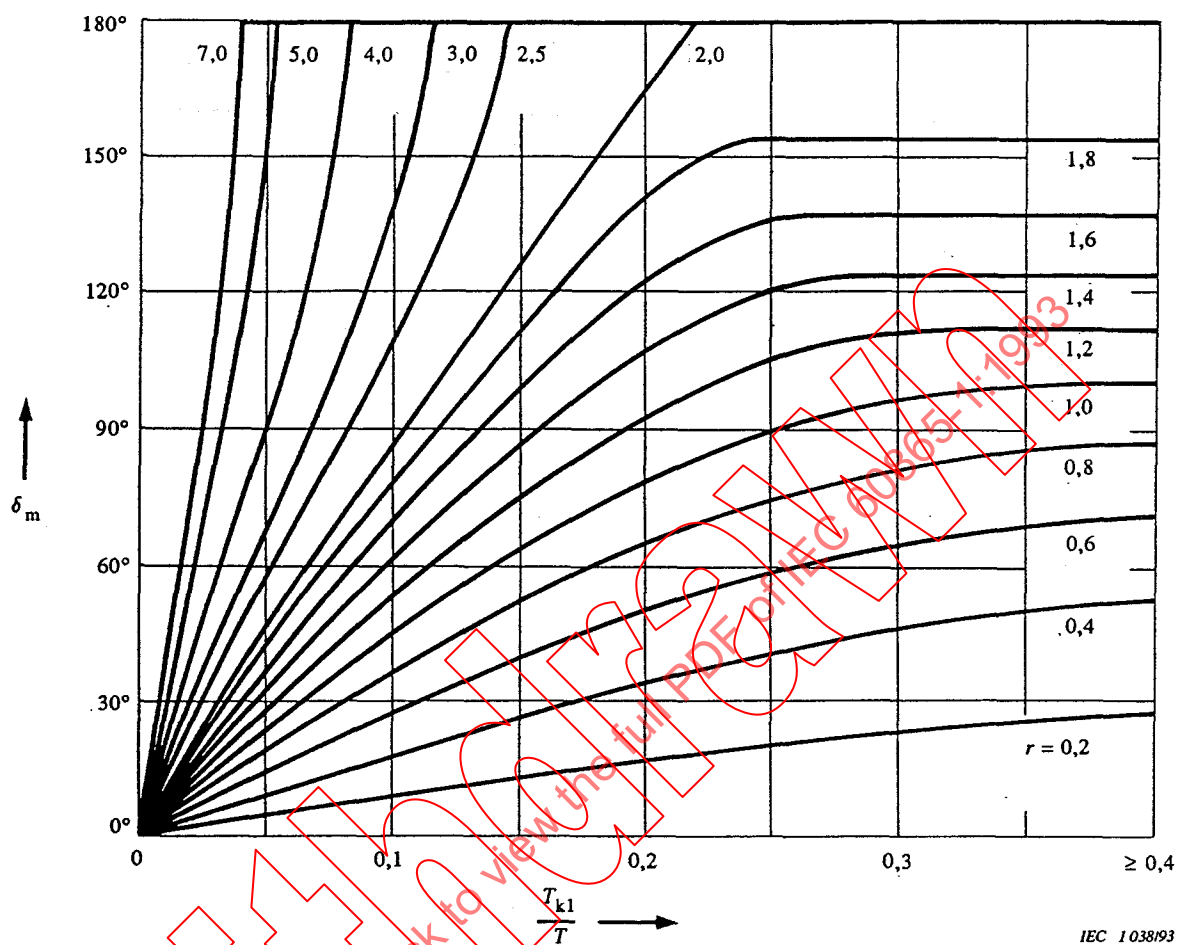


Figure 6 — Angle d'oscillation maximal δ_m relatif à une durée maximale de court-circuit donnée T_{k1}

Pour la programmation se reporter aux équations (31) et (19) à (30).



IEC 1038/93

Figure 6 — Maximum swing out angle δ_m for a given maximum short-circuit duration T_{k1}

For programming, refer to equations (31) and (19) to (30).

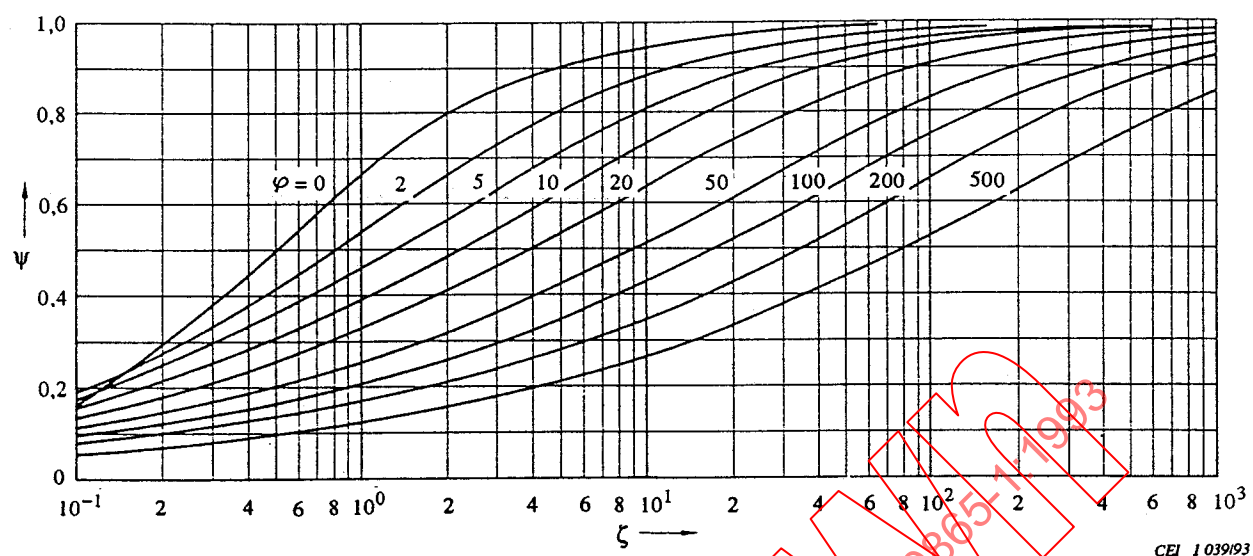


Figure 7 – Facteur ψ relatif à la force de tension dans les conducteurs souples

La relation entre les facteurs ψ , ζ et φ est donnée par l'équation (33).

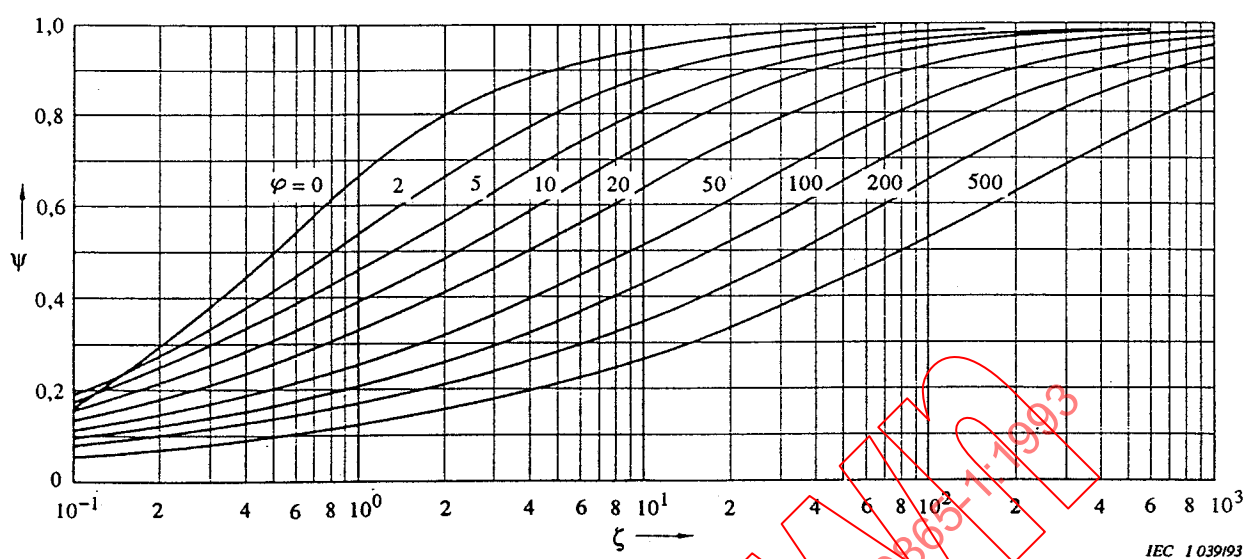


Figure 7 – Factor ψ for tensile force in flexible conductors

The relationship between the factors ψ , ζ and ϕ is given by equation (33).

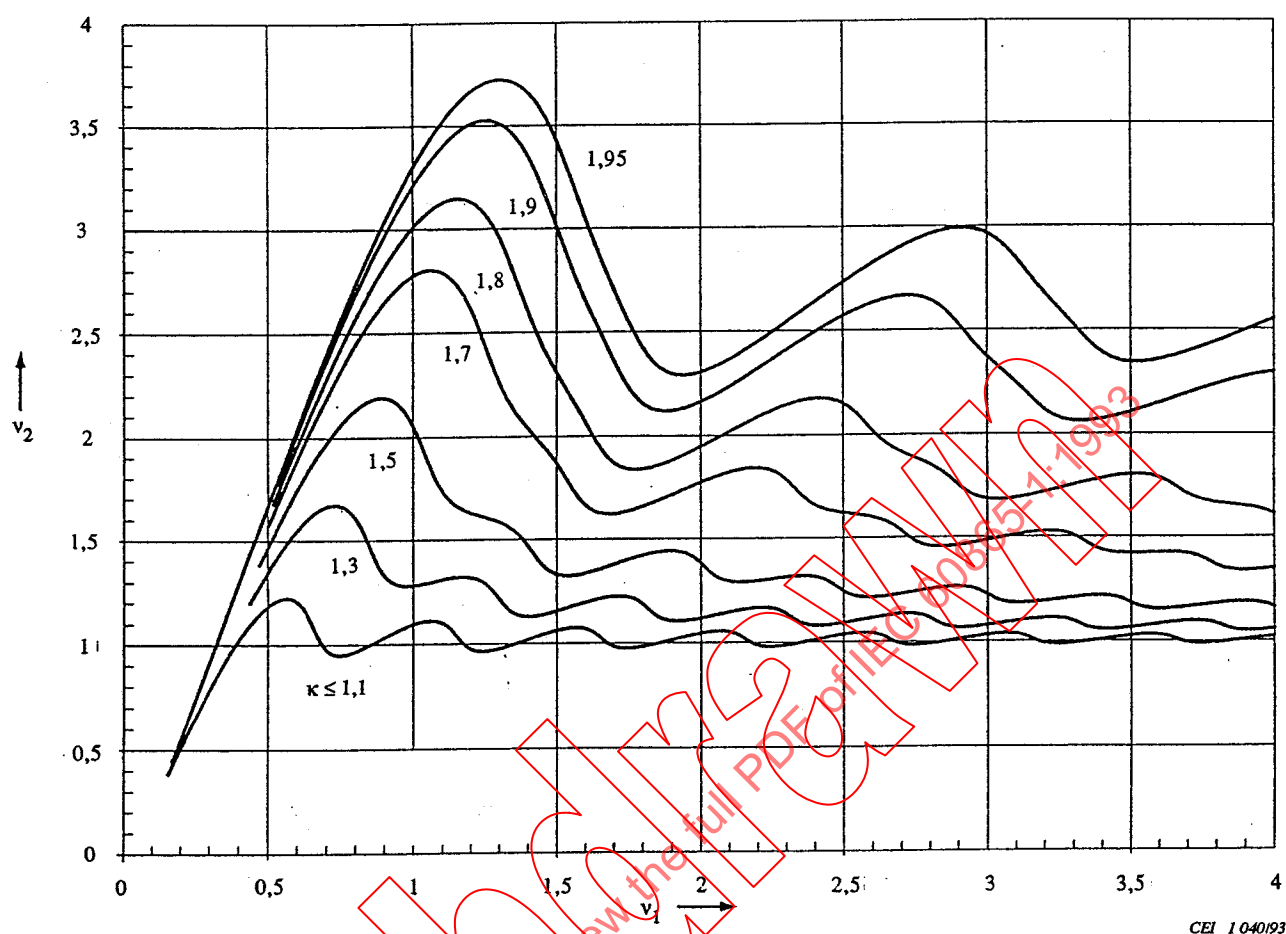


Figure 8 – Relation entre v_1 et v_2

Les équations pour la programmation sont données dans l'annexe A.

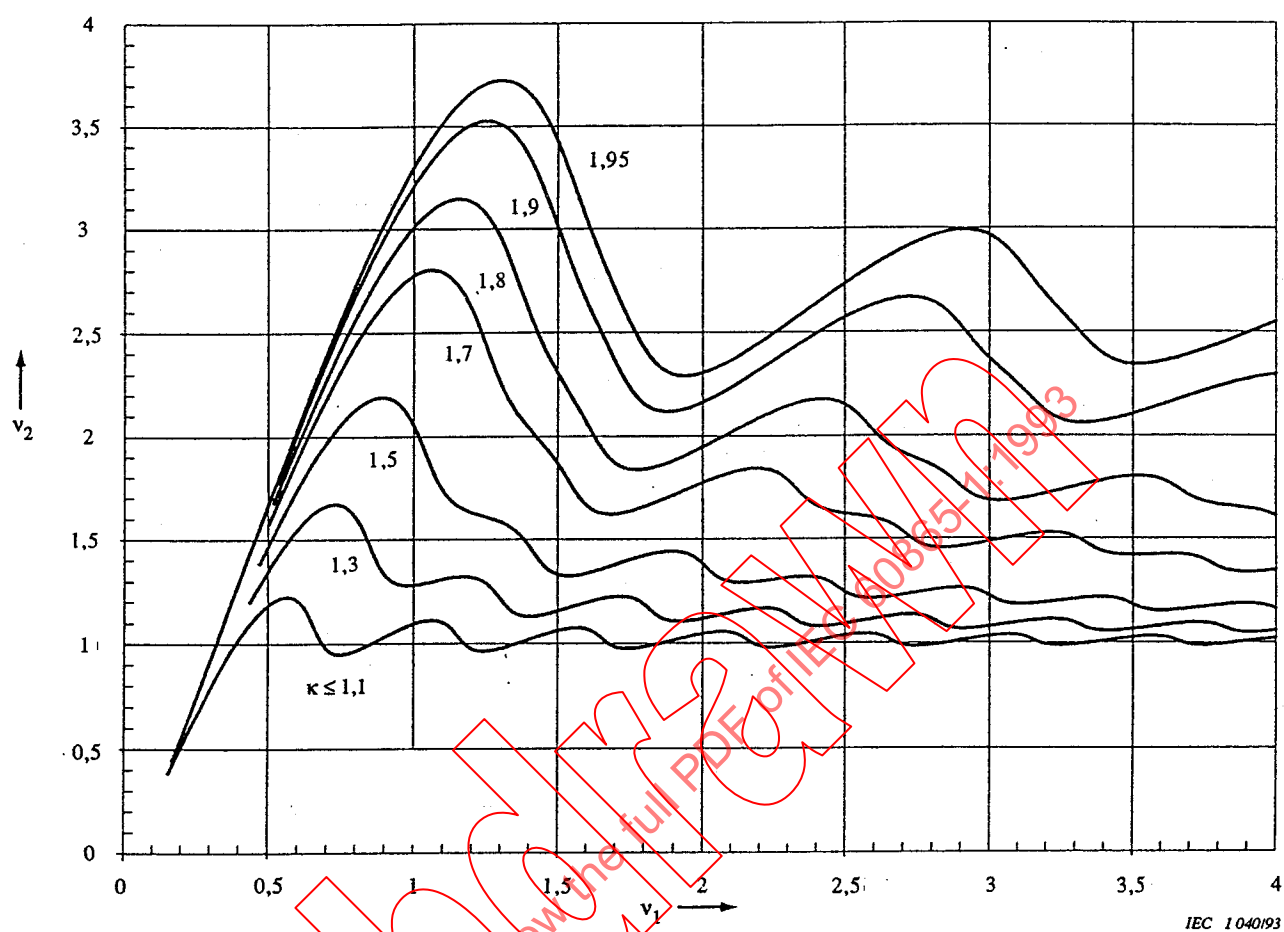
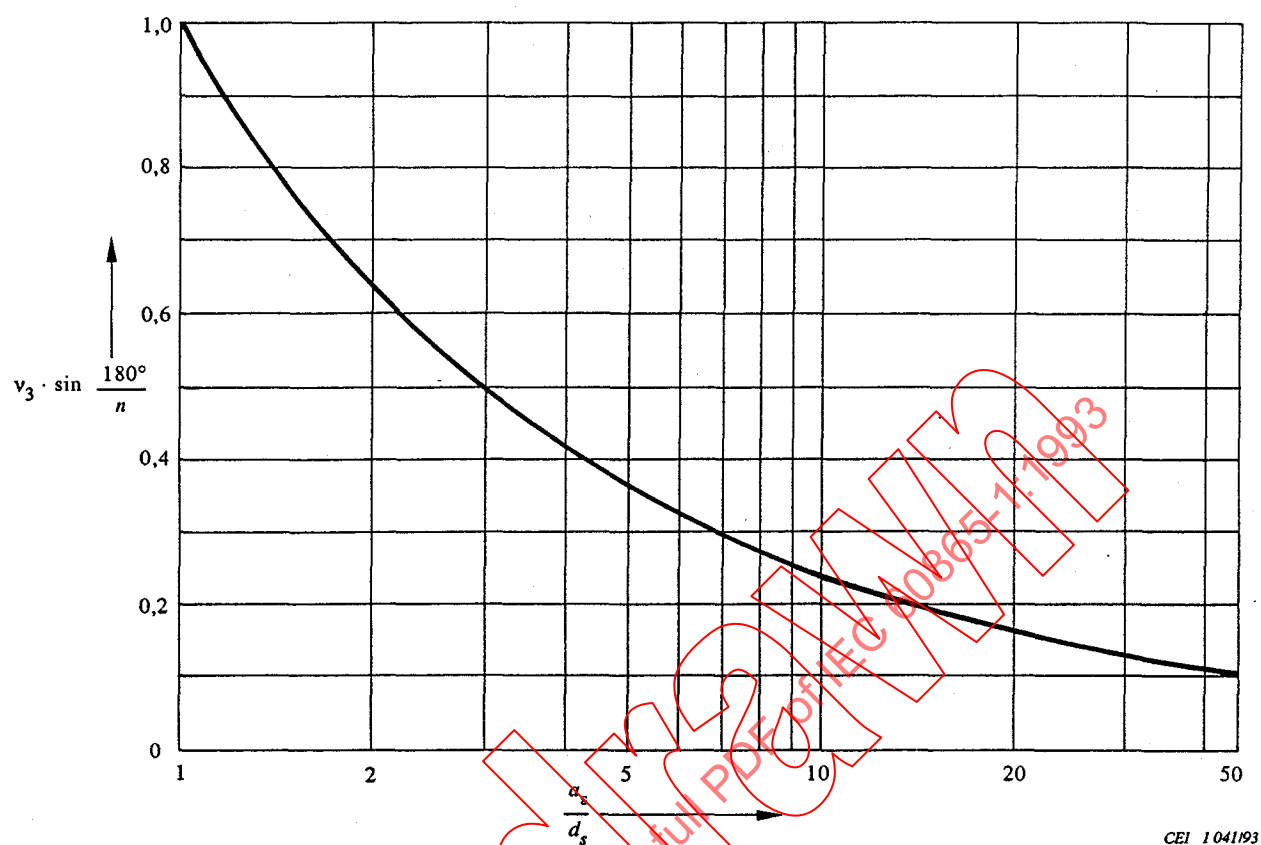


Figure 8 – v_2 as a function of v_1

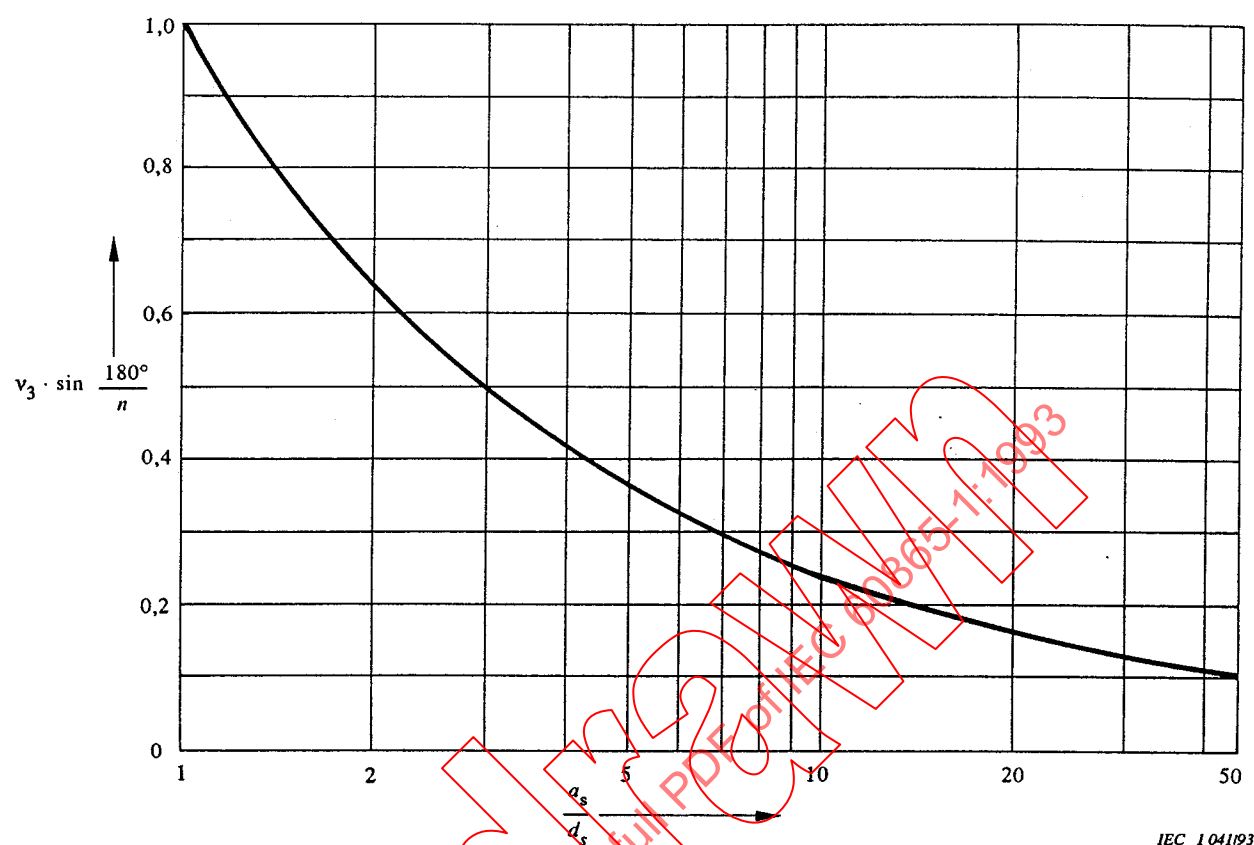
For programming, the equations are given in annex A.



CEI 104193

Figure 9 – Relation entre $v_3 \cdot \sin \frac{180^\circ}{n}$ et a_s/d_s

Les équations pour la programmation sont données dans l'annexe A.



IEC 1041/93

Figure 9 – $v_3 \cdot \sin \frac{180^\circ}{n}$ as a function of a_s/d_s

For programming, the equations are given in annex A.

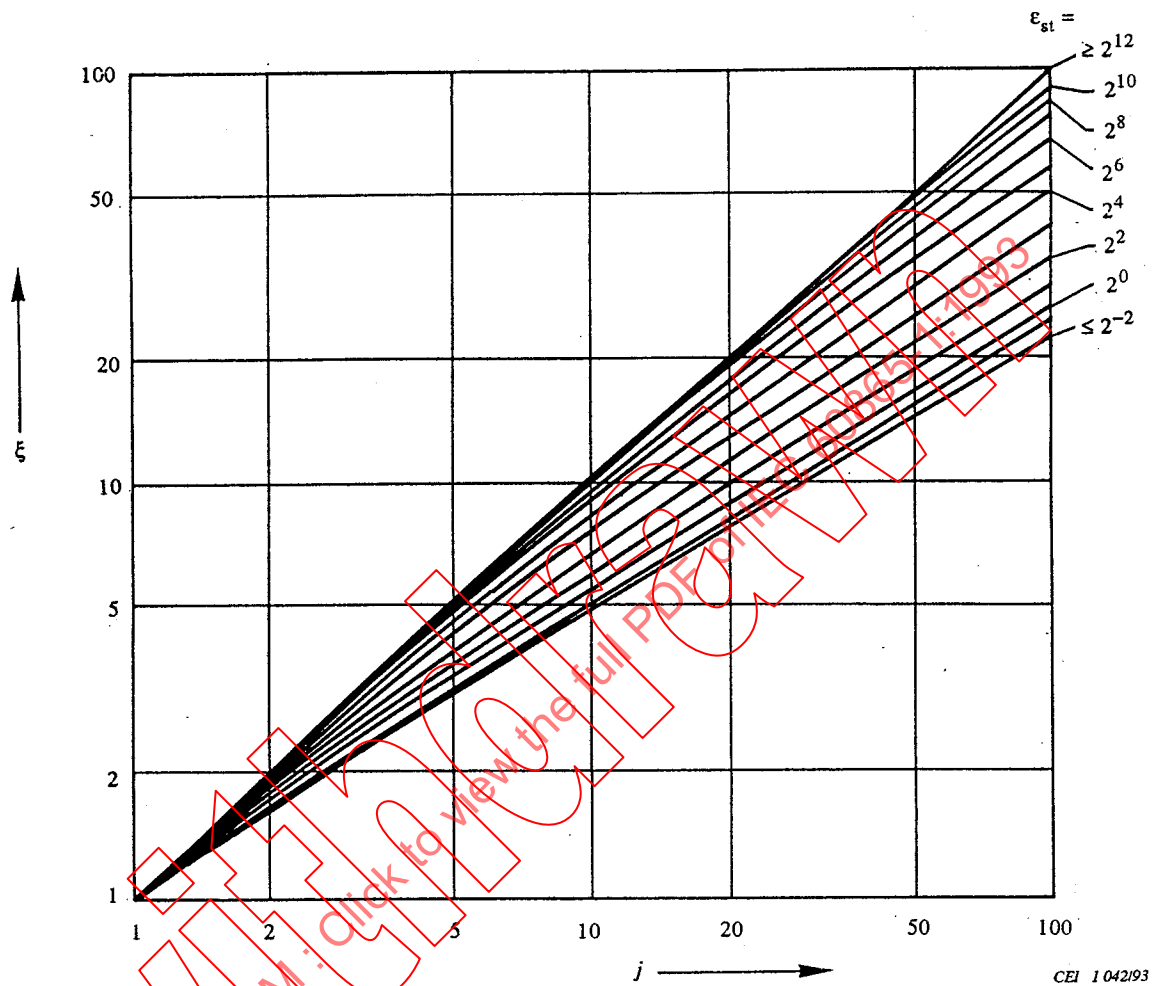


Figure 10 – Relation entre ξ et j ainsi que ϵ_{st}

Pour la programmation se reporter à l'équation (51).

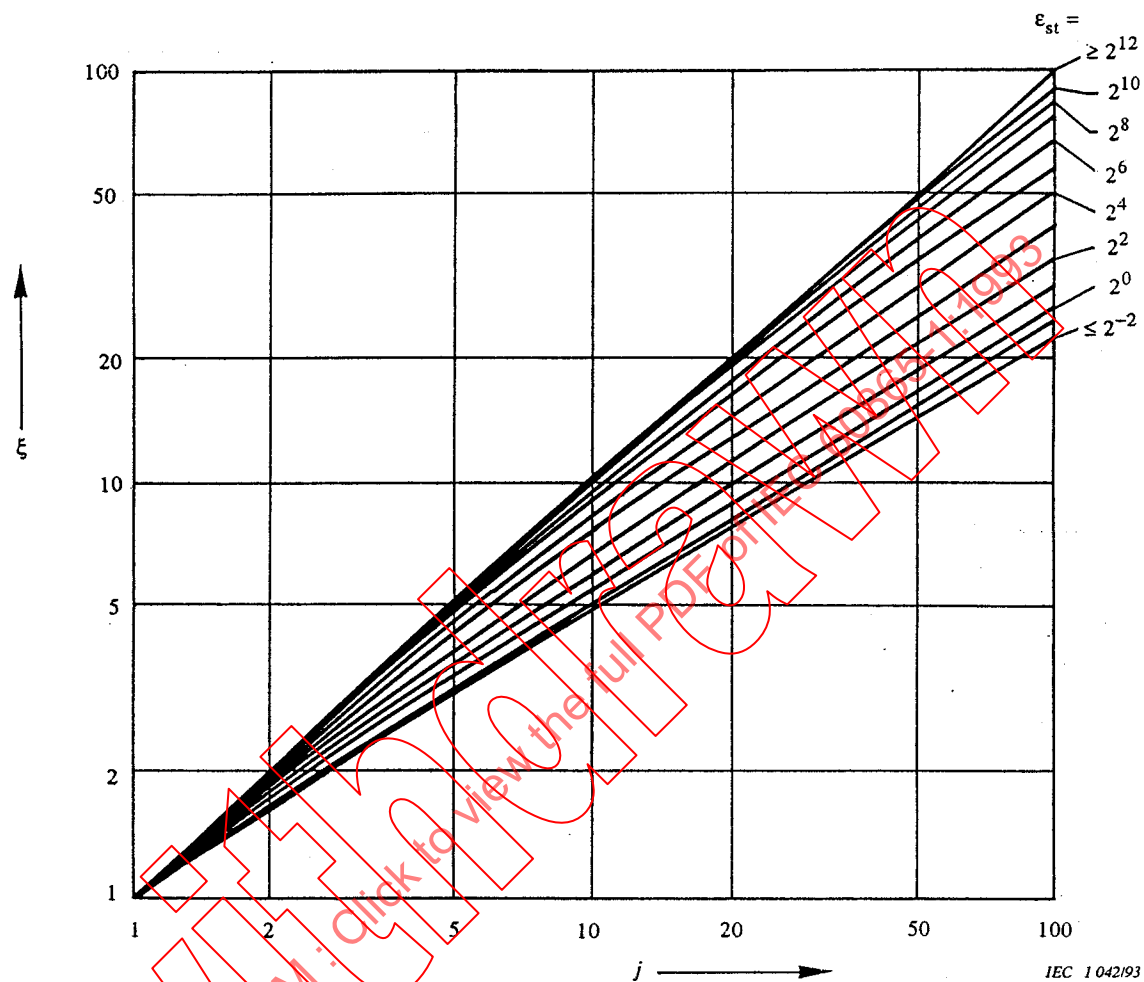
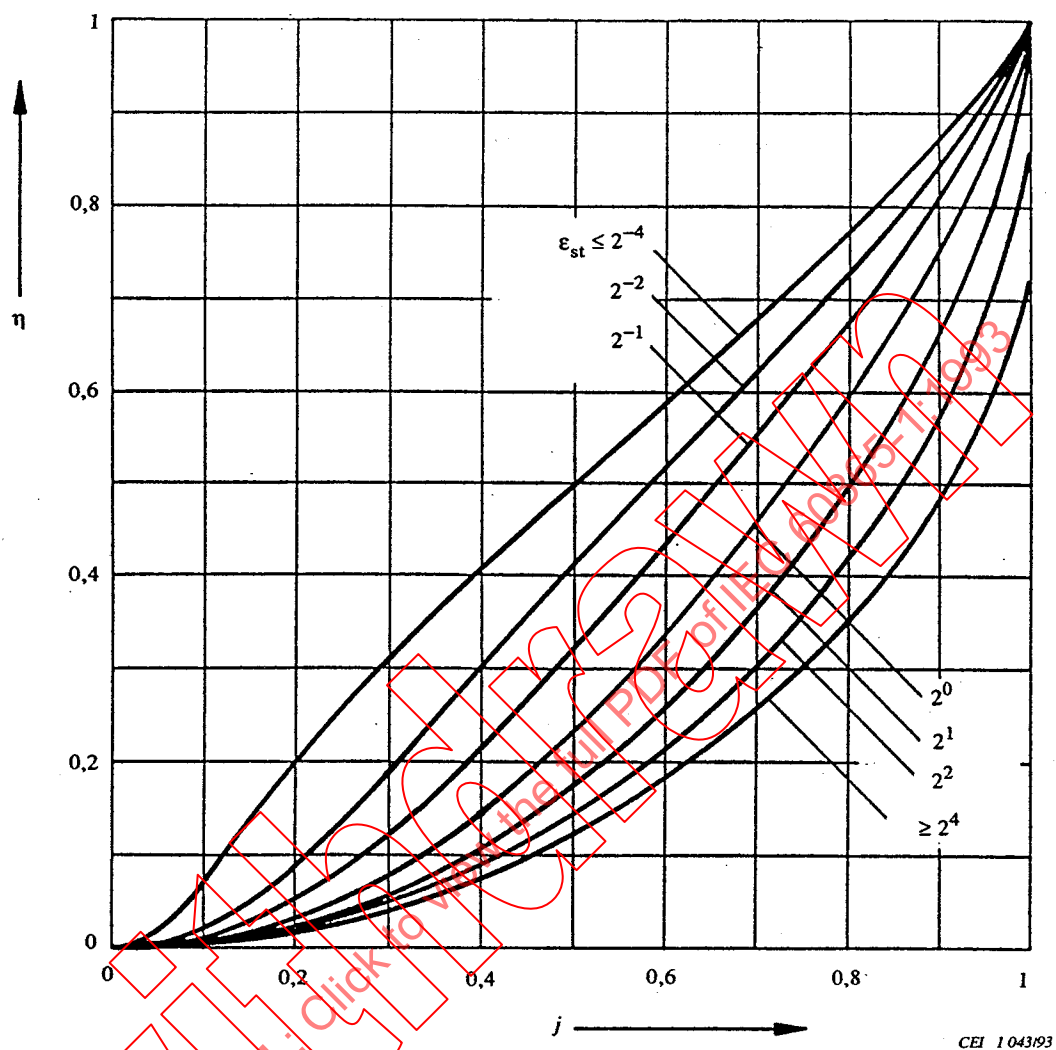


Figure 10 – ξ as a function of j and ϵ_{st}

For programming, refer to equation (51).



Cas où $2,5 < a_s/d_s \leq 5,0$

Figure 11 a) – Relation entre η et j ainsi que ϵ_{st}

Pour la programmation se référer à la note 1 ou à la note 2 de 2.3.3.3.