

norme européenne

norme française

NF EN 60865-1

Avril 1994

Indice de classement : C 10-103

courants de court-circuit - calcul des effets

partie 1 : définitions et méthodes de calcul

E : Short-circuit currents - Calculation of effects
Part 1 : Definitions and calculation methods

D : Kurzschlußströme berechnung der wirkung
Teil 1 : Begriffe und Berechnungsverfahren

Norme française homologuée par décision du Directeur Général de l'afnor le 5 mars 1994 pour prendre effet à compter du 5 avril 1994.

correspondance

Le présent document reproduit le texte de la norme européenne EN 60865 (décembre 1993) qui reprend la publication 865-1:1993 de la CEI.

analyse

Le présent document est applicable aux effets mécaniques et thermiques des courants de court-circuit.

descripteurs

Courants de court-circuit, effets électromagnétiques, effets thermiques

modifications

corrections

AVANT-PROPOS NATIONAL

Le présent document reproduit intégralement le texte de la norme européenne EN 60865-1 qui est la reproduction de la CEI 865-1 (1993) avec une annexe ZA normative.

L'annexe ZA est signalée par un trait vertical dans la marge.

Après consultation de son Comité de Direction et enquête probatoire, l'Union technique de l'Electricité avait voté favorablement au CENELEC sur le projet d' EN 60865-1 le 22 juin 1993.

La présente norme a été adoptée par le Comité de Direction de l'Union technique le 21 juillet 1993.

NORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE NORM
EUROPEAN STANDARD

EN 60865-1

Décembre 1993

CDU : 621.3.014.3:621.3.064.1.001.24

Descripteurs : Courants de court-circuit, effets électromagnétiques, effets thermiques

VERSION FRANÇAISE

Courants de court-circuit - Calcul des effets
Partie 1 : Définitions et méthodes de calcul
(CEI 865-1:1993)

Kurzschlußströme
Berechnung der Wirkung
Teil 1 : Begriffe und
Berechnungsverfahren
(IEC 865-1:1993)

Short-circuit currents
Calculation of effects
Part 1: Definitions and
calculation methods
(IEC 865-1:1993)

La présente norme européenne a été adoptée par le CENELEC le 1993-09-22. Les membres du CENELEC sont tenus de se soumettre au Règlement Intérieur du CEN/CENELEC, qui définit les conditions dans lesquelles doit être attribué, sans modification, le statut de norme nationale à la norme européenne.

Les listes mises à jour et les références bibliographiques relatives à ces normes nationales peuvent être obtenues auprès du Secrétariat Central ou auprès des membres du CENELEC.

La présente norme européenne existe en trois versions officielles (allemand, anglais, français). Une version dans une autre langue faite par traduction sous la responsabilité d'un membre du CENELEC dans sa langue nationale, et notifiée au Secrétariat Central, a le même statut que les versions officielles.

Les membres du CENELEC sont les comités électrotechniques nationaux des pays suivants : Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Irlande, Islande, Italie, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Portugal, Royaume-Uni, Suède et Suisse.

CENELEC

Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization

Secrétariat Central : rue de Stassart 35, B-1050 Bruxelles

AVANT-PROPOS

Le texte du document 73(BC)16, comme établi par le comité d'études n° 73 de la CEI: Courants de court-circuit, a été soumis au vote parallèle CEI-CENELEC en octobre 1992.

Le document de référence a été approuvé par le CENELEC comme EN 60865-1 le 22 septembre 1993.

Les dates suivantes ont été fixées :

- date limite de publication d'une norme nationale identique (dop) 1994-09-01
- date limite de retrait des normes nationales conflictuelles (dow) 1994-09-01

Les annexes appelées "normatives" font partie du corps de la norme. Les annexes appelées "informatives" ne sont données que pour information.

Dans la présente norme, les annexes A et ZA sont normatives et l'annexe B est informative.

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	2

Section 1: Généralités

Articles

1.1	Domaine d'application et objet.....	5
1.2	Références normatives	5
1.3	Equations, symboles et unités	6
1.3.1	Symboles relatifs à la section 2 - Effets électromagnétiques.....	6
1.3.2	Symboles relatifs à la section 3 - Effets thermiques.....	9
1.4	Définitions	10
1.4.1	Définitions relatives à la section 2 - Effets électromagnétiques.....	10
1.4.1.1	Conducteur principal	10
1.4.1.2	Sous-conducteur	10
1.4.1.3	Support encastré.....	10
1.4.1.4	support simple.....	10
1.4.1.5	Pièce de liaison	10
1.4.1.6	Force de tension d'un court-circuit, F_t	10
1.4.1.7	Force de chute, F_f	10
1.4.1.8	Force de pincement, F_{pi}	11
1.4.1.9	Durée du premier passage du courant de court-circuit, T_{kl}	11
1.4.2	Définitions relatives à la section 3 - Effets thermiques.....	11
1.4.2.1	Courant thermique équivalent de courte durée, I_{th}	11
1.4.2.2	Courant de tenue de courte durée assigné, I_{thr}	11
1.4.2.3	Densité du courant thermique équivalent de courte durée, S_{th}	11
1.4.2.4	Densité du courant de tenue de courte durée assigné, S_{thr} , pour les conducteurs	11
1.4.2.5	Durée du courant de court-circuit, T_k	11
1.4.2.6	Courte durée assignée, T_{kr}	11

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

2.1	Généralités	12
2.1.1	Influences sur la réduction des contraintes	12
2.1.2	Prise en compte du réenclenchement automatique.....	12
2.2	Installations comportant des conducteurs rigides	13
2.2.1	Calcul des forces électromagnétiques	13
2.2.1.1	Calcul de la valeur de crête de la force entre les conducteurs principaux pendant un court-circuit triphasé	13
2.2.1.2	Calcul de la valeur de crête de la force entre les conducteurs principaux pendant un court-circuit biphasé.....	13
2.2.1.3	Calcul de la valeur de crête des forces entre sous-conducteurs coplanaires.....	13
2.2.1.4	Distance équivalente entre conducteurs principaux et entre sous-conducteurs.....	14

Articles	Pages
2.2.2 Calcul des contraintes dans les conducteurs rigides et des forces sur les supports.....	14
2.2.2.1 Généralités.....	14
2.2.2.2 Calcul des contraintes dans les conducteurs rigides.....	15
2.2.2.3 Module de section et facteur q des conducteurs principaux composés de sous-conducteurs.....	16
2.2.2.4 Contrainte admissible dans un conducteur.....	16
2.2.2.5 Calcul des forces exercées sur les supports de conducteurs rigides.....	17
2.2.2.6 Calcul tenant compte de l'oscillation des conducteurs.....	17
2.3 Installations comportant des conducteurs souples.....	19
2.3.1 Généralités.....	19
2.3.2 Effets sur le conducteur principal.....	19
2.3.2.1 Dimensions et paramètres caractéristiques.....	20
2.3.2.2 Force de tension F_t provoquée par une oscillation pendant un court-circuit (force de tension d'un court-circuit).....	22
2.3.2.3 Force de tension F_f provoquée par une chute après un court-circuit (force de chute).....	22
2.3.2.4 Déplacement horizontal de la portée b_h et distance minimale dans l'air a_{\min}	23
2.3.3 Force de tension F_{pi} provoquée par l'effet de pincement.....	24
2.3.3.1 Dimensions et paramètres caractéristiques.....	24
2.3.3.2 Force de tension F_{pi} dans le cas de sous-conducteurs s'entrechoquant.....	25
2.3.3.3 Force de tension F_{pi} dans le cas de sous-conducteurs ne s'entrechoquant pas.....	26
2.4 Charges de structure résultant des effets électromagnétiques.....	27
2.4.1 Charge de conception pour les supports isolants, leurs supports et leurs connecteurs.....	27
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.....	28
2.4.3 Charges de conception pour les fondations.....	28
Section 3: Effets thermiques sur les conducteurs nus et sur le matériel électrique	
3.1 Généralités.....	29
3.2 Calcul de l'échauffement.....	29
3.2.1 Généralités.....	29
3.2.2 Calcul du courant thermique équivalent de courte durée.....	29
3.2.3 Calcul de l'échauffement et de la densité du courant de tenue de courte durée assigné des conducteurs.....	30
3.2.4 Détermination de la résistance thermique au court-circuit pour différentes durées du courant de court-circuit.....	31
3.2.4.1 Matériel électrique.....	31
3.2.4.2 Conducteurs.....	31
TABLEAUX.....	32
FIGURES.....	37
ANNEXES	
A Equations pour la détermination des diagrammes.....	53
B Procédures 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).....	58
ZA Autres publications internationales citées dans la présente norme avec les références des publications européennes correspondantes.....	59

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.

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

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_{ln}	Facteur relatif à la distance équivalente entre le sous-conducteur 1 et le sous-conducteur n	1
k_{ls}	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

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	Entraxe 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_l	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

$\varepsilon_{st}, \varepsilon_{pi}$	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

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.

1.4.1.8 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.

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.

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

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

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

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

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.

2.2.1.4 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 encastés, 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_c/f est inférieur à 0,5 la réponse du système décroît, et les contraintes maximales se situent dans les phases extérieures.

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 $V_\sigma V_r$ 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.

2.2.2.3 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

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

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).

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.

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 , $V_{\sigma s}$, V_r et V_{rs}

Les facteurs V_F , V_σ , $V_{\sigma s}$, 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.

2.3 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 °C et aussi sur la base de la force de tension statique F_{st} existant à la température de fonctionnement maximale, par exemple 60 °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.

2.3.2.1 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 $(I''_{k2})^2$.

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

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

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

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

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:

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

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:

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

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

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

avec $0 \leq \psi \leq 1$

La force de tension F_t est donnée par :

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

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:

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

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

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

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 $Al/Ac \leq 6$;

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

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

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

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:

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

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:

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

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):

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

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

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} .

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

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

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

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

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

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

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

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

avec

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

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.

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.

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.

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.

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).

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

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

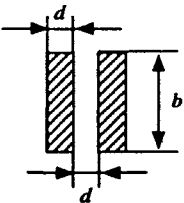
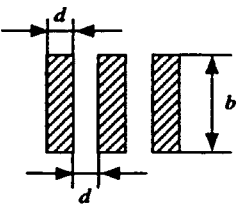
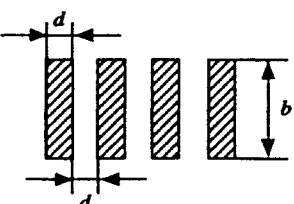
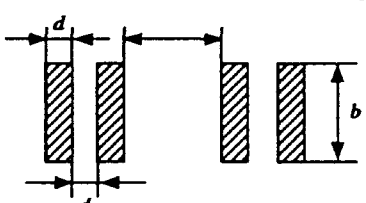
Sections rectangulaires	$\frac{b}{d}$	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20
	0,005	0,020	0,024	0,027	0,033	0,040	—	—	—
	0,010	0,028	0,031	0,034	0,041	0,047	0,054	0,067	0,080
	0,005	—	0,013	0,015	0,018	0,022	—	—	—
	0,010	0,017	0,019	0,020	0,023	0,027	0,030	0,037	0,043
	0,005	—	—	—	—	—	—	—	—
	0,010	0,014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

Tableau 2 - Valeurs maximales possibles de $V_{\sigma}V_r$, $V_{\sigma s}V_{rs}$, V_FV_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_FV_r
Biphasé	1,0	1,8	<div> $2,0$ si $\frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 0,5$ </div> <div> $\frac{0,8 R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ si $0,5 < \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 1,0$ </div> <div> $1,0$ si $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}}$ </div> <div> <div>gamme</div> <div>①</div> <div>②</div> <div>③</div> </div> <div> </div>
Triphasé	1,0	1,8	<div> $2,7$ si $\frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 0,370$ </div> <div> $\frac{0,8 R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ si $0,370 < \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 1,0$ </div> <div> $1,0$ si $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 R_{p0,2}}$ </div> <div> <div>gamme</div> <div>①</div> <div>②</div> <div>③</div> </div> <div> </div>

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

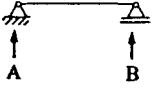
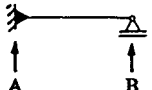
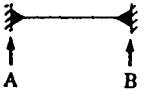
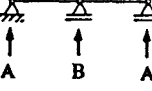
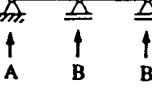
Type de poutre et de support		Facteur α	Facteur β^*	Facteur γ
Poutre à une seule portée	A et B: supports simples 	A: 0,5 B: 0,5	1,0	1,57
	A: support encastré B: support simple 	A: 0,625 B: 0,375	0,73	2,45
	A et B: supports encastrés 	A: 0,5 B: 0,5	0,5	3,56
Poutre continue avec supports simples équidistants	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				

Tableau 4 - Facteur q


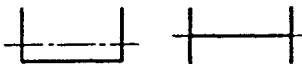


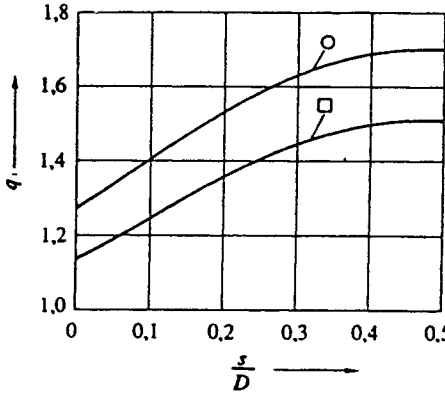
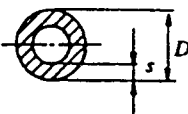
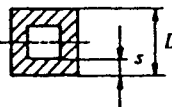
Section	Section
 $q = 1,5$	 $q = 1,83$
	 $q = 1,19$
 $q = 1,7$	
 $q = 1,7 \frac{1 - (1 - 2s/D)^3}{1 - (1 - 2s/D)^4}$	
 $q = 1,5 \frac{1 - (1 - 2s/D)^3}{1 - (1 - 2s/D)^4}$	
q correspond à l'axe de flexion en pointillé. Les forces sont perpendiculaires à cet axe.	

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

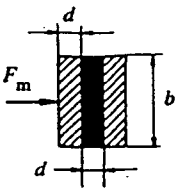
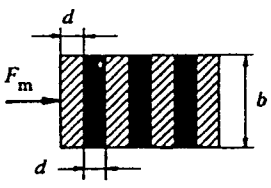
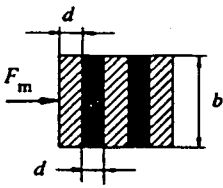
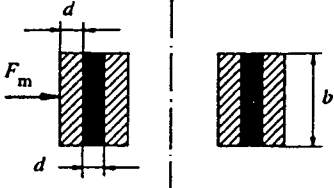
Sections rectangulaires	Z	Sections rectangulaires	Z
	$0,867 d^2 b$		$3,48 d^2 b$
	$1,98 d^2 b$		$1,73 d^2 b$

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

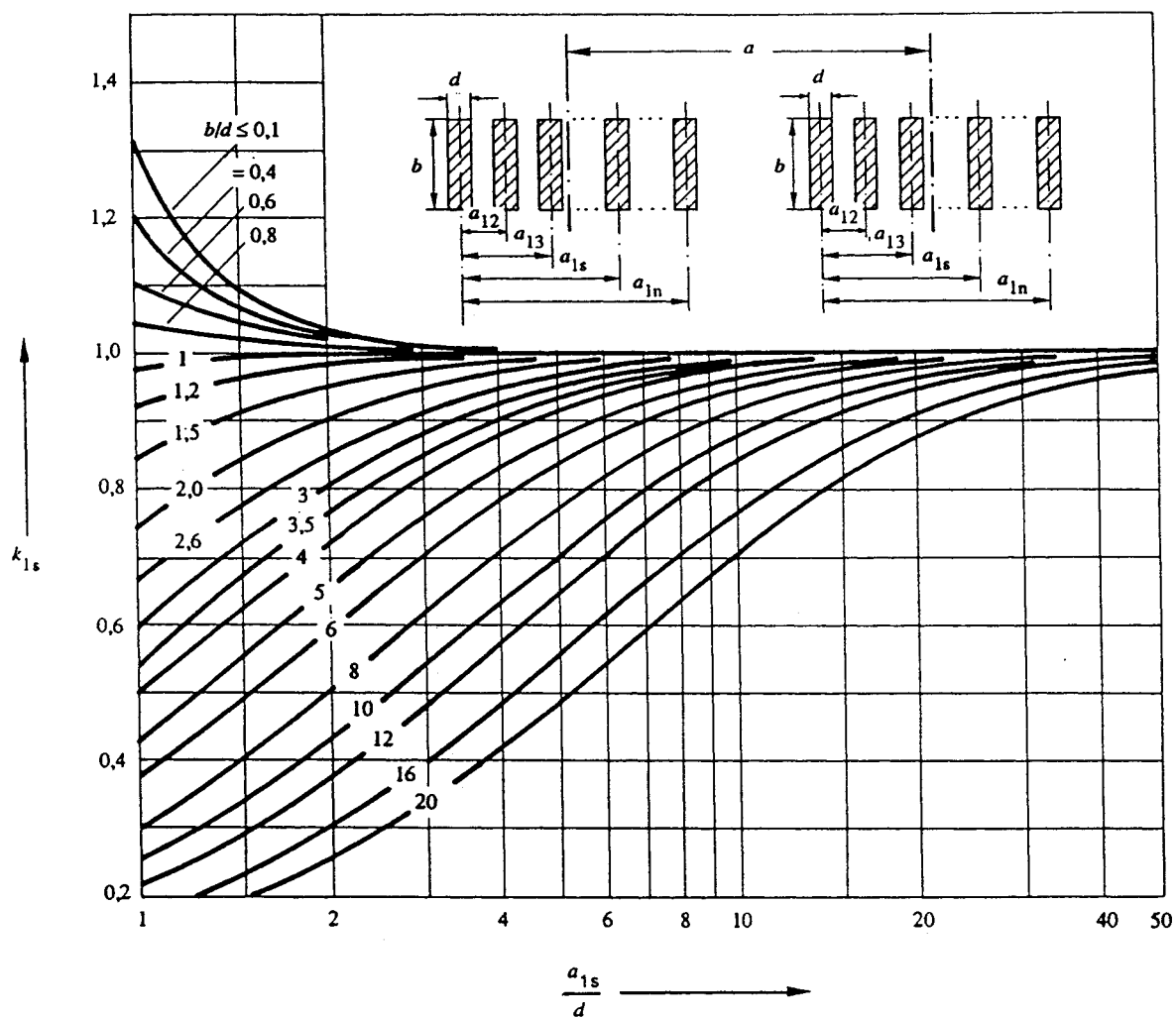


Figure 1 - Facteur k_{1s} pour le calcul de la distance équivalente des conducteurs

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

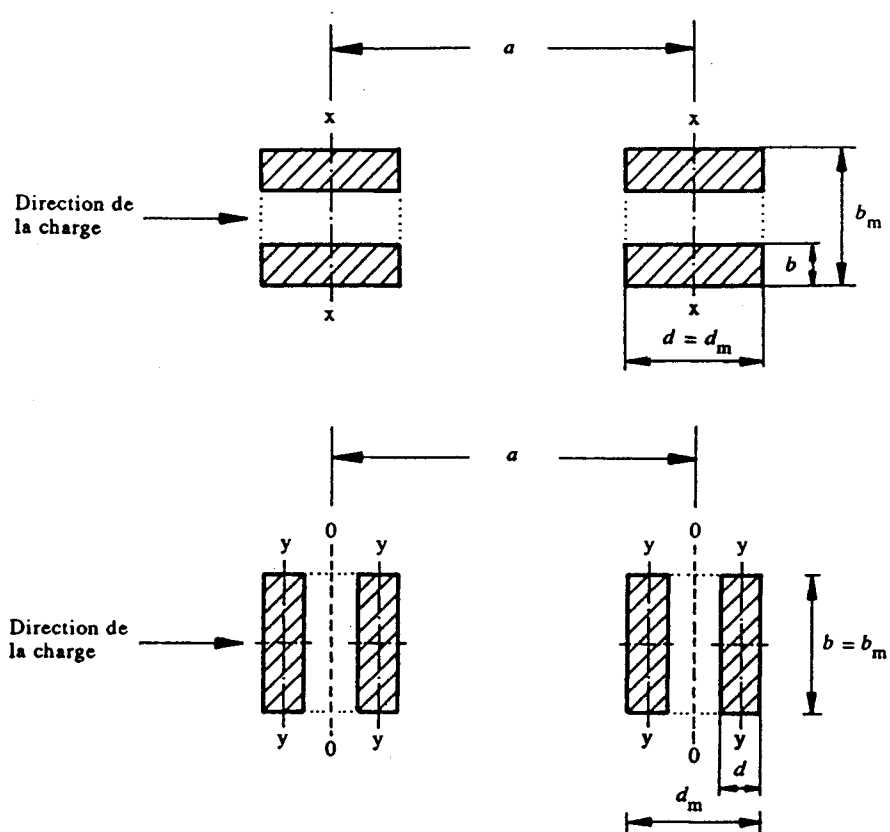
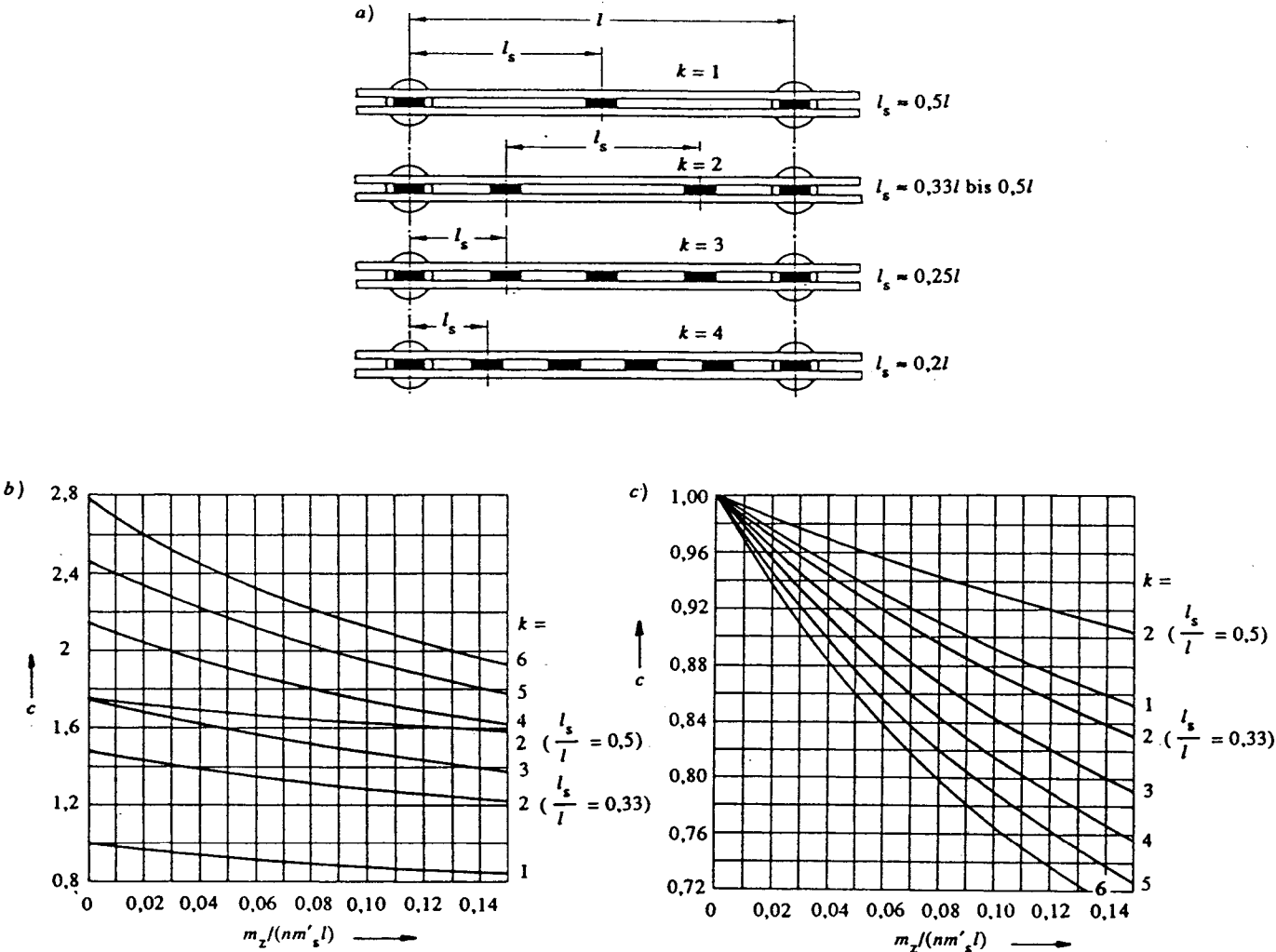


Figure 2 – Direction de la charge et axe de flexion dans le cas de dispositions à conducteurs multiples



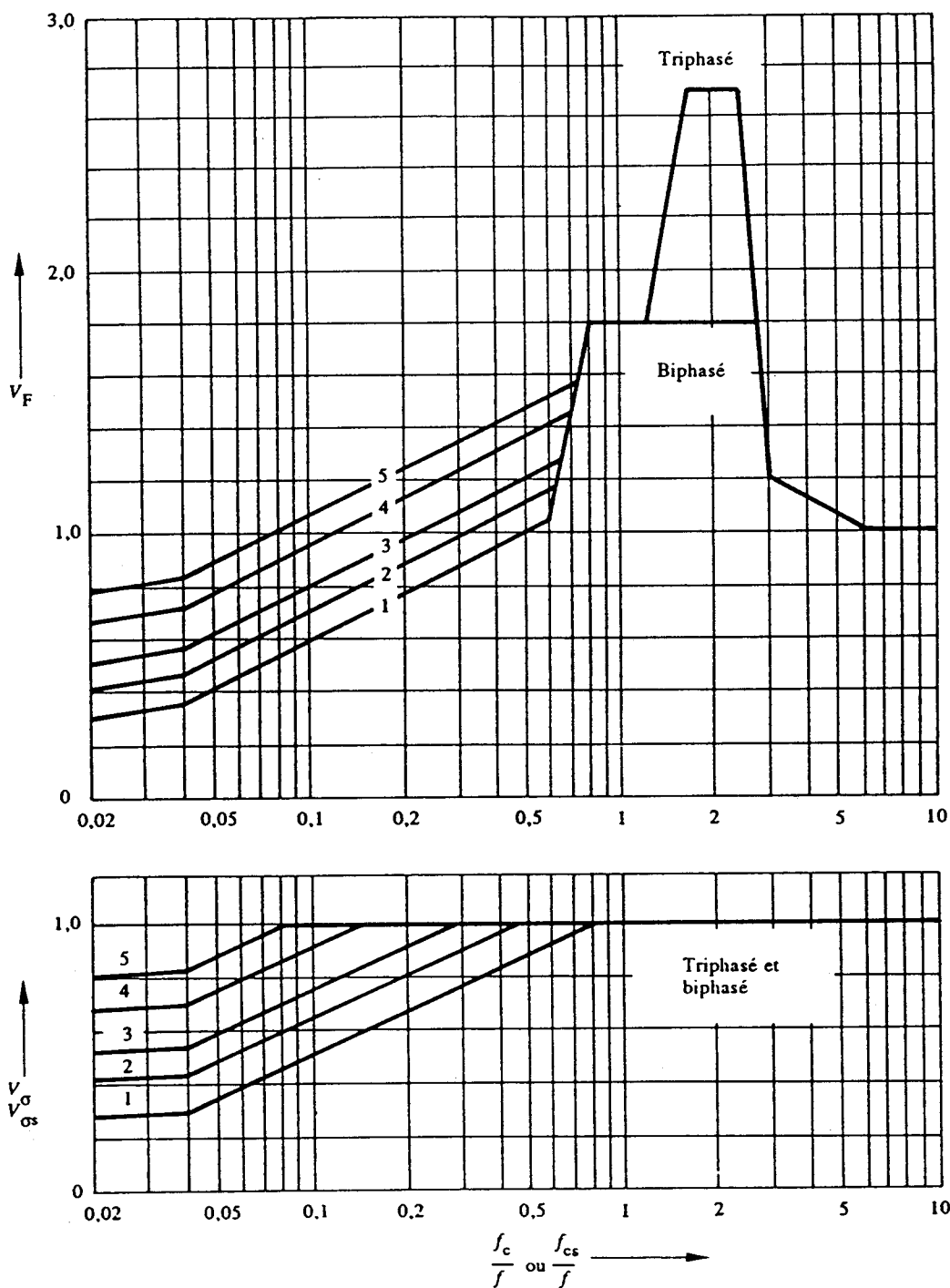
- a) Disposition des pièces de liaison dans la portée.
- b) Pièces de liaison constituées de raidisseurs.
- c) Pièces de liaison constituées d'entretoises ou fonctionnant comme des entretoises.

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.



1 $\kappa \geq 1,60$ 2 $\kappa = 1,40$ 3 $\kappa = 1,25$
4 $\kappa = 1,10$ 5 $\kappa = 1,00$

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

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

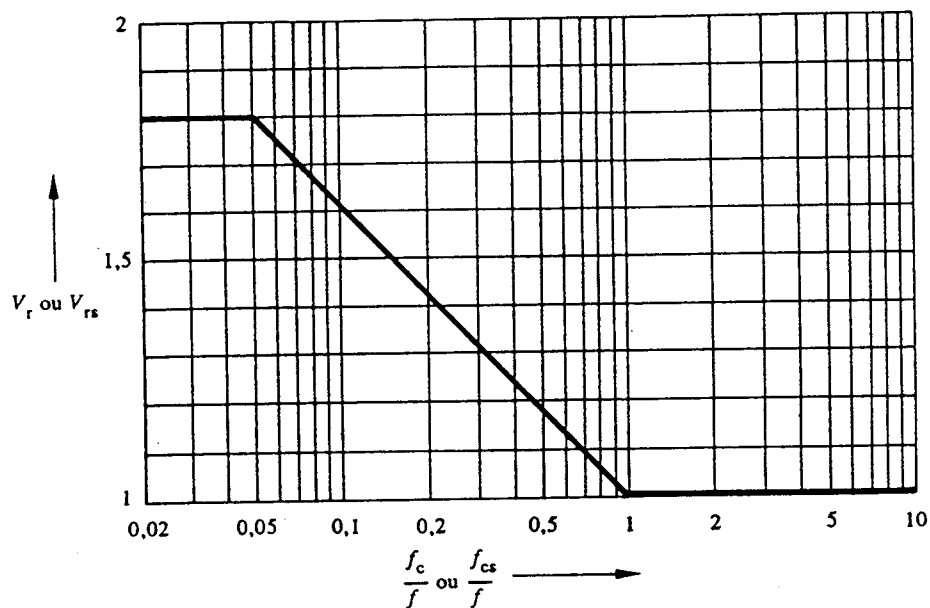


Figure 5 – Facteurs V_r et V_{rs} à utiliser dans le cas de réenclenchement automatique tripolaire

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

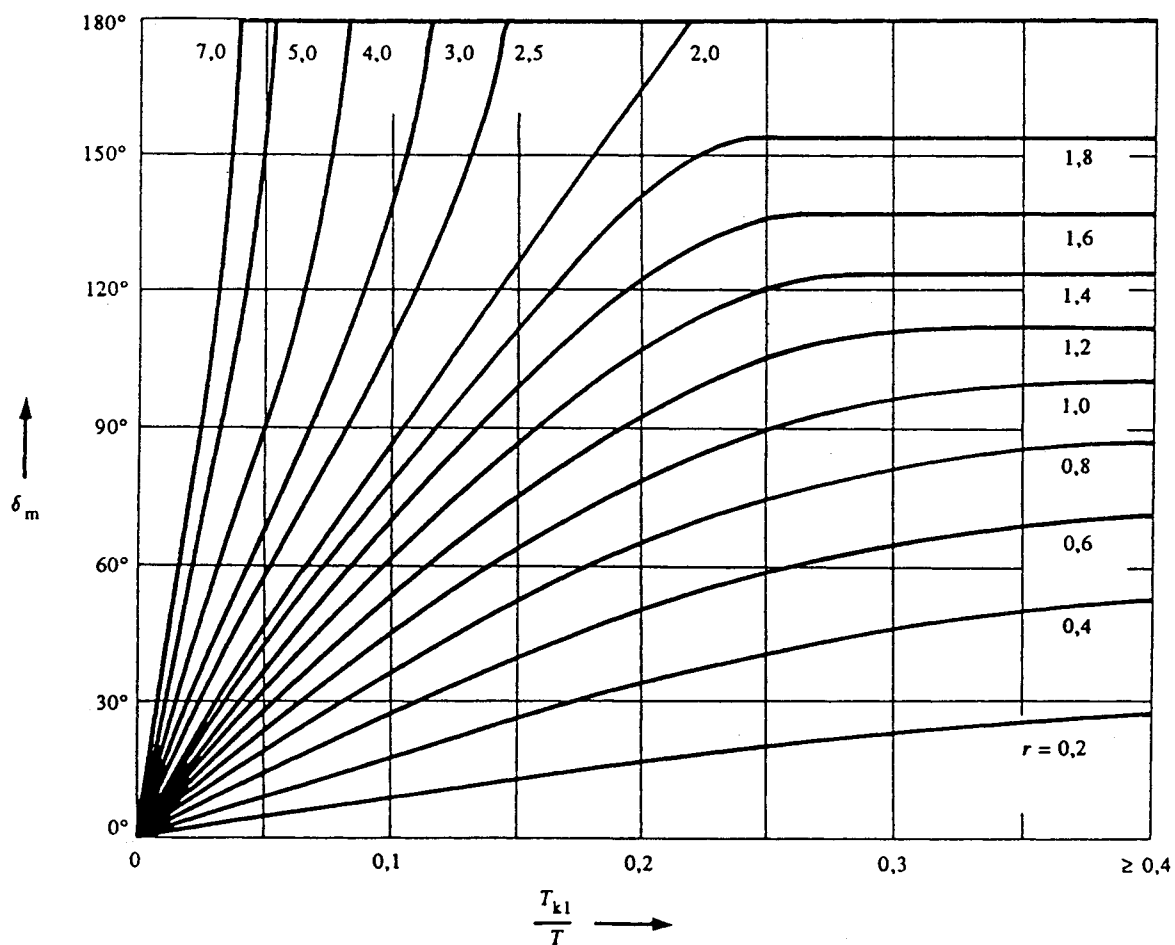


Figure 6 – Angle d'oscillation maximal δ_m relatif à une durée maximale de court-circuit donnée T_{k1}

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

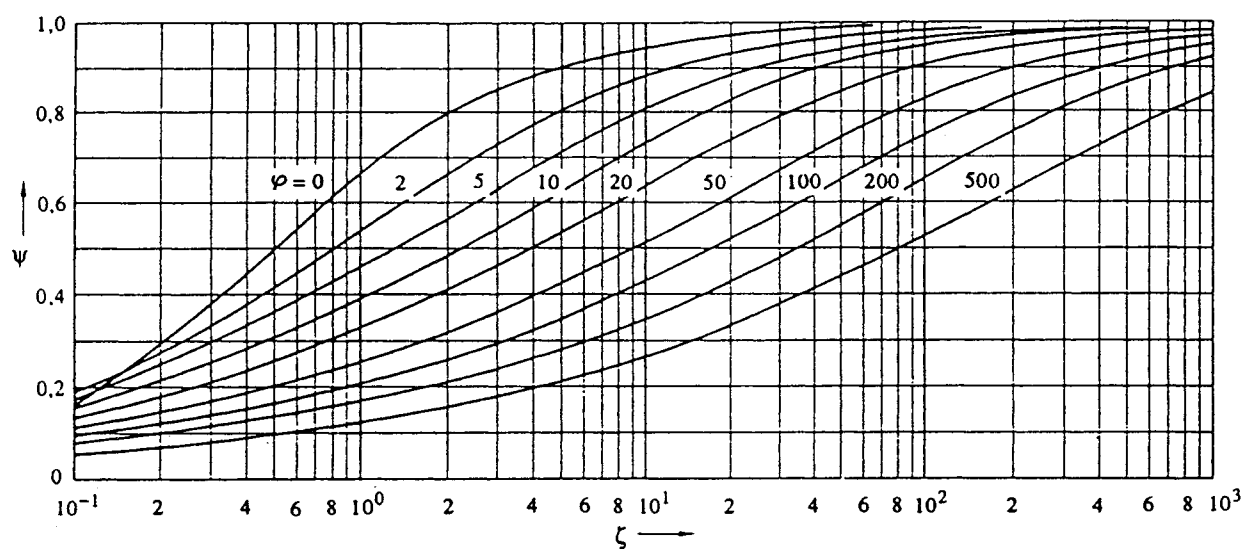


Figure 7 – Facteur ψ relatif à la force de tension dans les conducteurs souples

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

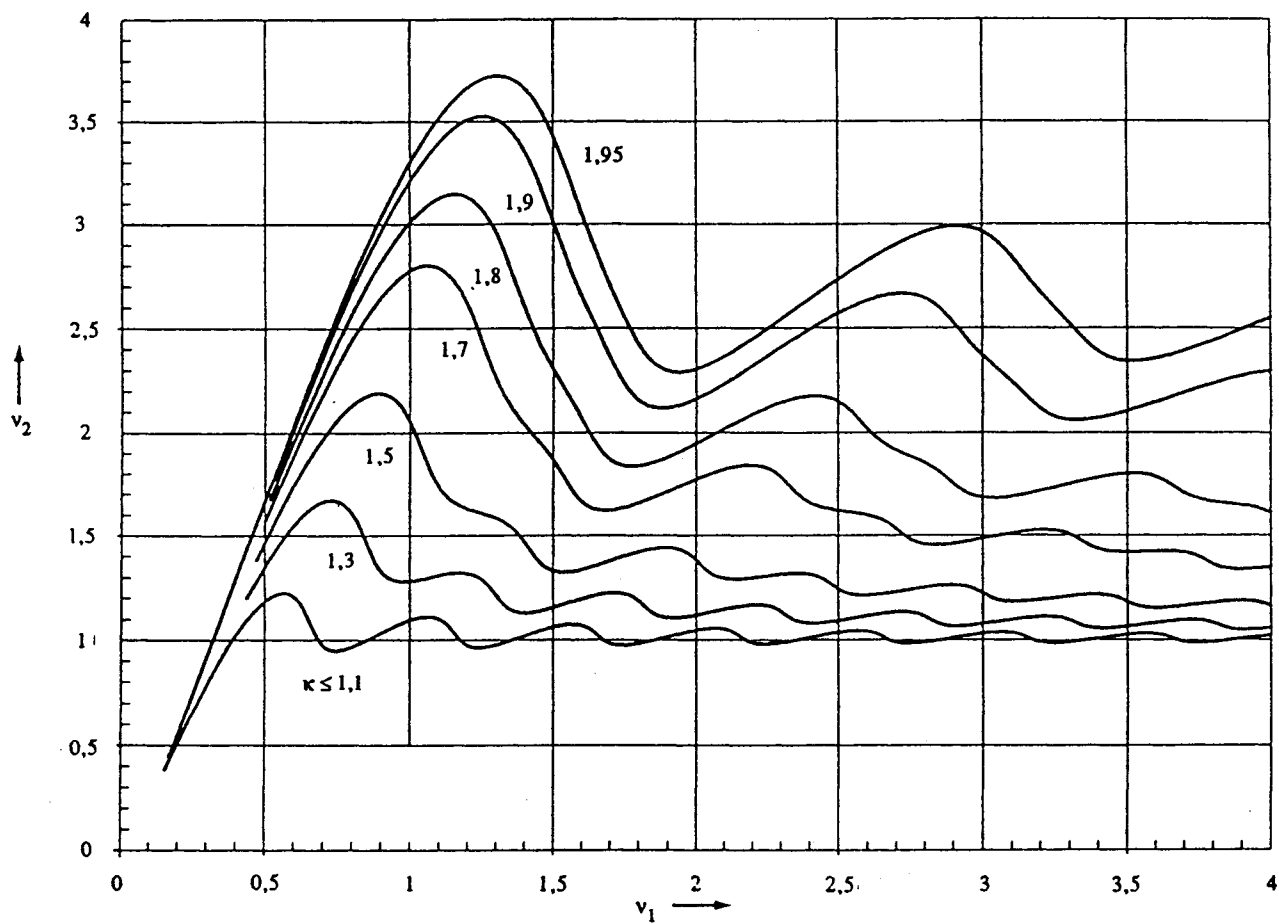


Figure 8 – Relation entre v_1 et v_2

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

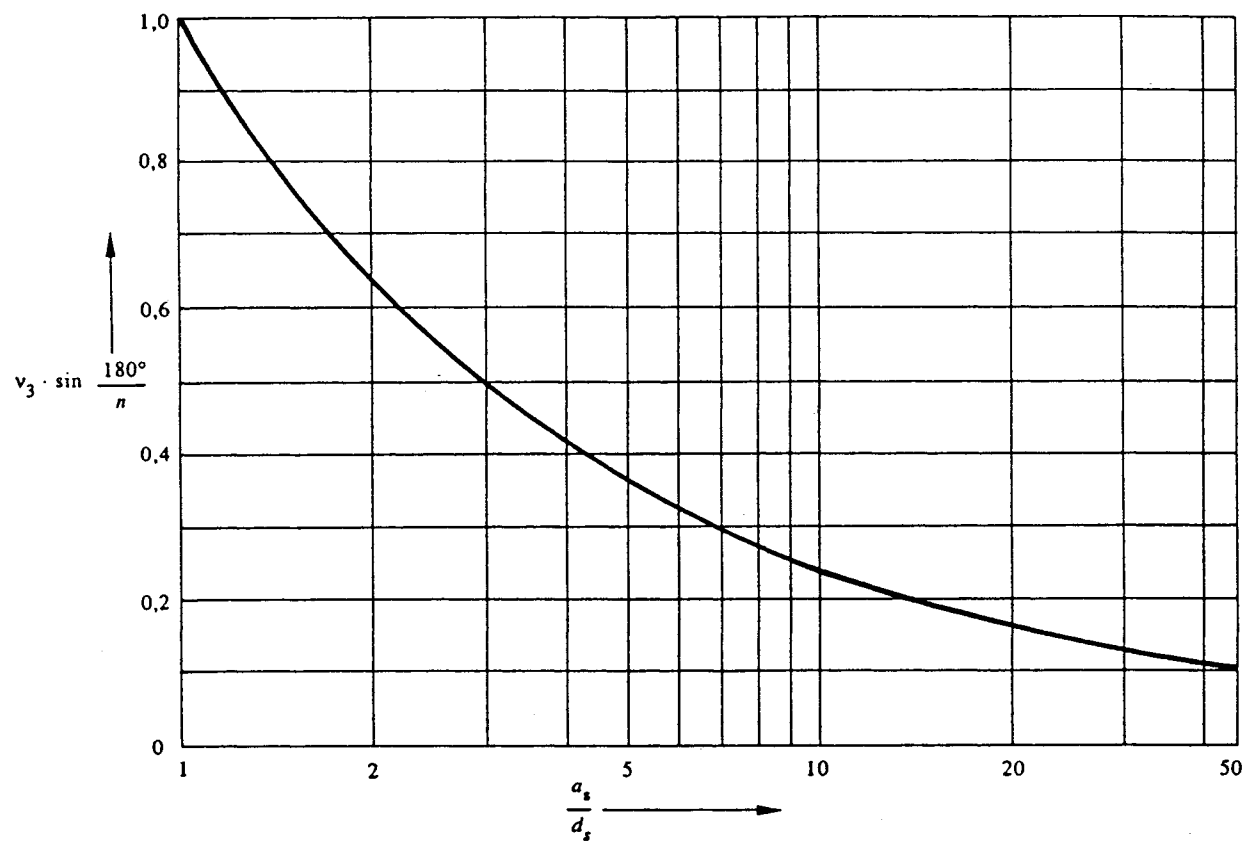


Figure 9 – Relation entre $v_3 \cdot \sin \frac{180^\circ}{n}$ et a_s/d_s

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

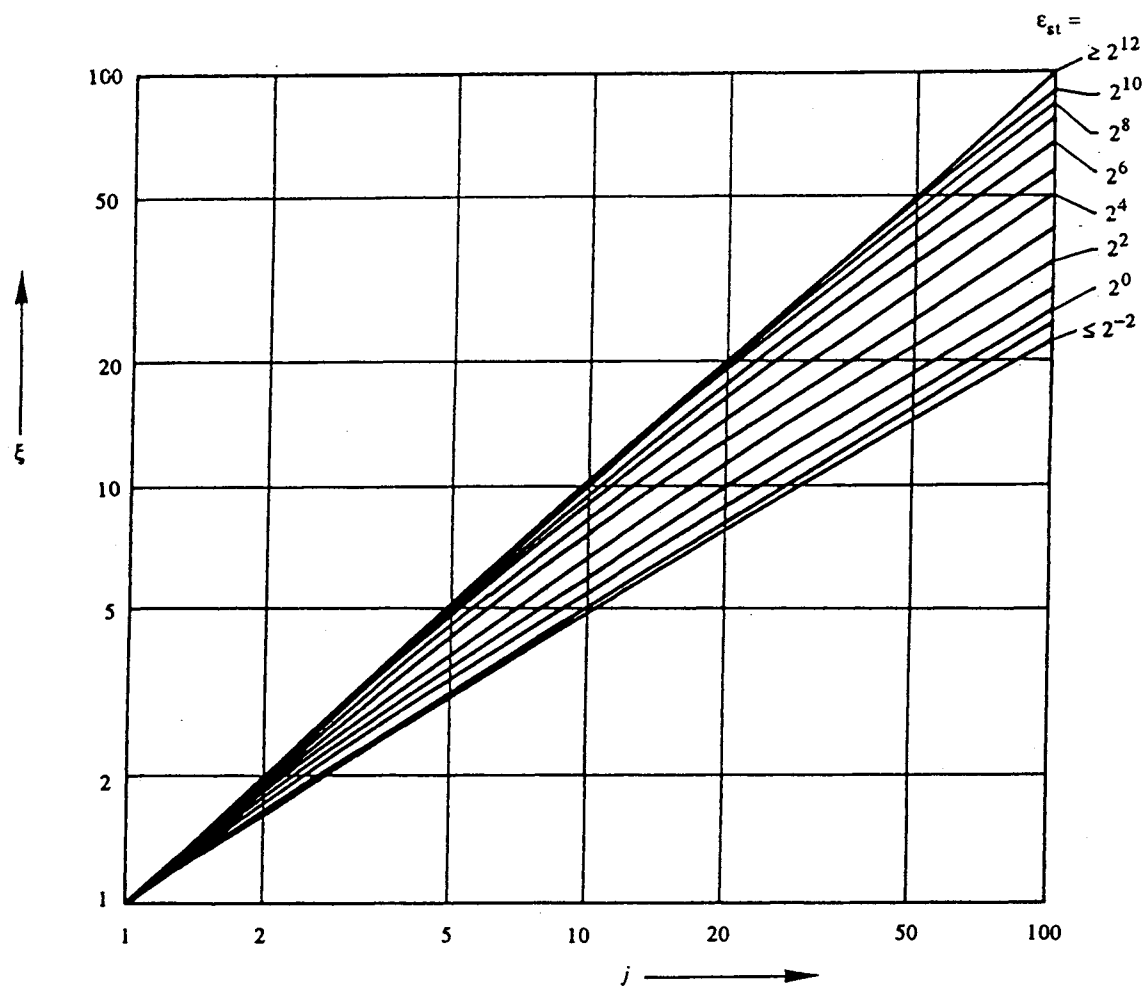
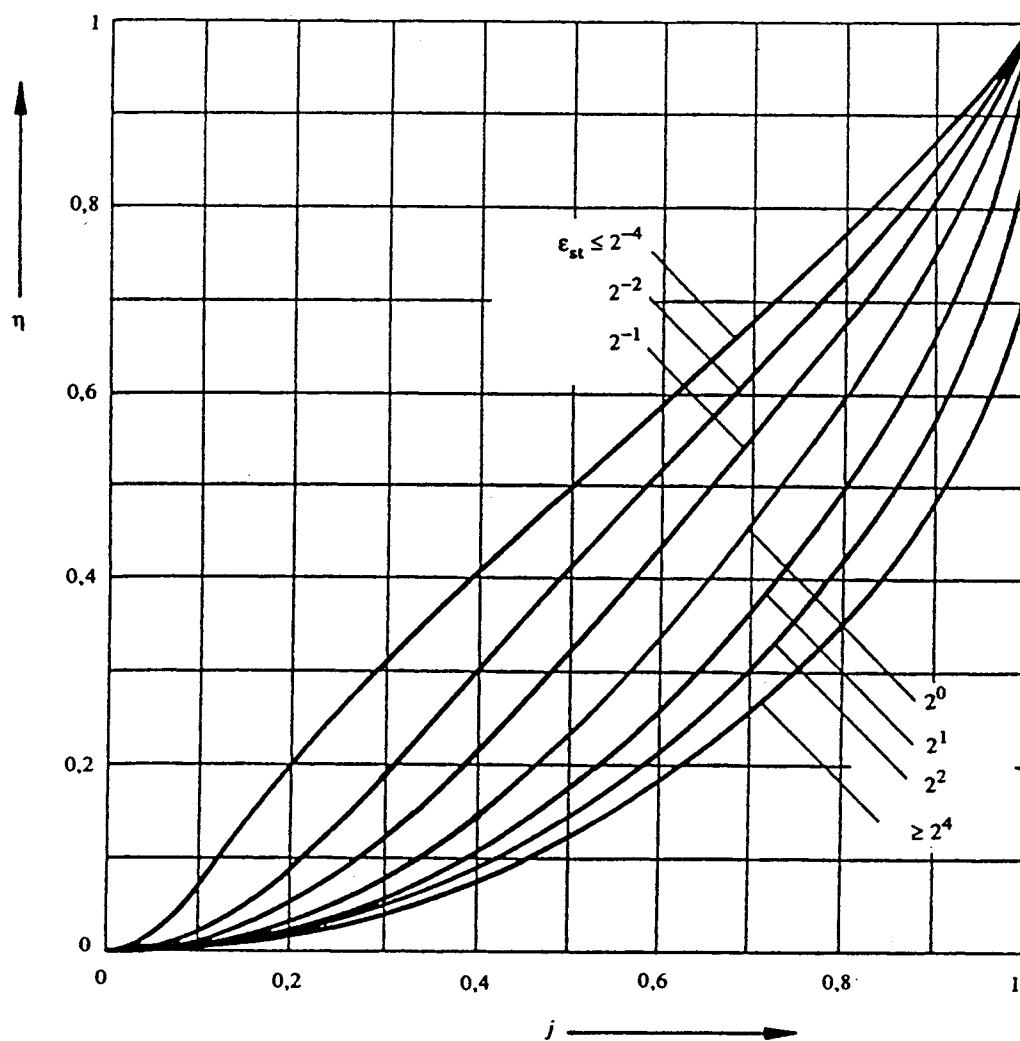


Figure 10 – Relation entre ξ et j ainsi que ϵ_{st}

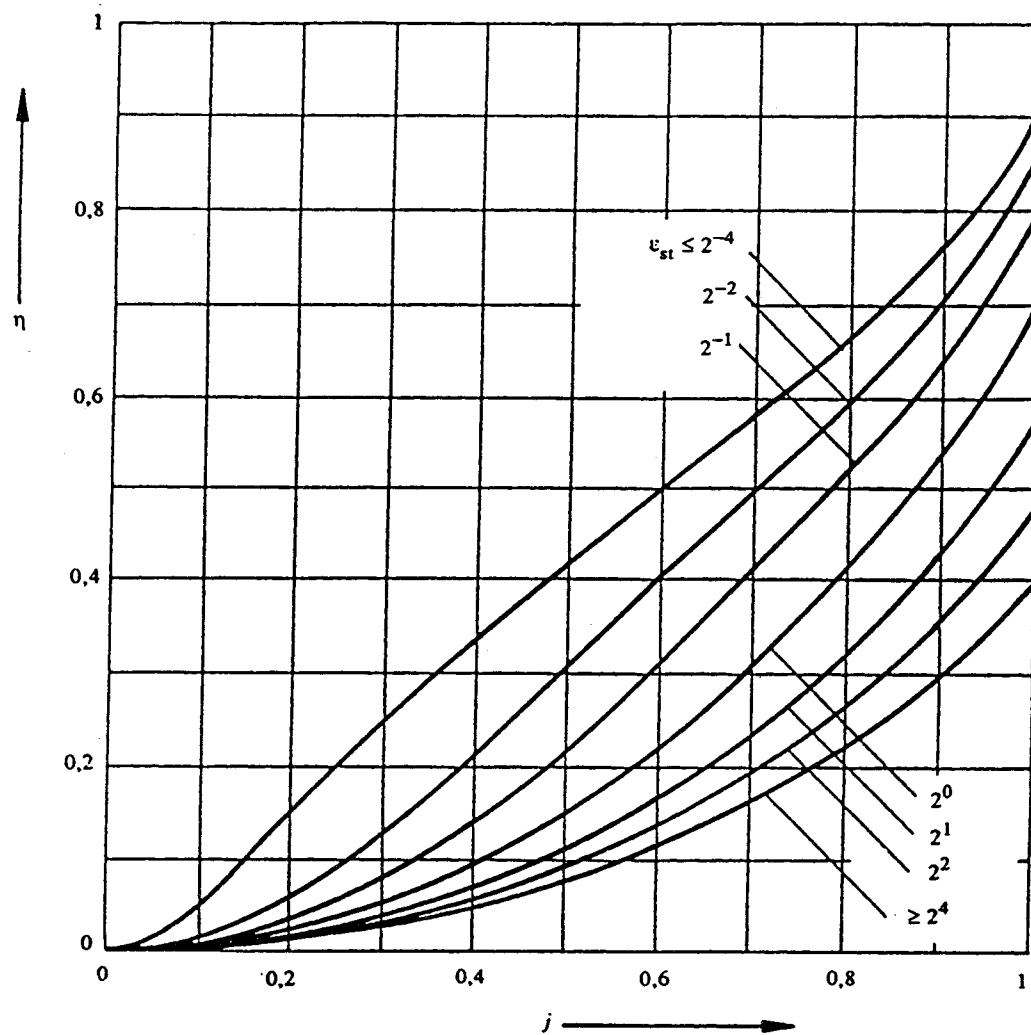
Pour la programmation se reporter à l'équation (51).



Cas où $2,5 < a_s/d_s \leq 5,0$

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

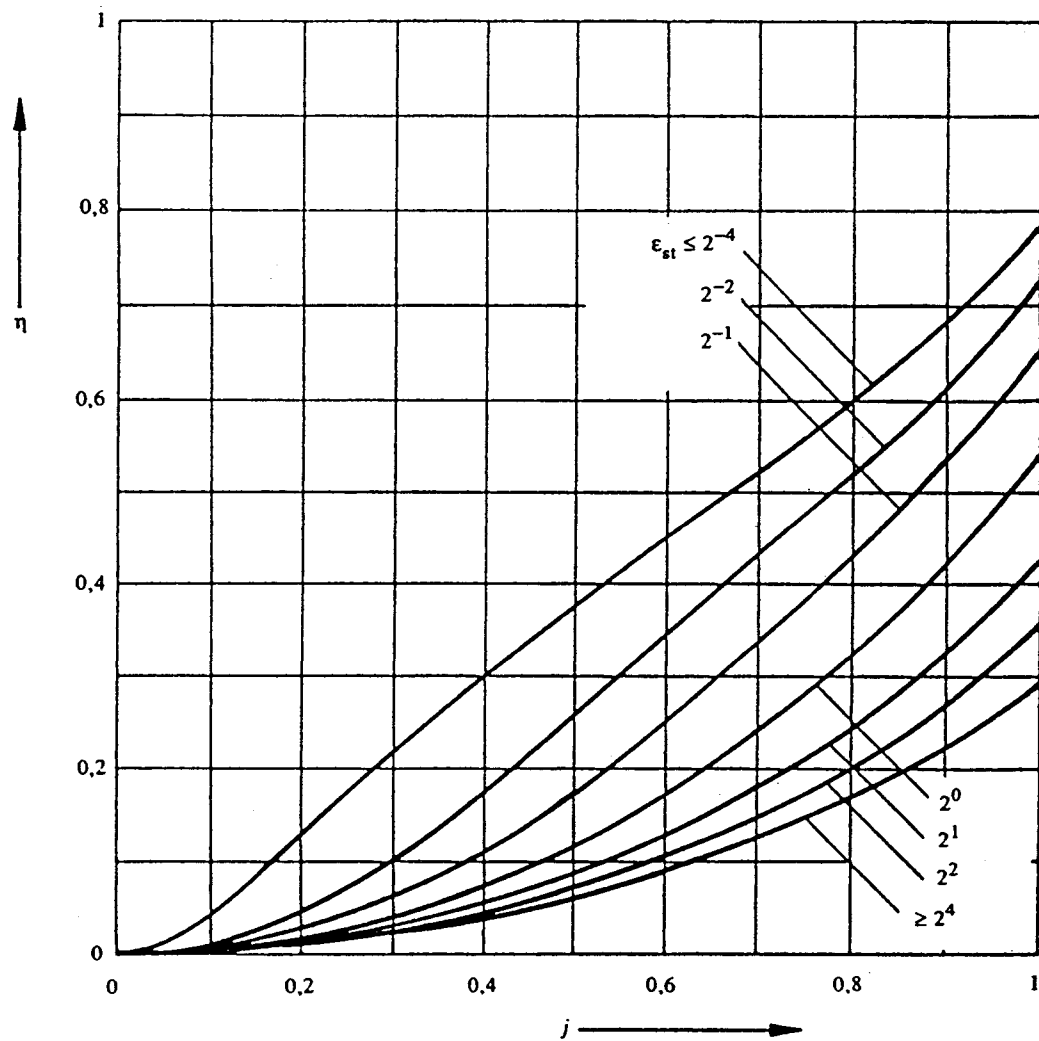
Pour la programmation se référer à la note 1 ou à la note 2 de 2.3.3.3.



Cas où $5,0 < a_s/d_s \leq 10,0$

Figure 11 b) – 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.



Cas où $10,0 < a_s/d_s \leq 15,0$

Figure 11 c) – 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.

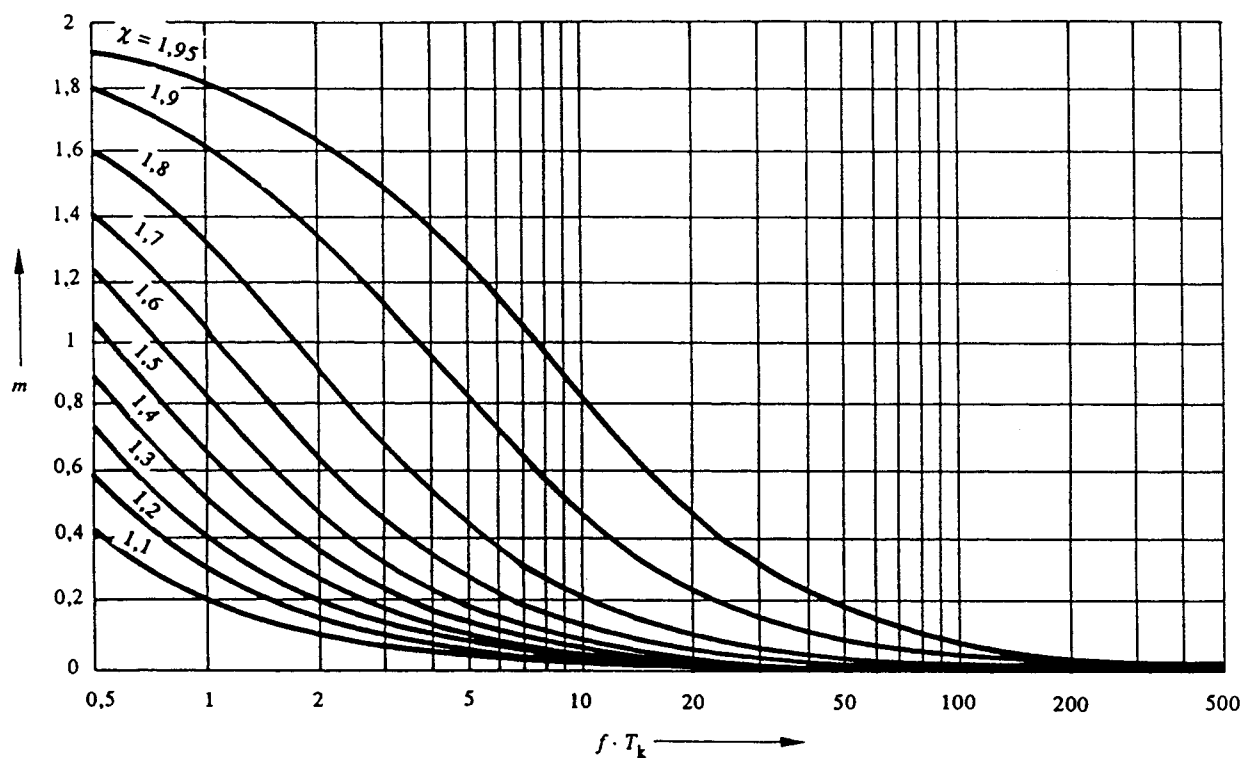


Figure 12 a) – Facteur m , dissipation thermique correspondant à la composante continue dans les réseaux triphasés et monophasés

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

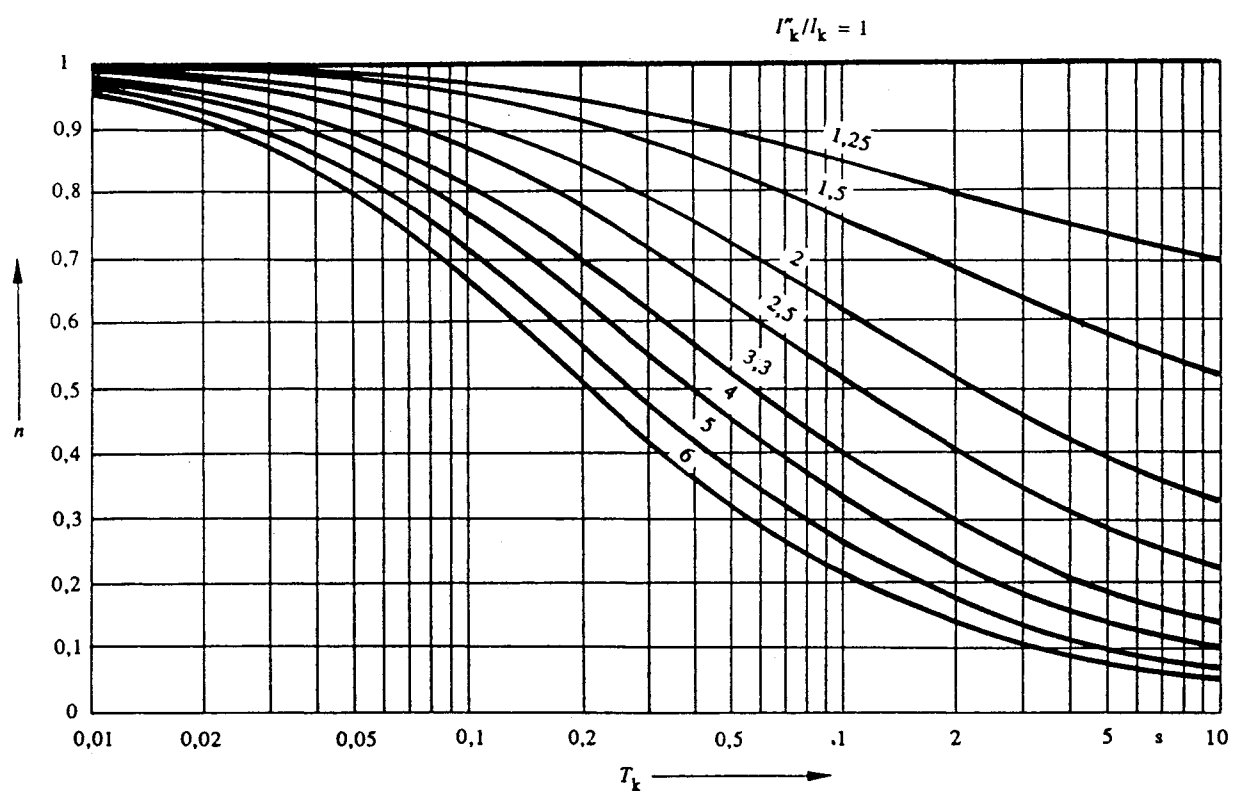
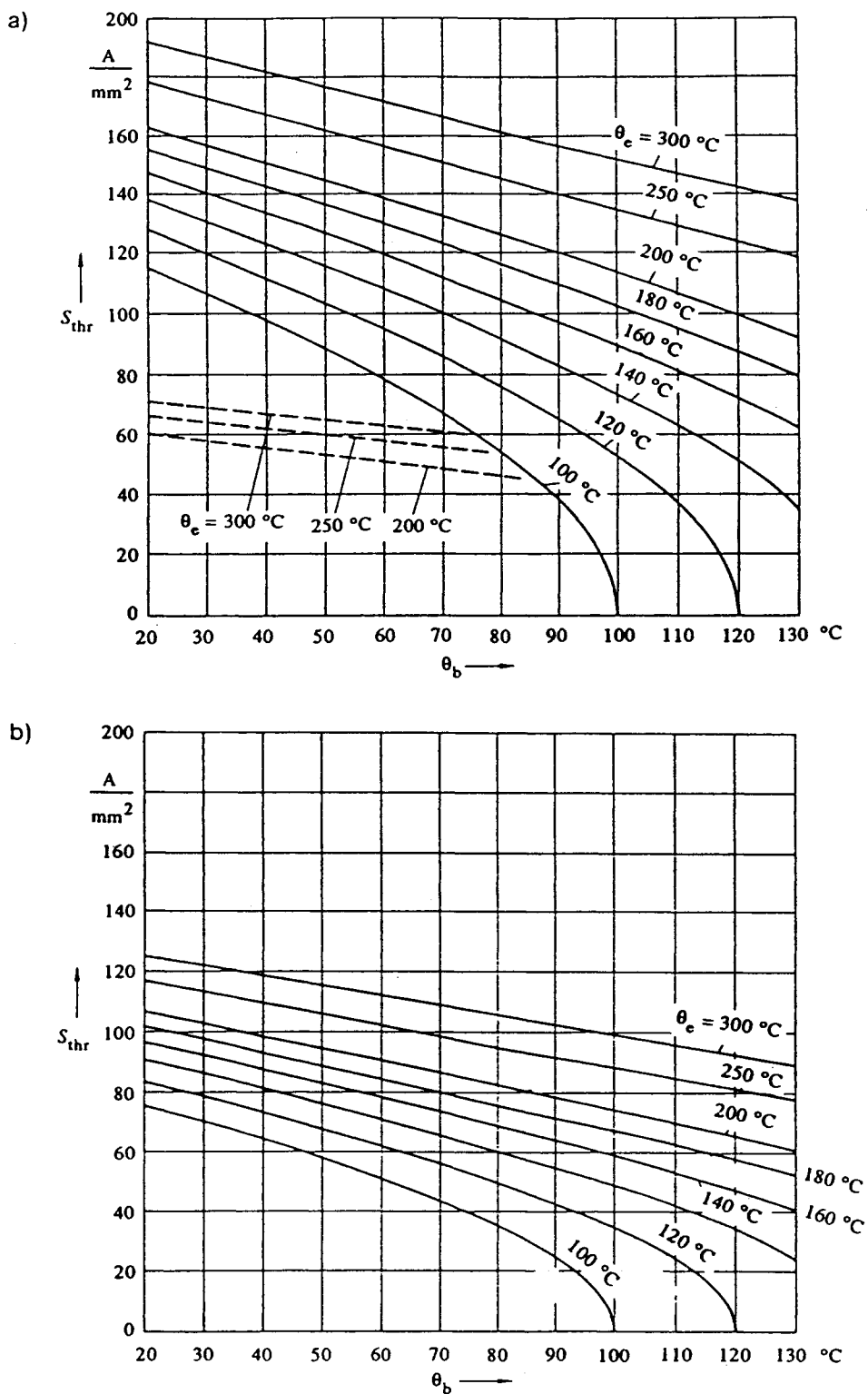


Figure 12 b) – Facteur n , dissipation thermique correspondant à la composante alternative dans les réseaux triphasés et, approximativement, dans les réseaux monophasés

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



- a) Traits continus: Cuivre
Traits pointillés: Acier faiblement allié.
- b) Aluminium, alliage d'aluminium, conducteur d'aluminium renforcé d'acier (Al-Ac)

Figure 13 – Relation entre la densité du courant de courte durée assigné ($T_{kr} = 1$ s) et la température du conducteur

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

Annexe A (normative)

Equations pour la détermination des diagrammes

A.1 Symboles

En complément à ceux de 1.3.1, les symboles suivants sont utilisés:

ξ_m	Facteur relatif à l'influence de la masse des pièces de liaison sur la fréquence propre correspondante	1
c_c	Facteur relatif au raidissement des pièces de liaison	1

En complément à ceux de 1.3.2, les symboles suivants sont utilisés:

c	Capacité thermique spécifique	J/(kg °C)
f	Fréquence du réseau	Hz
I'_k	Courant de court-circuit transitoire (valeur efficace)	A
T'_d	Constante de temps transitoire de l'axe d	s
α_{20}	Facteur de température	1/°C
κ_{20}	Conductivité spécifique à 20 °C	1/(Ωm)
ρ	Masse spécifique	kg/m ³
I_k	Courant de court-circuit triphasé symétrique (valeur efficace)	A

A.2 Figure 1

Le facteur k_{1s} est donné par l'équation suivante, avec a à la place de a_{1s} :

$$\begin{aligned}
 k_{1s} = & \left\{ - \left(\frac{(a/d)+1}{b/d} \right)^3 \ln \frac{[(a/d)+1]^2 + (b/d)^2}{[(a/d)+1]^2} + 2 \left(\frac{a/d}{b/d} \right)^3 \ln \frac{(a/d)^2 + (b/d)^2}{(a/d)^2} \right. \\
 & - \left(\frac{(a/d)-1}{b/d} \right)^3 \ln \frac{[(a/d)-1]^2 + (b/d)^2}{[(a/d)-1]^2} \\
 & + 3 \left[\frac{a/d}{b/d} \ln \frac{[(a/d)+1]^2 + (b/d)^2}{(a/d)^2 + (b/d)^2} + \frac{1}{b/d} \ln \frac{[(a/d)+1]^2 + (b/d)^2}{[(a/d)-1]^2 + (b/d)^2} \right. \\
 & \left. \left. - \frac{a/d}{b/d} \ln \frac{(a/d)^2 + (b/d)^2}{[(a/d)-1]^2 + (b/d)^2} \right] \right. \\
 & + 6 \left[\left(\frac{(a/d)+1}{b/d} \right)^2 \arctan \frac{b/d}{(a/d)+1} - 2 \left(\frac{a/d}{b/d} \right)^2 \arctan \frac{b/d}{a/d} \right. \\
 & \left. + \left(\frac{(a/d)-1}{b/d} \right)^2 \arctan \frac{b/d}{(a/d)-1} \right] \\
 & \left. + 2 \left[\arctan \frac{(a/d)+1}{b/d} - 2 \arctan \frac{a/d}{b/d} + 2 \arctan \frac{(a/d)-1}{b/d} \right] \right\} \frac{a/d \cdot b/d}{6}
 \end{aligned}$$

A.3 Figure 3

Le facteur c est donné par l'équation

$$c = \frac{c_c}{\sqrt{1 + \xi_m \frac{m_z}{nm'_s l}}}$$

avec

k	l_s/l	ξ_m	c_c	
			Figure 3b	Figure 3c
0	—	0,0	1,0	1,0
1	0,5	2,5	1,0	1,0
2	0,33	3,0	1,48	1,0
2	0,5	1,5	1,75	1,0
3	0,25	4,0	1,75	1,0
4	0,2	5,0	2,14	1,0
5	0,17	6,0	2,46	1,0
6	0,14	7,0	2,77	1,0

A.4 Figure 4

Le facteur V_F est donné par:

f_c/f	Facteur V_F	
	Court-circuit triphasé	Court-circuit biphasé
<0,04	$0,232 + 3,52 e^{-1,45\kappa} + 0,166 \lg (f_c/f) *$	
0,04 ... 0,8	valeur maximale de V_{F1} ou V_{F2} $V_{F1} = 0,839 + 3,52 e^{-1,45\kappa} + 0,6 \lg (f_c/f) *$ $V_{F2} = 2,38 + 6,00 \lg (f_c/f)$	
0,8 ... 1,2	1,8	
1,2 ... 1,6	$1,23 + 7,2 \lg (f_c/f)$	1,8
1,6 ... 2,4	2,7	1,8
2,4 ... 2,74	$8,59 - 15,5 \lg (f_c/f)$	1,8
2,74 ... 3,0	$8,59 - 15,5 \lg (f_c/f)$	
3,0 ... 6,0	$1,50 - 0,646 \lg (f_c/f)$	
>6,0	1,0	

* Si $\kappa > 1,6$ on doit utiliser $\kappa = 1,6$.

Le facteur V_{σ} est donné par:

f_c/f	Facteur V_{σ}
<0,04 0,04 ... 0,8	$0,0929 + 4,49 e^{-1,68\kappa} + 0,0664 \lg (f_c/f) *$ valeur minimale de $V_{\sigma 1}$ ou de $V_{\sigma 2}$ $V_{\sigma 1} = 0,756 + 4,49 e^{-1,68\kappa} + 0,54 \lg (f_c/f) *$ $V_{\sigma 2} = 1,0$
>0,8	1
* Si $\kappa > 1,6$ on doit utiliser $\kappa = 1,6$.	

Dans le cas de $V_{\sigma s}$, les mêmes équations que pour V_{σ} doivent être utilisées, en remplaçant f_c/f par f_{cs}/f .

A.5 Figure 5

Le facteur V_r est donné par

$$V_r = \begin{cases} 1,8 & \text{si } f_c/f \leq 0,05 \\ 1,0 - 0,615 \lg (f_c/f) & \text{si } 0,05 < f_c/f < 1,0 \\ 1,0 & \text{si } f_c/f \geq 1,0 \end{cases}$$

$$V_{rs} = \begin{cases} 1,8 & \text{si } f_{cs}/f \leq 0,05 \\ 1,0 - 0,615 \lg (f_{cs}/f) & \text{si } 0,05 < f_{cs}/f < 1,0 \\ 1,0 & \text{si } f_{cs}/f \geq 1,0 \end{cases}$$

A.6 Figure 8

Le facteur v_2 est donné par

$$v_2 = 1 - \frac{\sin (4\pi f T_{pi} - 2\gamma) + \sin 2\gamma}{4\pi f T_{pi}} + \frac{f\tau}{f T_{pi}} (1 - e^{-\frac{2fT_{pi}}{f\tau}}) \sin^2 \gamma -$$

$$\frac{8\pi f\tau \sin \gamma}{1 + (2\pi f\tau)^2} \left\{ \left(2\pi f\tau \frac{\cos (2\pi f T_{pi} - \gamma)}{2\pi f T_{pi}} + \frac{\sin (2\pi f T_{pi} - \gamma)}{2\pi f T_{pi}} \right) e^{-\frac{fT_{pi}}{f\tau}} + \right.$$

$$\left. \frac{\sin \gamma - 2\pi f\tau \cos \gamma}{2\pi f T_{pi}} \right\}$$

où τ est la constante de temps du réseau, constante qui peut être calculée conformément à la CEI 909:

$$\frac{1}{\tau} = -\frac{2\pi f}{3} \ln \frac{\kappa - 1,02}{0,98} \quad \text{avec } \kappa \geq 1,1 \text{ et } \gamma = \arctan (2\pi f\tau)$$

Si $\kappa < 1,1$ on doit utiliser $\kappa = 1,1$.

$f T_{pi}$ est la solution de l'équation $v_1 = f T_{pi} \sqrt{v_2}$

A.7 Figure 9

Le facteur v_3 est donné par

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

A.8 Figures 12 a) et 12 b)

Le facteur m est donné par

$$m = \frac{1}{2 f T_k \ln (\kappa - 1)} \left[e^{4 f T_k \ln (\kappa - 1)} - 1 \right]$$

Le facteur n est donné par

$$\frac{I_k''}{I_k} = 1 : \quad n = 1$$

$$\frac{I_k''}{I_k} \geq 1,25 :$$

$$n = \frac{1}{(I_k''/I_k)^2} \left[1 + \frac{T_d'}{20 T_k} (1 - e^{-20 T_k T_d'}) \left(\frac{I_k''}{I_k} - \frac{I_k'}{I_k} \right)^2 + \frac{T_d'}{2 T_k} (1 - e^{-2 T_k T_d'}) \left(\frac{I_k'}{I_k} - 1 \right)^2 \right. \\ \left. + \frac{T_d'}{5 T_k} (1 - e^{-10 T_k T_d'}) \left(\frac{I_k''}{I_k} - \frac{I_k'}{I_k} \right) + \frac{2 T_d'}{T_k} (1 - e^{-T_k T_d'}) \left(\frac{I_k'}{I_k} - 1 \right) \right. \\ \left. + \frac{T_d'}{5,051 T_k} (1 - e^{-10,17 T_k T_d'}) \left(\frac{I_k''}{I_k} - \frac{I_k'}{I_k} \right) \left(\frac{I_k'}{I_k} - 1 \right) \right]$$

avec

$$\frac{I_k'}{I_k} = \frac{I_k''/I_k}{0,88 + 0,17 I_k''/I_k}$$

$$T_d' = \frac{3,1 \text{ s}}{I_k''/I_k}$$

A.9 Figure 13

La densité du courant de tenue de courte durée assigné, S_{thr} , est donnée par

$$S_{thr} = \frac{K}{\sqrt{T_{kr}}}$$

où

$$K = \sqrt{\frac{\kappa_{20} \rho}{\alpha_{20}} \ln \frac{1 + \alpha_{20} (\theta_e - 20 \text{ °C})}{1 + \alpha_{20} (\theta_b - 20 \text{ °C})}}$$

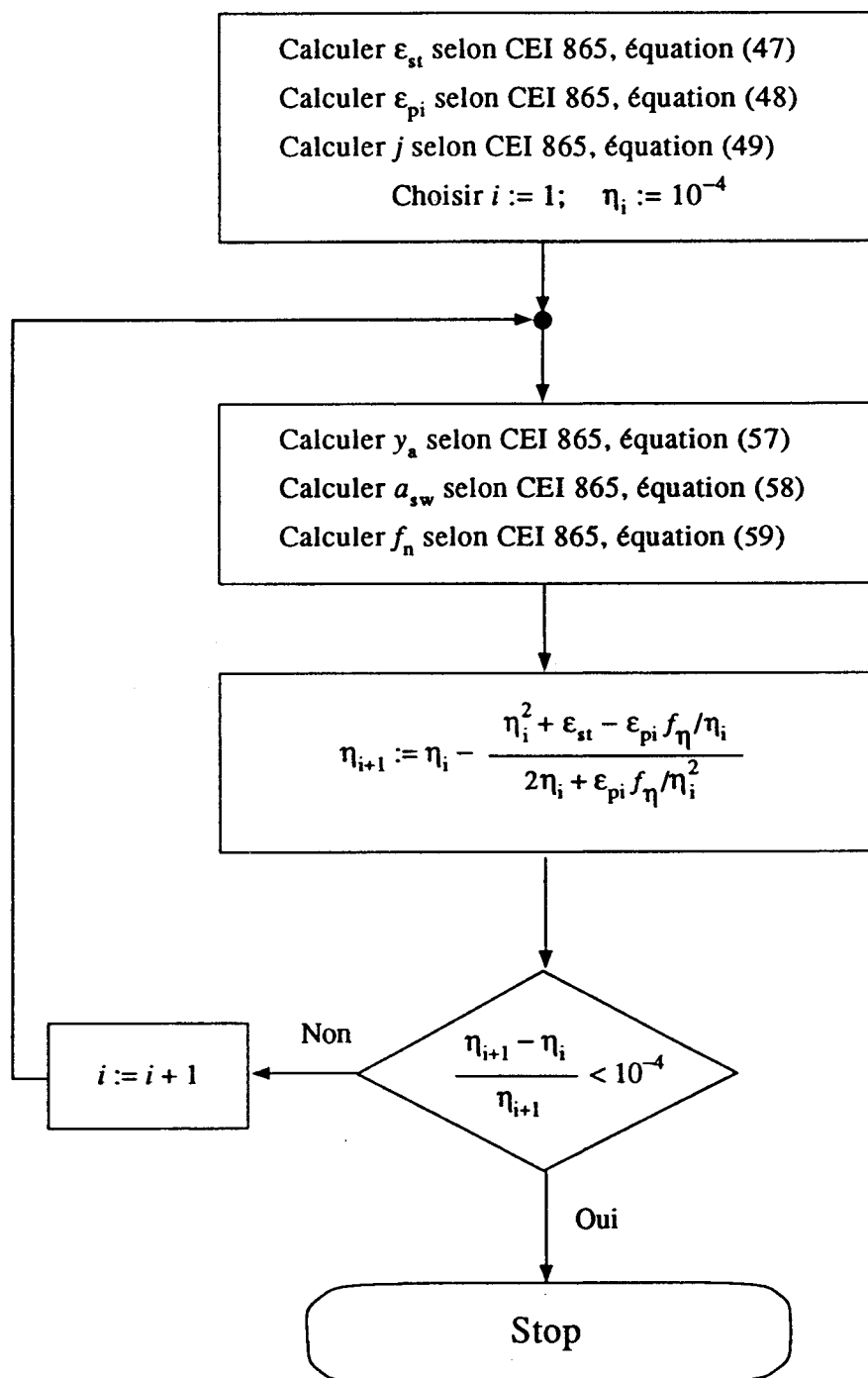
avec les données suivantes en ce qui concerne les matériaux:

Symbole	Unité S.I.	Cuivre	Alliage d'aluminium Conducteur en aluminium renforcé d'acier (Al-Ac)	Acier
c	J/(kg°C)	390	910	480
ρ	kg/m ³	8 900	2 700	7 850
κ_{20}	1/(Ωm)	$56 \cdot 10^6$	$34,8 \cdot 10^6$	$7,25 \cdot 10^6$
α_{20}	1/°C	0,0039	0,004	0,0045

Si des températures de base autres que 20 °C sont utilisées, l'équation donnant K doit être modifiée.

Annexe B
(informative)

**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)**



ANNEXE ZA (normative)**AUTRES PUBLICATIONS INTERNATIONALES CITEES DANS LA PRESENTE NORME
AVEC LES REFERENCES DES PUBLICATIONS EUROPEENNES CORRESPONDANTES**

Cette norme européenne comporte par référence datée ou non datée des dispositions d'autres publications. Ces références normatives sont citées aux endroits appropriés dans le texte et les publications sont énumérées ci-après. Pour les références datées, les amendements ou révisions ultérieurs de l'une quelconque de ces publications ne s'appliquent à cette norme européenne que s'ils y ont été incorporés par amendement ou révision. Pour les références non datées, la dernière édition de la publication à laquelle il est fait référence s'applique.

NOTE : Dans le cas où une publication internationale est modifiée par les modifications communes du CENELEC, indiqué par (mod), il faut tenir compte de la EN/du HD approprié(e).

Publication CEI	Date	Titre	EN/HD	Date
909	1988	Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif	HD 533 S1	1991
949	1988	Calcul des courants de court-circuit admissibles au plan thermique, tenant compte des effets d'un échauffement non adiabatique	-	-
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	-	-

