

Guide technique Merlin Gerin

Moyenne tension

guide de conception MT

$I = K \times \frac{24.9(\theta - \theta_n)^{0.41} \times S^{0.95} \times P^{0.35}}{\sqrt{P_{20} [1 + \alpha(\sigma - 20)]}}$
 $h = \frac{Fl}{12} \times \frac{v^2}{I}$
 $\Delta\theta_{cc} = \frac{0.24}{S}$
 $I = 2 \left(\frac{b \times k^3}{12} + S \times v \right)$
 $I_{sym} = \frac{I_{Ac}}{\sqrt{2}}$
 $U_k \geq a \cdot \frac{I}{(R_k + R_L + R_f)}$
 $P = U \cdot I \cdot \cos(\phi)$
 $I = \frac{P}{U \cdot \cos(\phi)}$
 $I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos(\phi)}$
 $I_{cc} = \frac{I_n}{U_{cc} / 100}$
 $I_{k1s} = \frac{S_{cc} \times 10^3}{U_s \times \sqrt{3}}$
 $I_{k1s} = \frac{250 \times 10^3}{15 \times \sqrt{3}} = 9600 \text{ A}$

- Merlin Gerin
- Modicon
- Square D
- Telemecanique

Guide de conception

Ce guide est un catalogue de savoir-faire technique au service de tout concepteur d'équipement moyenne tension.



But

- Présenter, aider au choix des équipements MT conformes aux normes.
- Donner les règles de conception pour dimensionner ou calculer un tableau MT.

Comment ?

- En proposant des canevas de calcul simples et clairs pour guider pas à pas le concepteur.
- En montrant des exemples concrets de calculs.
- En fournissant les informations sur les unités de mesure et normes internationales.
- En comparant les normes internationales.

En résumé

- Ce guide vous aide à effectuer les calculs nécessaires à la définition et au dimensionnement des matériels et vous donne les informations utiles pour vous permettre de concevoir votre tableau MT.



Présentation	5
Equipements préfabriqués sous enveloppe métallique	5
Tension	6
Courant	8
Fréquence	9
Fonctions de l'appareillage	9
Différents types d'enveloppes	10
Règles de conception	11
Puissance de court-circuit	11
Courants de court-circuit	12
Transformateur	13
Générateur synchrones	14
Moteur asynchrone	14
Aide mémoire	15
Exemple de calcul en triphasé	17
Calcul des jeux de barres	21
La tenue thermique	24
La tenue électrodynamique	27
Exemple de calcul d'un jeu de barres	31
Tenue diélectrique	38
La rigidité diélectrique du milieu	38
La forme des pièces	39
La distance entre les pièces	39
Degré de protection	41
Le code IP	41
Le code IK	43
Définition d'appareillage	45
Disjoncteur moyenne tension	45
Transformateur de courant	54
Transformateur de tension	61
Déclassements	64
Unités de mesure	67
Noms et symboles des unités de mesure SI	67
Unités de base	67
Grandeurs et unités courantes	67
Correspondance entre unités anglo-saxonnes et unités du système international (SI)	69
Normes	71
Les normes citées	71
Comparatif CEI-ANSI	72
Références	81
Références à la documentation Schneider Electric	81
Index	83



Pour commencer,
quelques informations indispensables
sur les tableaux MT !
Il est fait référence à la
Commission Electrique Internationale
(CEI).



Introduction

Pour concevoir une cellule moyenne tension, vous avez besoin de connaître les grandeurs de base suivantes :

- La tension
- Le courant
- La fréquence
- La puissance de court-circuit.

La tension, l'intensité assignée et la fréquence d'utilisation sont souvent connues ou peuvent être définies aisément, mais comment calculer la puissance ou le courant de court-circuit en un point donné d'une installation ?

Connaître la puissance de court-circuit d'un réseau permet de choisir les différents éléments du tableau qui devront résister à des échauffements importants et aux contraintes électrodynamiques. La connaissance de la tension (kV) permettra de définir la tenue diélectrique des éléments.

Exemple : disjoncteurs, isolateurs, TC.

Le sectionnement, la commande et la protection des réseaux électriques se fait par l'intermédiaire de l'appareillage.

- Les appareillages sous enveloppe métallique sont subdivisés en trois types :
 - blindé
 - compartimenté
 - bloc.

Tension

Tension de service U (kV)

Elle est appliquée aux bornes du matériel.

Tension assignée U_r (kV)

Connue précédemment sous le terme tension nominale, elle est la valeur efficace maximale de la tension que le matériel peut supporter en service normal.

La tension assignée est toujours supérieure à la tension de service et, est associée à un niveau d'isolement.

Niveau d'isolement U_d (kV eff. 1 mn) et U_p (kV crête)

Il fixe la tenue diélectrique des matériels aux surtensions de manœuvre et aux chocs de foudre.

■ U_d : les surtensions d'origines internes accompagnent toute modification intervenant dans un circuit : ouverture ou fermeture d'un circuit, claquage ou contournement d'un isolant, etc...

Elle est simulée en laboratoire par la tension de tenue à la fréquence industrielle pendant une minute.

■ U_p : les surtensions d'origines externes ou atmosphériques se produisent lorsque la foudre tombe sur la ligne ou à proximité. L'onde de tension qui en résulte est simulée en laboratoire et est appelée onde de choc de foudre.

Nota : la CEI 694 fixe dans son article 4 les différentes valeurs de tension et dans son article 6 les conditions d'essais diélectriques.

Exemple :

- Tension de service : 20 kV
- Tension assignée : 24 kV
- Tension de tenue à fréquence industrielle 50 Hz 1 mn : 50 kV eff.
- Tension de tenue à l'onde de choc 1,2/50 μ s : 125 kV crête

Normes

Sauf cas spécial, les matériels MERLIN GERIN sont conformes à la liste 2 du tableau série 1 des CEI 60 071 et 60 298.

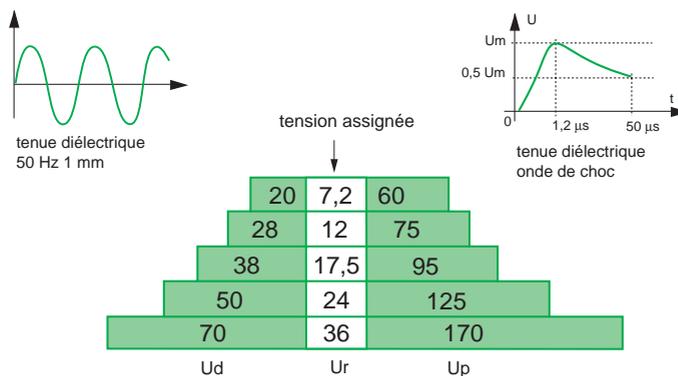
Tension assignée kV eff.	Tenue à l'onde de choc 1,2/50 μ s 50 Hz kV crête		Tenue à fréquence industrielle 1 minute kV eff.	Tension de service les plus usuelles kV eff.
	liste 1	liste 2		
7,2	40	60	20	3,3 à 6,6
12	60	75	28	10 à 11
17,5	75	95	38	13,8 à 15
24	95	125	50	20 à 22
36	145	170	70	25,8 à 36

Les niveaux d'isolement s'appliquent à des appareillages sous enveloppe métallique pour une altitude inférieure à 1 000 mètres, 20 °C, 11 g/m³ d'humidité et une pression de 1 013 mbar. Au-delà, un déclassement est à considérer.

A chaque niveau d'isolement correspond une distance dans l'air qui garantit la tenue du matériel sans certificat d'essai.

Tension assignée kV eff.	Tenue à l'onde de choc 1,2/50 μ s kV crête	Distance/masse dans l'air cm
7,2	60	10
12	75	12
17,5	95	16
24	125	22
36	170	32

Tensions normalisées CEI



Courant

Courant assigné en service continu : I_r (A)

Il est la valeur efficace du courant qu'un matériel peut supporter fermé, sans dépasser l'échauffement permis par les normes.

Le tableau ci-dessous rappelle les échauffements autorisés par le CEI en fonction de la nature des contacts.

Courant assigné en service continu :

Nature de l'organe du matériau	Valeurs maximales	
	Température max. du conducteur (°C)	Echauffement max. = $t^{\circ} \text{ max.} - 40^{\circ} \text{C}$
contacts dans l'air		
cuivre ou alliage de cuivre nu	75	35
argentés ou nickelés	105	65
étamés	90	50
raccords par boulons ou dispositifs équivalents		
cuivre nu, alliage de cuivre nu ou alliage d'aluminium	90	50
argentés ou nickelés	115	75
étamés	105	65

Nota : les courants assignés usuellement utilisés par Merlin Gerin sont : 400, 630, 1 250, 2 500 et 3 150 A.

Intensité de service : I (A)

Elle est calculée d'après les consommations des appareils raccordés au circuit considéré. C'est l'intensité traversant réellement le matériel.

Si nous ne disposons pas des éléments de calcul, le client doit nous communiquer sa valeur. L'intensité de service peut-être calculée lorsque l'on connaît la puissance des récepteurs.

Exemples :

■ Un tableau avec un départ moteur de 630 kW et un départ transformateur de 1 250 kVA sous 5,5 kV de tension de service.

□ calcul de l'intensité de service du départ transformateur :

Puissance apparente :

$$S = UI\sqrt{3}$$

$$I = \frac{S}{U\sqrt{3}} = \frac{1250}{5,5 \cdot 1,732} = 130A$$

□ calcul de l'intensité de service du départ moteur :

$\cos\phi$ = facteur de puissance = 0,9

η = rendement du moteur = 0,9

$$I = \frac{P}{U\sqrt{3}\cos\phi\eta} = \frac{630}{5,5 \cdot 1,732 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = 82A$$

Equipements préfabriqués sous enveloppe métallique

Courant de court-circuit minimal : I_{cc} (kA eff)

(voir explication au chapitre "Courants de court-circuit").

Valeur efficace du courant de court-circuit maximal : I_{th} (kA eff. 1 s ou 3 s)

(voir explication au chapitre "Courants de court-circuit").

Valeur crête du courant de court-circuit maximal : I_{dyn} (kA crête)

(valeur de la première crête de la période transitoire)
(voir explication au chapitre "Courants de court-circuit").

Fréquence f_r (Hz)

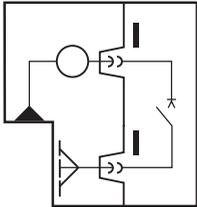
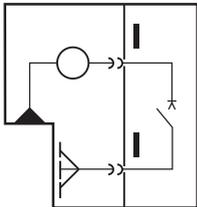
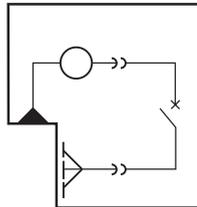
- Deux fréquences sont usuellement utilisées dans le monde :
 - 50 Hz en Europe
 - 60 Hz en Amérique.
- Quelques pays utilisent les deux fréquences sans distinction.

Fonctions de l'appareillage

Désignation et symbole	fonction	manœuvre des courants	
		de service	de défaut
Sectionneur 	isole		
Sectionneur de terre 	isole		(pouvoir de fermeture sur c/c)
Interrupteur 	manœuvre n'isole pas	✓	
Interrupteur sectionneur 	manœuvre isole	✓	
Disjoncteur fixe 	manœuvre protégé n'isole pas	✓	✓
Disjoncteur débrochable 	manœuvre protège	✓	✓
Contacteur fixe 	manœuvre n'isole pas	✓	
Contacteur débrochable 	manœuvre isole si débroché	✓	
Fusible 	protégé n'isole pas		✓ (1 fois)

✓ = OUI

Différents types d'enveloppes

Caractéristiques	Blindé	Compartmenté	Bloc
Cellules			
Parois externes	métalliques et toujours mises à la terre		
Nombre de compartiments MT	≥ 3	3	≤ 2
Parois internes	métalliques et toujours mises à la terre	indifférentes métalliques ou non	indifférentes métalliques ou non
Présence de cloches d'embrochage	✓	possible	
Volets empêchant l'accès aux compartiments sous tension	✓		
Souplesse d'intervention en cas de présence tension	✓	✓	
Déplacement de l'arc à l'intérieur de la cellule	difficile, mais toujours possible	✓	✓

✓ = OUI

Introduction

Exemple 1 :
25 kA sous tension de service de 11 kV

$S_{cc} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{cc}$

■ La puissance de court-circuit dépend directement de la configuration du réseau et de l'impédance de ses composants : lignes, câbles, transformateurs, moteurs... parcourus par le courant de court-circuit.

■ Elle est la puissance maximum que peut fournir un réseau sur une installation en défaut, exprimée en MVA ou en kA efficace pour une tension de service donnée.

U : tension de service (kV)
I_{cc} : courant de court circuit (kA efficace) Cf : pages suivantes
La puissance de court-circuit est assimilable à une puissance apparente.

■ Le client nous impose généralement la valeur de la puissance de court-circuit car nous disposons rarement des éléments de calcul. La détermination de la puissance de court-circuit nécessite une analyse des flux de puissances alimentant le court-circuit dans le cas le plus défavorable.

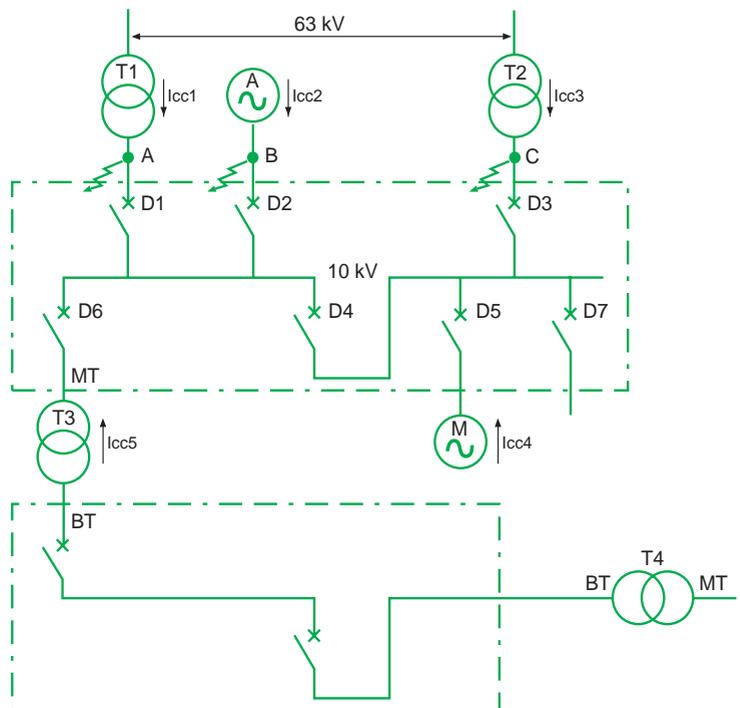
Les sources possibles sont :

- Arrivée réseau par l'intermédiaire du ou des transformateurs de puissances.
- Arrivée alternateur.
- Retour de puissance dû aux machines tournantes (moteurs...) ; ou par l'intermédiaire des transformateurs MT/BT.

Exemple 2 :

- Le retour par la BT I_{cc5} n'est possible que si le transfo. (T4) est alimenté par une autre source.
- Trois sources débitent dans le tableau (T1-A-T2)

- **disjoncteur D1** (c/c en A)
I_{cc1} + I_{cc2} + I_{cc3} + I_{cc4} + I_{cc5}
- **disjoncteur D2** (c/c en B)
I_{cc1} + I_{cc2} + I_{cc3} + I_{cc4} + I_{cc5}
- **disjoncteur D3** (c/c en C)
I_{cc1} + I_{cc2} + I_{cc3} + I_{cc4} + I_{cc5}



Nous devons calculer chacun des courants I_{cc}.

Toute installation électrique doit être protégée contre les courts-circuits, et ceci sauf exception, chaque fois qu'il y a une discontinuité électrique ; ce qui correspond le plus généralement à un changement de section des conducteurs.

L'intensité du courant de court-circuit doit être calculée à chaque étage de l'installation pour les différentes configurations possibles du réseau ; ceci pour pouvoir déterminer les caractéristiques du matériel qui doit supporter ou qui doit couper ce courant de défaut.

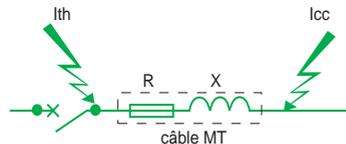
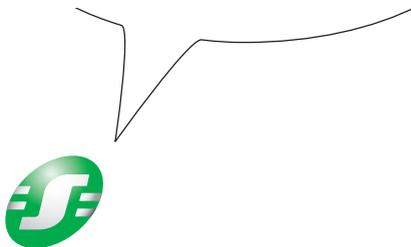


figure 1

■ Pour choisir convenablement les appareils de coupure (disjoncteurs ou fusibles) et régler les fonctions de protection, trois valeurs du courant de court-circuit doivent être connues :

□ **courant de court-circuit minimal :**

$$I_{cc} = (\text{kA eff}) \quad (\text{exemple : } 25 \text{ kA eff})$$

Il correspond à un court-circuit à l'extrémité de la liaison protégée (défaut à l'extrémité d'un feeder (voir fig.1) et non pas juste derrière l'organe de coupure). Sa valeur permet de choisir le réglage des seuils des protections à maximum de courant et les fusibles ; en particulier quand la longueur des câbles est importante et/ou quand la source est relativement impédante (générateur, onduleurs).

□ **valeur efficace du courant de court-circuit maximal :**

$$I_{th} = (\text{kA eff. 1 s ou 3 s}) \quad (\text{exemple : } 25 \text{ kA eff. 1 s})$$

Il correspond à un court-circuit à proximité immédiate des bornes aval de l'appareil de coupure (voir fig.1). Il est défini en kA pour 1 ou 3 seconde(s) et sert à définir la tenue thermique que doivent supporter les matériels.

□ **valeur crête du courant de court-circuit maximal :**

(valeur de la première crête de la période transitoire)

$$I_{dyn} = (\text{kA crête})$$

$$\begin{aligned} (\text{exemple : } 2,5 \cdot 25 \text{ kA} &= 63,75 \text{ kA crête CEI 60 056 ou} \\ 2,7 \cdot 25 \text{ kA} &= 67,5 \text{ kA crête ANSI}) \end{aligned}$$

- I_{dyn} est égale à :

- 2,5 • I_{cc} en 50 Hz (CEI) ou,
- 2,6 • I_{cc} en 60 Hz (CEI) ou,
- 2,7 • I_{cc} (ANSI) (**I_{cc} : courant de court-circuit calculé en un point donné d'un réseau**)

Elle détermine le pouvoir de coupure et de fermeture des disjoncteurs et interrupteurs, et la tenue électrodynamique des jeux de barres et de l'appareillage.

- La CEI retient les valeurs suivantes :

8 - 12,5 - 16 - 20 - 25 - 31,5 - 40 kA efficaces.

Celles-ci sont généralement utilisées dans les spécifications.

Nota :

■ Il peut arriver qu'un cahier des charges donne une valeur en kA eff et une valeur en MVA comme ci-dessous :

$I_{cc} = 19 \text{ kA eff ou } 350 \text{ MVA sous } 10 \text{ kV}$

□ si nous calculons le courant équivalent à 350 MVA nous trouvons :

$$I_{cc} = \frac{350}{\sqrt{3} \cdot 10} = 20,2 \text{ kA eff}$$

L'écart vient de la manière dont on a arrondi la valeur et des habitudes locales.

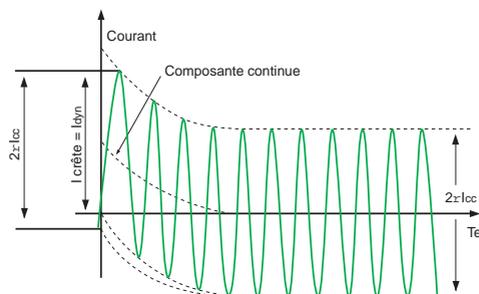
La valeur 19 kA eff est probablement la plus réaliste.

□ une autre explication est possible : en moyenne et haute tension, la CEI 909 applique un coefficient de 1,1 pour le calcul du I_{cc} maximal.

$$I_{cc} = 1,1 \cdot \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{cc}} = \frac{E}{Z_{cc}}$$

(Cf : exemple 1 p 11 Introduction).

Ce coefficient 1,1 prend en compte une chute de tension de 10 % sur l'installation en défaut (câbles...).



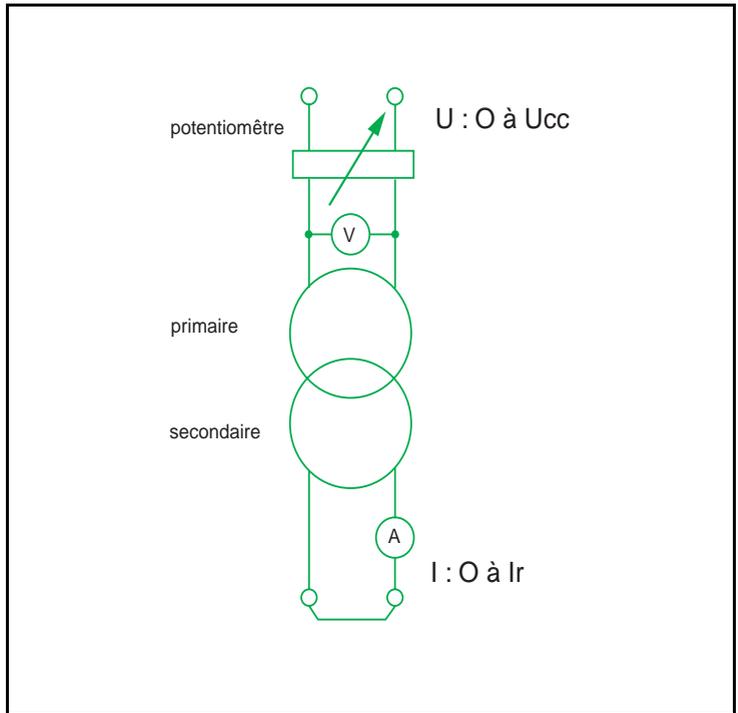


Transformateur

Pour déterminer l'intensité de court-circuit aux bornes d'un transformateur, nous avons besoin de connaître la tension de court-circuit ($U_{cc} \%$).

■ $U_{cc} \%$ est défini de la manière suivante :

Le courant de court-circuit est fonction du type de matériel installé sur le réseau (transformateurs, alternateurs, moteurs, lignes...).



- 1 le transformateur de tension est non alimenté : $U = 0$
- 2 **mettre** le secondaire en court-circuit
- 3 **monter** progressivement la tension U au primaire jusqu'à avoir l'intensité nominale assignée I_r au secondaire du transformateur.

La valeur U relevée au primaire est alors égale à U_{cc}

■ Le courant de court-circuit, exprimé en kA, est donné par la relation suivante :

$$I_{cc} = \frac{I_r}{U_{cc}}$$

Exemple :

- Transformateur 20 MVA
- Tension 10 kV
- $U_{cc} = 10 \%$
- Puissance de la source amont : infinie

$$I_r = \frac{S_r}{\sqrt{3} U_{vide}} = \frac{20\,000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 1\,150\,A$$

$$I_{cc} = \frac{I_r}{U_{cc}} = \frac{1\,150}{10 \div 100} = 11\,500\,A = 11,5\,kA$$



Générateurs synchrones (alternateurs et moteurs)

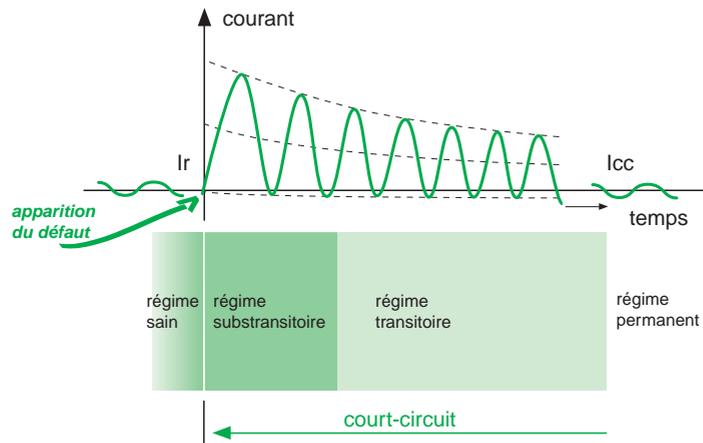
Le calcul de l'intensité de court-circuit aux bornes d'un générateur synchrone est très complexe car l'impédance interne de celui-ci varie en fonction du temps.

- Quand la puissance croît progressivement, le courant diminue en passant par trois périodes caractéristiques :
 - **subtransitoire** (permet de déterminer le pouvoir de fermeture des disjoncteurs et les contraintes électrodynamiques), durée moyenne 10 ms
 - **transitoire** (fixe les contraintes thermiques du matériel), durée moyenne 250 ms
 - **permanent** (c'est la valeur du courant de court-circuit en régime établi).
- L'intensité de court-circuit se calcule comme pour les transformateurs mais il faut tenir compte des différents régimes.

Exemple :

- Mode de calcul pour un alternateur ou un moteur synchrone
- Alternateur 15 MVA
- Tension $U = 10 \text{ kV}$
- $X'd = 20 \%$

$$I_r = \frac{S_r}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{15}{\sqrt{3} \cdot 10\,000} = 870 \text{ A}$$

$$I_{cc} = \frac{I_r}{X_{cc \text{ trans}}} = \frac{870}{20/100} = 4350 \text{ A} = 4,35 \text{ kA}$$


- Le courant de court-circuit est donné par la relation suivante :

$$I_{cc} = \frac{I_r}{X_{cc}}$$

X_{cc} : réactance de c/c

- Les valeurs les plus courantes pour un générateur synchrone sont :

Régime	Subtransitoire $X''d$	Transitoire $X'd$	Permanent X_d
X_{cc}	10 - 20 %	15 - 25 %	200 - 350 %



Moteur asynchrone

- Pour les moteurs asynchrones

- le courant de court-circuit aux bornes est égal au courant de démarrage

$$I_{cc} \approx 5 \text{ à } 8 I_r$$

- la contribution des moteurs (retour de courant) au courant de court-circuit est égale à :

$$I \approx 3 \sum I_r$$

Le coefficient 3, tient compte des moteurs arrêtés et de l'impédance pour aller jusqu'au défaut.

Aide-mémoire pour le calcul des intensités de court-circuit triphasé



■ Court-circuit triphasé

$$S_{cc} = 1,1 \cdot U \cdot I_{cc} = \sqrt{3} \frac{U^2}{Z_{cc}}$$

$$I_{cc} = \frac{1,1 \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z_{cc}} \quad \text{avec} \quad Z_{cc} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

■ Réseau amont

$$Z = \frac{U^2}{S_{cc}}$$

$$\frac{R}{X} = \begin{cases} 0,3 \text{ en } 6 \text{ kV} \\ 0,2 \text{ en } 20 \text{ kV} \\ 0,1 \text{ en } 150 \text{ kV} \end{cases}$$

■ Lignes aériennes

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

X = 0,4 Ω/km	HT
X = 0,3 Ω/km	MT/BT
ρ = 1,8 · 10 ⁻⁶ Ω cm	cuivre
ρ = 2,8 · 10 ⁻⁶ Ω cm	aluminium
ρ = 3,3 · 10 ⁻⁶ Ω cm	almélec

■ Générateurs synchrones

$$Z(\Omega) = X(\Omega) = \frac{U^2}{S_r} \cdot \frac{X_{cc}(\%)}{100}$$

X _{cc}	subtransitoire	transitoire	permanent
turbo	10 à 20 %	15 à 25 %	200 à 350 %
pôles saillants	15 à 25 %	25 à 35 %	70 à 120 %

■ Transformateurs

(ordre de grandeur : pour les valeurs réelles, se reporter à celles données par le constructeur)

Exemples : ○○ 20 kV/410 V ; S_r = 630 kVA ; U_{cc} = 4%
 ○○ 63 kV/11 V ; S_r = 10 MVA ; U_{cc} = 9%

$$Z(\Omega) = \frac{U^2}{S_r} \cdot \frac{U_{cc}(\%)}{100}$$

S _r (kVA)	100 à 3150	5000 à 25000
U _{cc} (%)	4 à 7,5	8 à 12
○○	MT/BT	HT/MT

■ Câbles

X = 0,10 à 0,15 Ω/km
 triphasés ou unipolaires

■ Jeux de barres

X = 0,15 Ω/km



■ Moteurs et compensateurs synchrones

X_{cc}	subtransitoire	transitoire	permanent
moteurs G vitesse	15 %	25 %	80 %
moteurs P vitesse	35 %	50 %	100 %
compensateurs	25 %	40 %	160 %

■ Moteurs asynchrones subtransitoire seulement

$$Z(\Omega) = \frac{I_r}{I_d} \frac{U}{S_r}$$

$$I_{cc} \approx 5 \text{ à } 8 I_r$$

$$I \approx 3 \Sigma I_r$$

apport à I_{cc} par retour de courant (avec I assigné = I_r)

■ Arcs en défaut

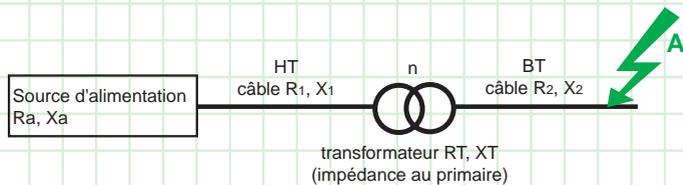
$$I_d = \frac{I_{cc}}{1,3 \text{ à } 2}$$

■ Impédance équivalente d'un élément à travers un transformateur

□ par exemple, pour un défaut en basse tension, la contribution d'un câble HT en amont du transformateur HT/BT sera :

$$R_2 = R_1 \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \quad \text{et} \quad X_2 = X_1 \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \quad \text{ainsi} \quad Z_2 = Z_1 \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2$$

Cette formule est valable quel que soit le niveau de tension du câble, c'est à dire même à travers plusieurs transformateurs en série.



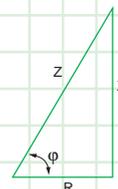
□ impédance vue depuis le point de défaut A :

$$\Sigma R = R_2 + \frac{R_T}{n^2} + \frac{R_1}{n^2} + \frac{R_a}{n^2} \quad \Sigma X = X_2 + \frac{X_T}{n^2} + \frac{X_1}{n^2} + \frac{X_a}{n^2}$$

n : rapport de transformation

■ Triangle des impédances

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$



La complexité du calcul de courant de court-circuit triphasé réside essentiellement dans la détermination de la valeur de l'impédance du réseau en amont du point de défaut



Exemple de calcul en triphasé

Méthode des impédances

Tout constituant d'un réseau (réseau d'alimentation, transformateur, alternateur, moteurs, câbles, barres...) se caractérise par une impédance (Z) composée d'un élément résistant (R) et d'un élément inductif (X) appelé réactance. X, R et Z s'expriment en ohm.

■ La relation entre ces différentes valeurs est donnée par :

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

(cf. exemple 1 ci-contre)

■ La méthode consiste à :

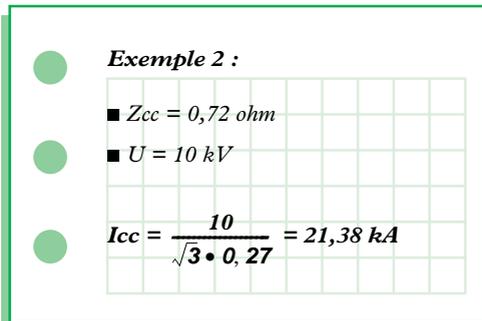
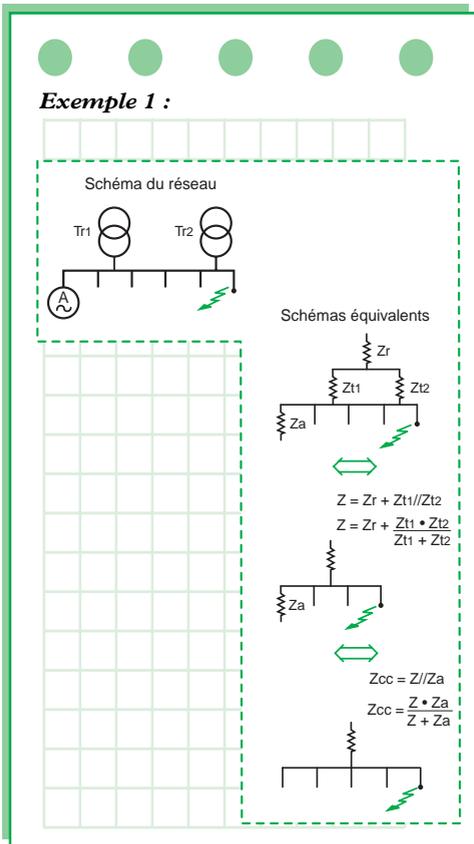
- décomposer le réseau en tronçons
- calculer pour chaque constituant les valeurs R et X
- calculer pour le réseau :
 - la valeur de R ou de X équivalente
 - la valeur de l'impédance équivalente
 - le courant de court-circuit.

■ Le courant de court-circuit triphasé est :

$$I_{cc} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{cc}}$$

I_{cc}	:	courant de court-circuit (en kA)
U	:	tension entre phases au point considéré avant l'apparition du défaut, en kV.
Z_{cc}	:	impédance de court-circuit (en ohm)

(cf. exemple 2 ci-contre)



Voilà un problème à résoudre !



Données de l'exercice proposé

Alimentation en 63 kV

Puissance de court-circuit de la source : 2 000 MVA

■ **Configuration du réseau :**

Deux transformateurs en parallèle et un alternateur.

■ **Caractéristiques des matériels :**

□ transformateurs :

- tension 63 kV / 10 kV

- puissance apparente : 1 de 15 MVA, 1 de 20 MVA

- tension de court-circuit : $U_{cc} = 10 \%$

□ Alternateur :

- tension : 10 kV

- puissance apparente : 15 MVA

- $X'd$ transitoire : 20 %

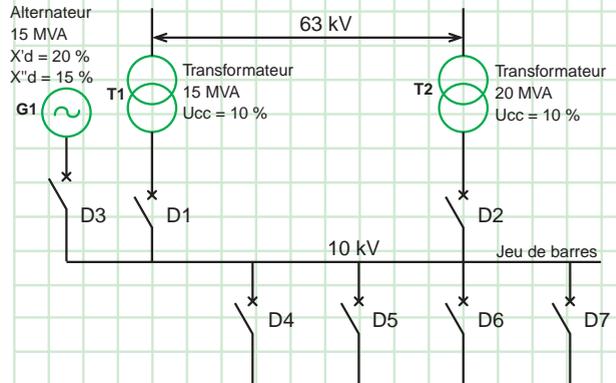
- $X''d$ subtransitoire : 15 %

■ **Question :**

□ déterminer la valeur du courant de court-circuit au niveau du jeu de barres,

□ les pouvoirs de coupure et de fermeture des disjoncteurs D1 à D7.

Schéma unifilaire



Voici la résolution du problème avec la méthode !



Résolution de l'exercice

■ **Détermination des différents courants de court-circuit**

Les trois sources qui peuvent alimenter le court-circuit sont les deux transformateurs et l'alternateur.

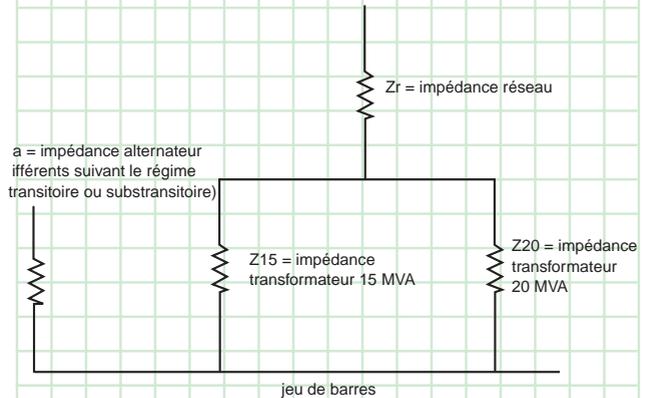
Nous supposons qu'il ne peut pas y avoir de retour de puissance par D4, D5, D6 et D7.

En cas de court-circuit en amont d'un disjoncteur (D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7), celui-ci est traversé par le courant de court-circuit fourni par les T1, T2 et G1.

■ **Schéma équivalent**

Chaque élément est composé d'une résistance et d'une inductance. Il faut calculer ces valeurs pour chaque élément.

Le réseau peut-être représenté comme suit :



L'expérience montre que la résistance est généralement faible devant la réactance, on peut donc en déduire que la réactance est égale à l'impédance ($X = Z$).

■ Pour déterminer la puissance de court-circuit, il faut calculer les différentes valeurs des résistances et des inductances, puis faire la somme arithmétique séparément :

$$R_t = R$$

$$X_t = X$$

■ Connaissant R_t et X_t , on déduit la valeur Z_t en appliquant la formule :

$$\sqrt{Z} = (\sum R^2 + \sum X^2)$$

Nota : R étant négligeable devant X , on peut dire que $Z = X$.

Et maintenant les résultats !



Constituant	Calcul	Z = X (ohm)
Réseau S _{cc} = 2 000 MVA U service = 10 kV	$Z_r = \frac{U^2}{S_{cc}} = \frac{10^2}{2000}$	0,05
Transformateur 15 MVA (U _{cc} = 10 %) U service = 10 kV	$Z_{15} = \frac{U^2}{S_r} \cdot U_{cc} = \frac{10^2}{15} \cdot \frac{10}{100}$	0,67
Transformateur 20 MVA (U _{cc} = 10 %) U service = 10 kV	$Z_{20} = \frac{U^2}{S_r} \cdot U_{cc} = \frac{10^2}{20} \cdot \frac{10}{100}$	0,5
Alternateur de 15 MVA U service = 10 kV	$Z_a = \frac{U^2}{S_r} \cdot X_{cc}$	
Régime transitoire (X _{cc} = 20 %)	$Z_{at} = \frac{10^2}{15} \cdot \frac{20}{100}$	Z _{at} = 1,33
Régime subtransitoire (X _{cc} = 15 %)	$Z_{as} = \frac{10^2}{15} \cdot \frac{15}{100}$	Z _{as} = 1
Jeu de barres Mises en parallèle des transformateurs	$Z_{15} // Z_{20} = \frac{Z_{15} \cdot Z_{20}}{Z_{15} + Z_{20}} = \frac{0,67 \cdot 0,5}{0,67 + 0,5}$	Z _{et} = 0,29 Z _{er} = 0,34
Mise en série avec le réseau et l'impédance des transformateurs	$Z_r + Z_{et} = 0,05 + 0,29$	
Mise en parallèle du groupe Régime transitoire	$Z_{er} // Z_{at} = \frac{Z_{er} \cdot Z_{at}}{Z_{er} + Z_{at}} = \frac{0,34 \cdot 1,33}{0,34 + 1,33}$	≈ 0,27
Régime subtransitoire	$Z_{er} // Z_{at} = \frac{Z_{er} \cdot Z_{at}}{Z_{er} + Z_{at}} = \frac{0,34 \cdot 1}{0,34 + 1}$	≈ 0,25

Disjoncteur	Circuit équivalent Z (ohm)	Pouvoir de coupure en kA eff. $I_{cc} = \frac{U^2}{\sqrt{3} \cdot Z_{cc}} = \frac{10}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{Z_{cc}}$	Pouvoir de fermeture 2,5 I _{cc} (en kA crête)
D4 à D7	<p>régime transitoire Z = 0,27 régime susbransitoire Z = 0,25 $Z_t = [Z_r + (Z_{15} // Z_{20})] // Z_a$</p>	21,40	21,40 • 2,5 = 53,15
D3 alternateur	<p>Z = 0,34 $Z_t = Z_r + (Z_{15} // Z_{20})$</p>	17	17 • 2,5 = 42,5
D1 transformateur 15 MVA	<p>régime transitoire Z = 0,39 régime susbransitoire Z = 0,35 $Z_t = (Z_r + Z_{20}) // Z_a$</p>	17,9	14,9 • 2,5 = 37,25
D2 transformateur 20 MVA	<p>régime transitoire Z = 0,47 régime susbransitoire Z = 0,42 $Z_t = (Z_r + Z_{15}) // Z_a$</p>	12,4	12,4 • 2,5 = 31

Nota : un disjoncteur est défini pour un pouvoir de coupure d'une valeur efficace en régime stabilisé, et un pourcentage de composante apériodique qui dépend du temps d'ouverture du disjoncteur et du $\frac{R}{X}$ du réseau (env. 30 %).

Pour les alternateurs la composante apériodique est très élevée ; il faut faire valider les calculs par des essais en laboratoire.

Introduction

■ On détermine les dimensions du jeu de barres en tenant compte des **conditions normales** d'exploitation.

La tension (kV) à laquelle est portée l'installation fixe la distance entre phases et entre phases-masse et détermine la hauteur et la forme des supports.

L'intensité assignée du courant traversant le jeu de barres nous sert à déterminer la section et la nature des conducteurs.

■ On s'assure ensuite que les supports (isolateurs) résistent aux **effets mécaniques** et que les barres résistent aux **effets mécaniques et thermiques** dus aux courants de court-circuit.

Il faut aussi vérifier que la période de vibration propre des barres n'entre pas en **résonance** avec la période du courant.

■ Pour calculer un jeu de barres, il faut partir d'hypothèses de caractéristiques électriques et physiques suivantes :

Caractéristiques électriques du jeu de barres

Scc : puissance de court-circuit du réseau* **MVA**

Ur : tension assignée **kV**

U : tension de service **kV**

Ir : courant assigné **A**

* **Nota** : Elle est généralement fournie par le client sous cette forme ou on peut la calculer en ayant le courant de court-circuit I_{cc} et la tension de service U : ($S_{cc} = \sqrt{3} \cdot I_{cc} \cdot U$; voir chapitre sur les "Courants de court-circuit").

Caractéristiques physiques du jeu de barres

S : section d'une barre **cm²**

d : distance entre phases **cm**

l : distance entre isolateurs d'une même phase **cm**

θ_n : température ambiante ($\theta_n \leq 40^\circ\text{C}$) **°C**

$(\theta - \theta_n)$: échauffement admissible* **°C**

profil : plat cuivre aluminium

matière : aluminium

disposition : à plat sur chant

nbre de barre(s) par phase :

* **Nota** : voir tableau V de la norme CEI 60 694 des 2 pages suivantes.

En résumé :

barre(s) de • cm par phase

Calculer un jeu de barres consiste en réalité à vérifier qu'il offre des tenues thermiques, électrodynamiques et de non-résonance suffisantes.





Echauffement

Extrait du tableau V de la norme CEI 60 694

Nature de l'organe, du matériau et du diélectrique (Cf : 1, 2 et 3)	Température θ (°C)	($\theta - \theta_n$) avec $\theta_n = 40$ °C
Raccords par boulons ou dispositifs équivalents (Cf : 7)		
cuivre nu, alliage de cuivre nu ou alliage d'aluminium dans		
l'air	90	50
le SF6 *	105	65
l'huile	100	60
argentés ou nickelés dans		
l'air	115	75
le SF6	115	75
l'huile	100	60
étamés dans		
l'air	105	65
le SF6	105	65
l'huile	100	60

* SF6 (hexafluorure de soufre)

- 1 Suivant sa fonction, le même organe peut appartenir à plusieurs des catégories énumérées au tableau V. Dans ce cas, les valeurs admissibles de la température et de l'échauffement à prendre en considération sont les plus faibles dans les catégories concernées.
- 2 Pour les appareils de connexion dans le vide, les valeurs limites de température et d'échauffement ne s'appliquent pas aux organes dans le vide. Les autres organes ne doivent pas dépasser les valeurs de température et d'échauffement indiquées au tableau V.
- 3 Toutes les précautions nécessaires doivent être prises pour qu'aucun dommage ne soit causé aux matériaux environnants.
- 7 Lorsque des éléments de contacts sont protégés de manières différentes, les températures et échauffements admissibles sont ceux de l'élément pour lequel le tableau V autorise les valeurs les plus élevées.



Echauffement

Extrait du tableau V de la norme CEI 60 694

Nature de l'organe, du matériau et du diélectrique (Cf : 1, 2 et 3)	température θ (°C)	($\theta - \theta_n$) avec $\theta_n = 40$ °C
Contacts (Cf : 4)		
cuivre ou alliage de cuivre nu dans		
l'air	75	35
le SF6 *	90	50
l'huile	80	40
argentés ou nickelés (Cf : 5) dans		
l'air	105	65
le SF6	105	65
l'huile	90	50
étamés (Cf : 5 et 6) dans		
l'air	90	50
le SF6	90	50
l'huile	90	50

* SF6 (hexafluorure de soufre)

- 1 Suivant sa fonction, le même organe peut appartenir à plusieurs des catégories énumérées au tableau V. Dans ce cas, les valeurs admissibles de la température et de l'échauffement à prendre en considération sont les plus faibles dans les catégories concernées.
- 2 Pour les appareils de connexion dans le vide, les valeurs limites de température et d'échauffement ne s'appliquent pas aux organes dans le vide. Les autres organes ne doivent pas dépasser les valeurs de température et d'échauffement indiquées au tableau V.
- 3 Toutes les précautions nécessaires doivent être prises pour qu'aucun dommage ne soit causé aux matériaux environnants.
- 4 Lorsque des éléments de contacts sont protégés de manières différentes, les températures et échauffements admissibles sont ceux de l'élément pour lequel le tableau V autorise les valeurs les plus basses.
- 5 La qualité du revêtement doit être telle qu'une couche de protection subsiste dans la zone de contact :
 - après l'essai d'établissement et de coupure (s'ils existent),
 - après l'essai au courant de courte durée admissible,
 - après l'essai d'endurance mécanique,
 selon les spécifications propres à chaque matériel. Dans le cas contraire, les contacts doivent être considérés comme "nus".
- 6 Pour les contacts des fusibles, l'échauffement doit être conforme aux publications concernant les fusibles haute tension.

Calcul des jeux de barres

Vérifions que la section choisie :
... barre(s) de ... x ... cm par phase
 satisfasse aux échauffements produits par le passage du courant assigné et au passage du courant de court-circuit pendant 1 à 3 seconde(s).



La tenue thermique...

Au passage du courant assigné (I_r)

La formule de MELSON & BOTH publiée dans le revue "Copper Development Association" permet de définir l'intensité admissible dans un conducteur :

$$I = K \cdot \frac{24,9(\theta - \theta_n)^{0,61} \cdot S^{0,5} \cdot p^{0,39}}{\sqrt{p_{20}[1 + \alpha(\theta - 20)]}}$$

avec :

I	:	intensité admissible exprimée en ampères (A) le déclassement en intensité est à prévoir : - pour une température ambiante supérieure à 40°C - pour un indice de protection supérieur à IP5
θ_n	:	température ambiante (θ _n ≤ 40°C) <input type="text"/> °C
(θ - θ_n)	:	échauffement admissible * <input type="text"/> °C
S	:	section d'une barre <input type="text"/> cm ²
p	:	périmètre d'une barre <input type="text"/> cm <i>(schéma ci-contre)</i>
ρ₂₀	:	résistivité du conducteur à 20°C
	:	cuivre : 1,83 μΩ cm
	:	aluminium : 2,90 μΩ cm
α	:	coefficient de température de la résistivité : 0,004
K	:	coefficient de conditions produit de 6 coefficients (k ₁ , k ₂ , k ₃ , k ₄ , k ₅ , k ₆), décrits ci-après

* (voir tableau V de la norme CEI 60 694 pages précédentes)



périmètre d'une barre

Définition des coefficients k₁, 2, 3, 4, 5, 6 :

■ Le coefficient k₁ est fonction du nombre de barres méplates par phase pour :

- 1 barre (k₁ = 1)
- 2 ou 3 barres, voir le tableau ci-dessous :

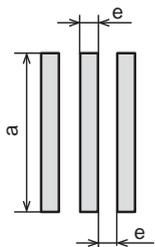
nb de barres par phase	e/a								
	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
2	1,63	1,73	1,76	1,80	1,83	1,85	1,87	1,89	1,91
3	2,40	2,45	2,50	2,55	2,60	2,63	2,65	2,68	2,70

Dans notre cas :

e/a =

le nombre de barres par phase =

d'où k₁ =



■ **Le coefficient k2** est fonction de l'état de surface des barres :

- nues : k2 = 1
- peintes : k2 = 1,15

■ **Le coefficient k3** est fonction de la position des barres :

- barres sur chant : k3 = 1
- 1 barre à plat : k3 = 0,95
- plusieurs barres à plat : k3 = 0,75

■ **Le coefficient k4** est fonction de l'endroit où sont installées les barres :

- atmosphère calme à l'intérieur : k4 = 1
- atmosphère calme à l'extérieur : k4 = 1,2
- barres dans une gaine non ventilée : k4 = 0,80

■ **Le coefficient k5** est fonction de la ventilation artificielle :

- sans ventilation artificielle : k5 = 1
- le cas avec ventilation devra être traité au cas par cas et ensuite validé par des essais.

■ **Le coefficient k6** est fonction de la nature du courant :

- pour un courant alternatif de fréquence ≤ 60 Hz, k6 est fonction du nombre de barres n par phase et de leur écartement.

Valeur de k6 pour un écartement égal à l'épaisseur des barres :

n	1	2	3
k6	1	1	0,98

Dans notre cas :

n = d'où k6 =

En définitive, nous avons :

$k = \text{[]} \cdot \text{[]} = \text{[]}$

$I = \text{[]} \cdot \frac{24,9 (\text{[]} - \text{[]})^{0,61} \cdot \text{[]}^{0,5} \cdot \text{[]}^{0,39}}{\sqrt{\text{[]} [1 + 0,004 (\text{[]} - 20)]}}$

$I = K \cdot \frac{24,9 (\theta - \theta_n)^{0,61} \cdot S^{0,5} \cdot p^{0,39}}{\sqrt{\rho_{20} [1 + \alpha (\theta - 20)]}}$

I = A



La solution choisie
de • cm par phase

Convient si I_r du jeu de barres désiré $\leq I$

Au passage du courant de court-circuit de courte durée (I_{th})

- On admet que, pendant toute la durée (1 ou 3 secondes) :
 - toute la chaleur dégagée sert à élever la température du conducteur
 - les effets du rayonnement sont négligeables.

La formule ci-dessous peut-être utilisée pour calculer l'échauffement dû au court-circuit :

$$\Delta\theta_{cc} = \frac{0,24 \cdot \rho_{20} \cdot I_{th}^2 \cdot t_k}{(n \cdot S)^2 \cdot c \cdot \delta}$$

avec

$\Delta\theta_{cc}$: échauffement dû au court-circuit	
c	: chaleur spécifique du métal	
	cuivre :	0,091 kcal/daN°C
	aluminium :	0,23 kcal/daN °C
S	: section d'une barre	<input type="text"/> cm ²
n	: nombre de barre(s) par phase	<input type="text"/>
I_{th}	: est le courant de court-circuit de courte durée : (valeur efficace du courant de C/CT maximal)	<input type="text"/> A eff
t_k	: durée du court-circuit de courte durée (1 à 3 s)	<input type="text"/> en s
δ	: masse volumique du métal	
	cuivre :	8,9 g/cm ³
	aluminium :	2,7 g/cm ³
ρ_{20}	: résistivité du conducteur à 20°C	
	cuivre :	1,83 $\mu\Omega$ cm
	aluminium :	2,90 $\mu\Omega$ cm
($\theta - \theta_n$)	: échauffement admissible	<input type="text"/> °C



Exemple :

Comment trouver la valeur de I_{th} pour une durée différente ?

Sachant que : $(I_{th})^2 \cdot t = \text{constante}$

■ Si $I_{th_2} = 26,16 \text{ kA eff. } 2 \text{ s}$,
à quoi correspond I_{th_1} pour $t = 1 \text{ s}$?

$$(I_{th})^2 \cdot t = \text{constante}$$

$$(26,16 \cdot 10^3)^2 \cdot 2 = 137 \cdot 10^7$$

$$\text{donc } I_{th_1} = \sqrt{\frac{\text{constante}}{t}} = \sqrt{\frac{137 \cdot 10^7}{1}}$$

$$I_{th_1} = 37 \text{ kA ff pour } 1 \text{ s}$$

■ En résumé :

- à 26,16 kA eff. 2 s,
il correspond 37 kA eff. 1 s
- à 37 kA eff. 1 s,
il correspond 26,16 kA eff. 2 s

$$\Delta\theta_{cc} = \frac{0,24 \cdot \text{[]} \cdot 10^{-6} \cdot (\text{[]})^2 \cdot \text{[]}}{(\text{[]})^2 \cdot \text{[]} \cdot \text{[]}}$$

$$\Delta\theta_{cc} = \text{[]} \text{ °C}$$

La température du θ_t conducteur après le court-circuit sera :

$$\theta_t = \theta_n + (\theta - \theta_n) + \Delta\theta_{cc}$$

$$\theta_t = \text{[]} \text{ °C}$$

vérifiez :

$\theta_t \leq$ température maximale supportable par les pièces en contact avec le jeu de barres.

Vérifier que cette température θ_t est compatible avec la température maximale des pièces en contact avec le jeu de barres (isolant en particulier).



Vérifions si les barres choisies résistent aux efforts électrodynamiques.



La tenue électrodynamique

Efforts entre conducteurs en parallèle

Les efforts électrodynamiques consécutifs au courant de court-circuit sont donnés par la formule :

$$F_1 = 2 \frac{l}{d} \cdot I_{dyn}^2 \cdot 10^{-8}$$

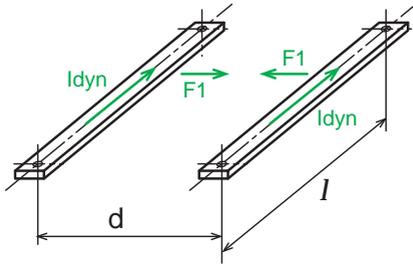
avec

- F₁** : effort exprimé en daN
- I_{dyn}** : est la valeur crête du courant de court-circuit exprimé en A, à calculer avec la formule ci-dessous

$$I_{dyn} = k \cdot \frac{S_{cc}}{U \sqrt{3}} = k \cdot I_{th}$$

- S_{cc}** : puissance de court-circuit kVA
- I_{th}** : courant de court-circuit de courte durée A eff
- U** : tension de service kV
- l** : distance entre isolateurs d'une même phase cm
- d** : distance entre phases cm
- k** : 2,5 pour 50 Hz ; 2,6 pour 60 Hz selon CEI et 2,7 selon ANSI

D'où : I_{dyn} = A et F₁ = daN



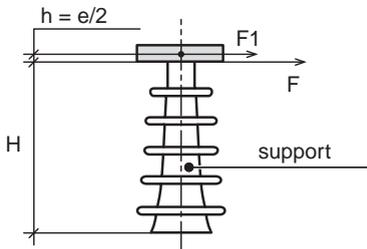
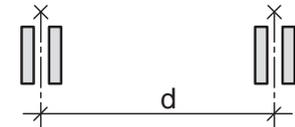
Effort en tête des supports ou traversées

Formule de calcul d'effort sur un support :

$$F = F_1 \cdot \frac{H + h}{H}$$

avec

- F** : effort exprimée daN
- H** : hauteur de l'isolateur cm
- h** : distance de la tête de l'isolateur au centre de gravité du jeu de barres cm



Calcul d'un effort si N supports

■ L'effort F encaissé par chaque support est au maximum égal à l'effort calculé F₁ (voir chapitre précédent) multiplié par un coefficient **k_n** qui varie suivant le nombre total **N** de supports équidistants installés.

□ nombre de supports = N

□ nous connaissons N, définissons **k_n** à l'aide du tableau ci-dessous :

d'où F = (F₁) • (k_n) = daN

N	2	3	4	≥5
k_n	0,5	1,25	1,10	1,14



■ L'effort trouvé après application du coefficient **k** est à comparer à la tenue mécanique du support à laquelle on appliquera un coefficient de sécurité :

□ les supports employés ont une résistance à la flexion

F' = daN

□ nous avons un coefficient de sécurité de

$\frac{F'}{F} =$

vérifier F' > F

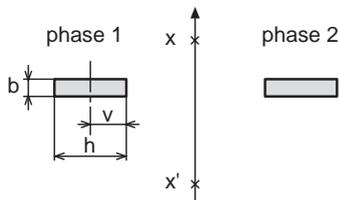
Tenue mécanique des barres

■ En faisant l'hypothèse admissible que les extrémités des barres sont encastrées, elles sont soumises à un moment fléchissant dont la contrainte résultante est :

$$\eta = \frac{F_1 \cdot l}{12} \cdot \frac{v}{I}$$

avec

η	:	est la contrainte résultante , elle doit être inférieure à la contrainte admissible par les barres soit :	
		cuivre 1/4 dur : 1 200 daN/cm ²	
		cuivre 1/2 dur : 2 300 daN/cm ²	
		cuivre 4/4 dur : 3 000 daN/cm ²	
		alu étamé : 1 200 daN/cm ²	
F_1	:	effort entre conducteurs	<input type="text"/> daN
l	:	distance entre isolateurs d'une même phase	<input type="text"/> cm
I/v	:	est le module d'inertie d'une barre ou d'un ensemble de barres <i>(choisir la valeur sur le tableau de la page suivante)</i>	<input type="text"/> cm ³
v	:	distance entre la fibre neutre et la fibre la plus contrainte (la plus éloignée)	



■ Une barre par phase :

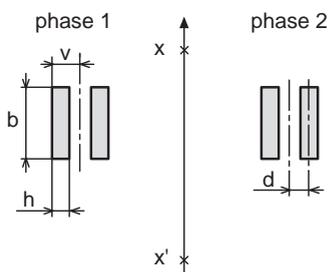
$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$\frac{I}{v} = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

■ Deux barres par phase :

$$= 2 \left(\frac{b \cdot h^3}{12} + S \cdot d^2 \right)$$

$$I = \frac{2 \left(\frac{b \cdot h^3}{12} + S \cdot d^2 \right)}{1,5 \cdot h}$$



S : section de la barre (en cm²)

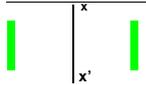
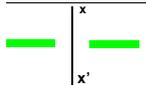
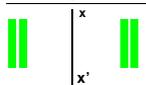
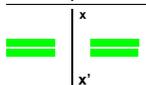
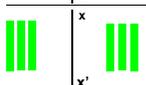
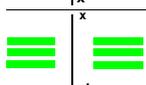
xx' : perpendiculaire au plan de vibration



Vérifiez :

η < η Barres Cu ou Al (en daN/cm²)

Choisissez votre section **S**, masse linéique **m**, module d'inertie **I/v**, moment inertie **I** pour les barres définies ci-dessous :

		Dimensions des barres (mm)									
			100 x 10	80 x 10	80 x 6	80 x 5	80 x 3	50 x 10	50 x 8	50 x 6	50 x 5
Disposition*	S	cm ²	10	8	4,8	4	2,4	5	4	3	2,5
	m	Cu	0,089	0,071	0,043	0,036	0,021	0,044	0,036	0,027	0,022
		daN/cm A5/L	0,027	0,022	0,013	0,011	0,006	0,014	0,011	0,008	0,007
	I	cm ⁴	0,83	0,66	0,144	0,083	0,018	0,416	0,213	0,09	0,05
	I/v	cm ³	1,66	1,33	0,48	0,33	0,12	0,83	0,53	0,3	0,2
	I	cm ⁴	83,33	42,66	25,6	21,33	12,8	10,41	8,33	6,25	5,2
	I/v	cm ³	16,66	10,66	6,4	5,33	3,2	4,16	3,33	2,5	2,08
	I	cm ⁴	21,66	17,33	3,74	2,16	0,47	10,83	5,54	2,34	1,35
	I/v	cm ³	14,45	11,55	4,16	2,88	1,04	7,22	4,62	2,6	1,8
	I	cm ⁴	166,66	85,33	51,2	42,66	25,6	20,83	16,66	12,5	10,41
	I/v	cm ³	33,33	21,33	12,8	10,66	6,4	8,33	6,66	5	4,16
	I	cm ⁴	82,5	66	14,25	8,25	1,78	41,25	21,12	8,91	5,16
	I/v	cm ³	33	26,4	9,5	6,6	2,38	16,5	10,56	5,94	4,13
	I	cm ⁴	250	128	76,8	64	38,4	31,25	25	18,75	15,62
	I/v	cm ³	50	32	19,2	16	9,6	12,5	10	7,5	6,25

*disposition : section dans un plan perpendiculaire au jeu de barres (2 phases sont représentées)

Fréquence propre de résonance

Les fréquences propres de vibration à éviter pour les barres soumises à un courant de 50 Hz sont les fréquences voisines de 50 et 100 Hz. Cette fréquence propre de vibration est donnée par la formule :

$$f = 112 \sqrt{\frac{E \cdot I}{m \cdot l^4}}$$

Vérifions que les barres choisies n'entrent pas en résonance.



f	:	fréquence de résonance en Hz	
E	:	module d'élasticité : du cuivre = 1,3 • 10 ⁶ daN/cm ² de l'aluminium A5/L = 0,67 • 10 ⁶ daN/cm ²	
m	:	masse linéique de la barre (choisir la valeur sur le tableau ci-dessus)	<input type="text"/> daN/cm
l	:	longueur entre 2 supports ou traversées	<input type="text"/> cm
I	:	moment d'inertie de la section de la barre par rapport à l'axe x'x perpendiculaire au plan de vibration	<input type="text"/> cm ⁴

(voir formules précédemment explicitées ou choisir la valeur sur le tableau ci-dessus)

d'où f = Hz



Nous vérifions bien que cette fréquence est en dehors des valeurs prosrites, à savoir de 42 à 58 et de 80 à 115 Hz.



Exemple de calcul de jeux de barres

Données de l'exercice proposé

■ Considérons un tableau constitué d'au moins 5 cellules MT. Chaque cellule comporte 3 isolateurs (1 par phase). Un jeu de barres composé de 2 barres par phase, relie électriquement les cellules entre-elles.

Caractéristiques du jeu de barres à vérifier :

S	: section de barre (10 • 1)	<input type="text" value="10"/>	cm ²
d	: distance entre phases	<input type="text" value="18"/>	cm
l	: distance entre isolateurs d'une même phase	<input type="text" value="70"/>	cm
θ_n	: température ambiante	<input type="text" value="40"/>	°C
$(\theta - \theta_n)$: échauffement admissible (90-40=50)	<input type="text" value="50"/>	°C
profil	: plat		
matière	: barres en cuivre 1/4 dur, ayant une contrainte admissible $\eta = 1\ 200\ daN/cm^2$		
disposition	: sur chant		
nombre de barre(s) de phase :		<input type="text" value="2"/>	

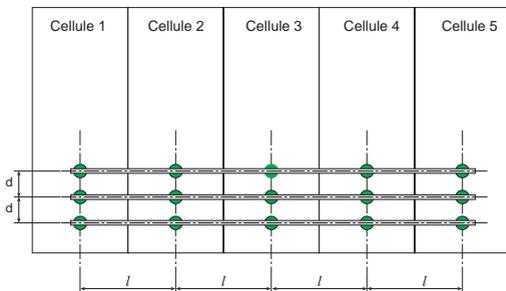
■ Le jeu de barres devra pouvoir supporter un courant assigné $I_r = 2\ 500\ A$ en permanence et un courant de court-circuit de courte durée $I_m = 31\ 500\ A\ eff.$ pendant un temps $t_k = 3\ secondes.$

■ Fréquence assignée $f_r = 50\ Hz$

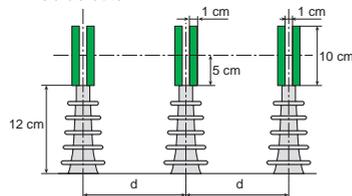
■ Autres caractéristiques :

- les pièces en contact avec le jeu de barres peuvent supporter une température maximale de $\theta_{max} = 100^\circ C$
- les supports employés ont une résistance à la flexion $F' = 1\ 000\ daN$

Vue de dessus

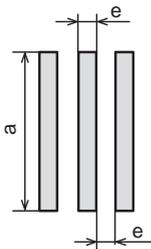


Vue de côté



plan 1

Vérifions
la tenue thermique
du jeu de barres !



Au passage du courant assigné (Ir)

La formule de MELSON & BOTH permet de définir l'intensité admissible dans un conducteur :

$$I = K \cdot \frac{24,9(\theta - \theta_n)^{0,61} \cdot S^{0,5} \cdot p^{0,39}}{\sqrt{\rho_{20}[1 + \alpha(\theta - 20)]}}$$

avec :

- I : intensité admissible exprimée en ampères (A)
- θ_n : température ambiante °C
- ($\theta - \theta_n$) : échauffement admissible * °C
- S : section d'une barre cm²
- p : périmètre d'une barre cm
- ρ_{20} : résistivité du conducteur à 20°C
cuivre : μΩ cm
- α : coefficient de température de la résistivité :
- K : coefficient de conditions
produit de 6 coefficients (k1, k2, k3, k4, k5, k6), décrits ci-après

*(voir tableau V de la norme CEI 60 694 pages 22 et 23)

Définition des coefficients k1, 2, 3, 4, 5, 6 :

■ Le coefficient k1 est fonction du nombre de barres méplates par phase pour :

- 1 barre (k1 = 1)
- 2 ou 3 barres, voir le tableau ci-dessous :

		e / a								
		0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
nb de barres par phase	k1									
2	1,63	1,73	1,76	1,80	1,83	1,85	1,87	1,89	1,91	
3	2,40	2,45	2,50	2,55	2,60	2,63	2,65	2,68	2,70	

Dans notre cas :

- e/a =
- le nombre de barres par phase =
- d'où k1 =



■ Le coefficient **k2** est fonction de l'état de surface des barres :

- nues : $k2 = 1$
- peintes : $k2 = 1,15$

■ Le coefficient **k3** est fonction de la position des barres :

- barres sur chant : $k3 = 1$
- 1 barre à plat : $k3 = 0,95$
- plusieurs barres à plat : $k3 = 0,75$

■ Le coefficient **k4** est fonction de l'endroit où sont installées les barres :

- atmosphère calme à l'intérieur : $k4 = 1$
- atmosphère calme à l'extérieur : $k4 = 1,2$
- barres dans une gaine non ventilée : $k4 = 0,80$

■ Le coefficient **k5** est fonction de la ventilation artificielle :

- sans ventilation artificielle : $k5 = 1$
- le cas avec ventilation devra être traité au cas par cas et ensuite validé par des essais.

■ Le coefficient **k6** est fonction de la nature du courant :

- pour un courant alternatif de fréquence ≤ 60 Hz, $k6$ est fonction du nombre de barres n par phase et de leur écartement.

Valeur de $k6$ pour un écartement égal à l'épaisseur des barres :

n	1	2	3
k6	1	1	0,98

Dans notre cas :

$n = 2$ d'où $k6 = 1$

En définitive, nous avons :

$$k = 1,80 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1 = 1,44$$

$$I = 1,44 \cdot \frac{24,9 \cdot (90 - 40)^{0,61} \cdot 10^{0,5} \cdot 22^{0,39}}{\sqrt{1,83 [1 + 0,004(90 - 20)]}}$$

$$I = K \cdot \frac{24,9(\theta - \theta_n)^{0,61} \cdot S^{0,5} \cdot p^{0,39}}{\sqrt{\rho_{20}[1 + \alpha(\theta - 20)]}}$$

$$I = 2689 \text{ A}$$

La solution choisie 2 barres de $10 \cdot 1$ cm par phase convient car :

$$I_r < I \text{ soit } 500 \text{ A} < 2689$$

Au passage du courant de court-circuit de courte durée (I_{th})

- On admet que, pendant toute la durée (3 secondes) :
 - toute la chaleur dégagée sert à élever la température du conducteur
 - les effets du rayonnement sont négligeables.

La formule ci-dessous peut-être utilisée pour calculer l'échauffement dû au court-circuit :

$$\Delta\theta_{cc} = \frac{0,24 \cdot \rho_{20} \cdot I_{th}^2 \cdot t_k}{(n \cdot S)^2 \cdot c \cdot \delta}$$

avec :

c	: chaleur spécifique du métal <i>cuivre :</i>	<i>0,091 kcal / daN°C</i>
S	: est la section exprimée en cm ²	<input type="text" value="10"/> cm ²
n	: nombre de barres par phase	<input type="text" value="2"/>
I_{th}	: est le courant de court-circuit de courte durée <i>(valeur efficace du courant de C/CT maximal)</i>	<input type="text" value="31500"/> A eff
t_k	: durée du court-circuit de courte durée (1 à 3 s)	<input type="text" value="3"/> en s
δ	: masse volumique du métal <i>cuivre :</i>	<i>8,9 g/cm³</i>
ρ₂₀	: résistivité du conducteur à 20°C <i>cuivre :</i>	<i>1,83 μΩ cm</i>
(θ - θ_n)	: échauffement admissible	<input type="text" value="50"/> °C

□ L'échauffement dû au court circuit est :

$$\Delta\theta_{cc} = \frac{0,24 \cdot 1,83 \cdot 10^{-6} \cdot (31500)^2 \cdot 3}{(2^2 \cdot 10)^2 \cdot 0,091 \cdot 8,9}$$

$\Delta\theta_{cc} = 4$ °C

La température θ_t du conducteur après le court-circuit sera :

$$\begin{aligned} \theta_t &= \theta_n + (\theta - \theta_n) + \Delta\theta_{cc} \\ &= 40 + 50 + 4 \\ &= 94 \text{ °C} \end{aligned}$$

pour I = A (voir calcul pages précédentes)

Le calcul de θ_t doit être affiné car le jeu de barres désiré doit supporter $I_r = 2\,500$ A au maximum et non 2 689 A.



■ Affinons le calcul de θ_t pour $I_r = 2\,500\text{ A}$
(courant assigné du jeu de barres)

□ de la formule de MELSON & BOTH (cf : page 31), nous pouvons déduire la chose suivante :

$$I = \text{constante} \cdot (\theta - \theta_n)^{0,61} \text{ et}$$

$$I_r = \text{constante} \cdot (\Delta\theta)^{0,61}$$

$$\text{donc } \frac{I}{I_r} = \left(\frac{\theta - \theta_n}{\Delta\theta} \right)^{0,61}$$

$$\frac{2\,689}{2\,500} = \left(\frac{50}{\Delta\theta} \right)^{0,61}$$

$$\frac{50}{\Delta\theta} = \left(\frac{2\,689}{2\,500} \right)^{\frac{1}{0,61}}$$

$$\frac{50}{\Delta\theta} = 1,126$$

$$\Delta\theta = 44,3^\circ\text{C}$$

□ la température θ_t du conducteur après court-circuit, pour un instant assigné $I_r = 2\,500\text{ A}$ est :

$$\theta_t = \theta_n + \Delta\theta + \Delta\theta_{cc}$$

$$= 40 + 44,3 + 4$$

$$= 88,3^\circ\text{C pour } I_r = 2\,500\text{ A}$$

Le jeu de barres choisi convient car :

$$\theta_t = 88,3^\circ\text{C est inférieur à } \theta_{\text{max}} = 100^\circ\text{C}$$

(θ_{max} = température maximale supportable par les pièces en contact avec le jeu de barres).

Vérifions
la tenue électrodynamique
du jeu de barres.



Efforts entre conducteurs en parallèle

Les efforts électrodynamiques consécutifs au courant de court-circuit sont donnés par la formule :

$$F_1 = 2 \frac{l}{d} \cdot I_{dyn}^2 \cdot 10^{-8}$$

(voir plan 1 au début de l'exemple de calcul)

l :	distance entre isolateurs d'une même phase	<input type="text" value="70"/>	cm
d :	distance entre phases	<input type="text" value="18"/>	cm
k :	<input type="text" value="2,5"/> pour 50 Hz selon CEI		
I_{dyn} :	valeur crête du courant de court-circuit		
	= k • I _{th}		
	= 2,5 • 31 500		
	= <input type="text" value="78 750"/> A		

$$F_1 = 2 \cdot (70/18) \cdot 78\,750^2 \cdot 10^{-8} = \text{482,3 daN}$$

Effort en tête des supports ou traversées

Formule de calcul d'effort sur un support :

$$F = F_1 \cdot \frac{H + h}{H}$$

avec

F :	effort exprimée en daN		
H :	hauteur de l'isolateur	<input type="text" value="12"/>	cm
h :	distance de la tête de l'isolateur au centre de gravité du jeu de barres	<input type="text" value="5"/>	cm

Calcul d'un effort si N supports

■ L'effort **F** encaissé par chaque support est au maximum égal à l'effort calculé **F₁** multiplié par un coefficient **k_n** qui varie suivant le nombre total **N** de supports équidistants installés.

□ nombre de supports = **N**

□ nous connaissons **N**, définissons **k_n** à l'aide du tableau ci-dessous :

N	2	3	4	≥ 5
k_n	0,5	1,25	1,10	1,14

$$\text{d'où } F = \text{683} (F_1) \cdot \text{1,14} (k_n) = \text{778 daN}$$

Les supports employés ont une résistance à la flexion
F² = 1 000 daN supérieure à l'effort calculé **F = 778 daN**.

La solution convient

Tenue mécanique des barres

En faisant l'hypothèse admissible que les extrémités des barres sont encastrées, elles sont soumises à un moment fléchissant dont la contrainte résultante est :

$$\eta = \frac{F_1 \cdot l}{12} \cdot \frac{v}{I}$$

avec

η : est la **contrainte résultante en daN/cm²**

l : distance entre isolateurs d'une même phase

cm

I/v : est le module d'inertie d'une barre ou d'un ensemble de barres

cm³

(valeur choisie sur le tableau ci-dessous)

$$\eta = \frac{482,3 \cdot 70}{12} \cdot \frac{1}{14,45}$$

$$\eta = 195 \text{ daN/cm}^2$$



La contrainte résultante calculée ($\eta = 195 \text{ daN/cm}^2$) est inférieure à la contrainte admissible par les barres en cuivre 1/4 dur (1200 daN/cm^2) :

La solution convient

Dimensions des barres (mm)

100 x 10

Disposition	S	cm ²	10
	m daN/cm	Cu A5/L	0,089 0,027
	I	cm ⁴	0,83
	I/v	cm ³	1,66
	I	cm ⁴	83,33
	I/v	cm ³	16,66
	I	cm ⁴	21,66
	I/v	cm ³	14,45
	I	cm ⁴	166,66
	I/v	cm ³	33,33
	I	cm ⁴	82,5
	I/v	cm ³	33
	I	cm ⁴	250
	I/v	cm ³	50

Vérifions
que les barres choisies
n'entrent pas
en résonance



Fréquence propre de résonance

Les fréquences propres de vibration à éviter pour les barres soumises à un courant de 50 Hz sont les fréquences voisines de 50 et 100 Hz.

Cette fréquence propre de vibration est donnée par la formule :

$$f = 112 \sqrt{\frac{E \cdot I}{m \cdot l^4}}$$

f	:	fréquence de résonance en Hz	
E	:	module d'élasticité : du cuivre =	1,3 • 10 ⁶ daN/cm ²
m	:	masse linéique de la barre	0,089 daN/cm
l	:	longueur entre 2 supports ou traversées	70 cm
I	:	moment d'inertie de la section de la barre par rapport à l'axe x'x perpendiculaire au plan de vibration	21,66 cm ⁴

(choisir m et l sur le tableau de la page précédente)

$$f = 112 \sqrt{\frac{1,3 \cdot 10^6 \cdot 21,66}{0,089 \cdot 70^4}}$$

$$f = 406 \text{ Hz}$$



f est en dehors des valeurs à proscrire, à savoir 42 à 58 Hz et 80 à 115 Hz:

La solution convient

En conclusion

Le jeu de barres désiré, 2 barres de 10 • 1 cm par phase, convient pour un Ir = 2 500 A et I_{th} = 31,5 kA 3 s.

Quelques ordres de grandeur

Rigidité diélectrique
(20°C, 1 bar absolu) : 2,9 à 3 kV/mm

Seuil d'ionisation
(20°C, 1 bar absolu) : 2,6 kV/mm



■ La tenue diélectrique dépend des 3 paramètres principaux suivant :

- la rigidité diélectrique du milieu
- la forme des pièces
- la distance :
 - air ambiant entre les pièces sous tension
 - interface air isolant entre les pièces sous tension.

La rigidité diélectrique du milieu

C'est une des caractéristiques du fluide (gaz ou liquide) qui compose le milieu. Pour l'air ambiant cette caractéristique dépend des conditions atmosphériques et de la pollution.

La rigidité diélectrique de l'air dépend des conditions ambiantes suivantes :

■ **la pollution**

Des poussières conductrices peuvent être présentes dans un gaz, un liquide, ou se déposer à la surface d'un isolant. Leur effet est toujours le même : réduire les performances de l'isolation d'un facteur qui peut aller jusqu'à 10 !

■ **La condensation**

Phénomène de dépôt de gouttelettes d'eau à la surface des isolants ce qui a pour effet de réduire localement les performances de l'isolation d'un facteur 3.

■ **La pression**

Les performances d'une isolation gazeuse croissent avec la pression. Pour un appareil isolé dans l'air ambiant, l'altitude peut causer une baisse de performance de l'isolation du fait de la baisse de pression. On est souvent obligé de déclasser l'appareil.

■ **L'humidité**

Dans les gaz et les liquides, la présence d'humidité peut causer une modification des performances de l'isolation. Dans le cas des liquides, c'est toujours une baisse de performance. Dans le cas des gaz, c'est généralement une baisse (SF₆, N₂...) sauf pour l'air où à faible concentration (humidité < 70 %) il y a une légère amélioration des performances "plein gaz".

■ **La température**

Les performances d'une isolation gazeuse, liquide ou solide décroissent quand la température augmente. Pour les isolants solides, les chocs thermiques peuvent faire apparaître des **micro-fissures** qui peuvent conduire très rapidement à un claquage. Il faut donc faire très attention aux phénomènes de dilatation : un isolant solide se dilate 5 à 15 fois plus qu'un conducteur.

* On parle d'isolation "plein gaz".

Niveau de pollution

La pollution peut avoir comme origine : le milieu gazeux externe (poussières), une salissure initiale, éventuellement la coupure en surface interne, la pollution conjuguée à l'humidité développe une conduction électrochimique qui va aggraver les phénomènes de décharges. Le rayonnement peut-être une contrainte du milieu externe (exposition à l'extérieur).

La forme des pièces

Elle joue un rôle essentiel dans la tenue diélectrique de l'appareillage. Il faut absolument éliminer tout effet de "pointe" qui aurait un effet désastreux dans la tenue à l'onde de choc en particulier et pour le vieillissement surfacique des isolants :

Ionisation de l'air Production d'ozone Dégradation de la peau de moulage des isolants



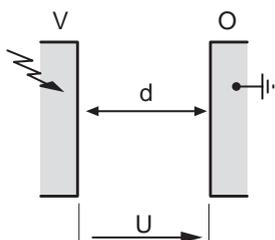
La distance entre les pièces

Air ambiant entre pièces sous tension

■ Pour les installations qui, pour des raisons diverses, ne peuvent pas être soumises aux essais de choc, le tableau de la publication CEI 71-2 donne, en fonction de la tension de tenue nominale aux chocs de foudre, les distances minimales à respecter dans l'air entre phase et terre ou entre phases.

■ Ces distances garantissent une tenue correcte pour des configurations défavorables : altitude < 1 000 m.

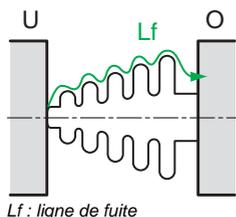
■ Distances dans l'air* entre les parties conductrices sous tension et les structures mises à la terre donnant une tension spécifiée de tenue aux chocs par temps sec :



Tension de tenue assignée aux chocs de foudre	Distance minimale dans l'air entre phase et masse et entre phases
Up (kV)	d (mm)
40	60
60	90
75	120
95	160
125	220

Les valeurs des distances dans l'air données dans le tableau ci-dessus sont les valeurs minimales déterminées par la considération des propriétés diélectriques, et ne comprennent aucune des augmentations qui pourraient être nécessitées pour tenir compte des tolérances de construction, des effets des courts-circuits, des effets de vent, de la sécurité du personnel, etc.

*Ces indications sont relatives à une distance à travers un intervalle d'air unique, sans prendre en considération la tension de claquage par cheminement le long des surfaces, liées à des problèmes de pollution.



Interface air isolant entre les pièces sous tension

■ Il existe 4 niveaux de sévérité de pollution, donnés dans le tableau ci-dessous, selon CEI 60 815* :

Tableau de choix du niveau de pollution

Niveau de pollution	Exemple d'environnements caractéristiques
I-faible	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> zone sans industries et avec faible densité d'habitations équipés d'installations de chauffage <input type="checkbox"/> zones avec faible densité d'industries ou d'habitations mais soumises fréquemment aux vents et/ou aux pluies <input type="checkbox"/> régions agricoles ¹ <input type="checkbox"/> régions montagneuses <input type="checkbox"/> toutes ces zones doivent être situées à des distances d'au moins 10 km de la mer et ne doivent pas être exposées aux vents venant de la mer ²
II-moyen	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> zones avec industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes et/ou avec densité moyenne d'habitations équipés d'installation de chauffage <input type="checkbox"/> zones à forte densité d'habitations et/ou d'industries mais soumises fréquemment aux vents et/ou à des chutes de pluies <input type="checkbox"/> zones exposées au vent de mer, mais pas trop proche de la côte (distantes d'au moins quelques kilomètres)²
III-fort	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> zones avec forte densité d'industries et banlieues de grandes villes avec forte densité d'installation de chauffage polluantes <input type="checkbox"/> zones situées près de la mer, ou en tout cas exposées à des vents relativement forts venant de la mer ²
IIII-très fort	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> zones généralement peu étendues, soumises à des poussières conductrices et à des fumées industrielles produisant des dépôts conducteurs particulièrement épais <input type="checkbox"/> zones généralement peu étendues, très proches de la côte et exposés aux embruns ou aux vents très forts et aux polluants venant de la mer ² <input type="checkbox"/> zones désertiques caractérisées par de longues périodes sans pluies, exposées aux vents forts transportant du sable et du sel et soumises à une condensation régulière.

*Le CEI 60 815 vous guide pour le choix des isolateurs sous pollution

¹ L'utilisation d'engrais répandus par pulvérisation ou le brûlage des terres moissonnées peut conduire à un niveau de pollution plus élevé à cause de la dispersion par le vent.

² Les distances au rivage dépendent de la topographie de la zone côtière et des conditions extrêmes de vent.

Attention !
Un déclassement
en température est
à envisager.



Le code IP

Introduction

La protection des personnes contre les contacts directs et la protection des matériels contre certaines influences externes sont exigées par les normes internationales d'installation électrique et produits (CEI 60 529). Connaître les degrés de protection est indispensable pour la prescription, l'installation, l'exploitation et le contrôle qualité du matériel.

Définitions

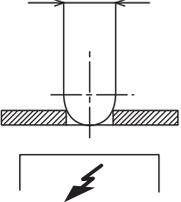
Le degré de protection est le niveau de protection créé par une enveloppe contre l'accès aux parties dangereuses, la pénétration des corps solides étrangers et de l'eau. Le code IP est le système de codification pour indiquer les degrés de protection.

Domaine d'application

Il est applicable aux enveloppes pour les matériels électriques de tension assignée inférieure ou égale à 72,5 kV. Il ne concerne pas le disjoncteur seul mais néanmoins le plastron doit être adapté lorsque celui-ci est installé à l'intérieur d'une cellule (maillage des grilles de l'aération plus fin par exemple).

Les différents IP et leur signification

Une description abrégée des éléments du code IP est donnée dans le tableau page suivante.

Élément	Chiffres ou lettres	Signification pour la protection du matériel	Signification pour la protection des personnes	Signalisation
Lettre du code premier chiffre caractéristique	IP	contre la pénétration des corps solides étrangers	contre l'accès aux parties dangereuses avec	
	0	(non protégé)	(non protégé)	
	1	de diamètre ≥ 50 mm	dos de la main	
	2	de diamètre $\geq 12,5$ mm	doigt	
	3	de diamètre $\geq 2,5$ mm	outil	
	4	de diamètre ≥ 1 mm	fil	
	5	protégé contre la poussière	fil	
	6	étanche à la poussière	fil	
deuxième chiffre caractéristique		contre la pénétration de l'eau avec effets nuisibles		
	0	(non protégé)		
	1	gouttes d'eau verticales		
	2	gouttes d'eau (15° d'inclinaison)		
	3	pluie		
	4	projection d'eau		
	5	projection à la lance		
	6	projection puissante à la lance		
	7	immersion temporaire		
	8	immersion prolongée		
lettre additionnelle (en option)			contre l'accès aux parties dangereuses avec :	
	A		dos de la main	
	B		doigt	
	C		outil	
	D		fil	
lettre supplémentaire (en option)		information supplémentaire spécifique à :		
	H	matériel à haute tension		
	M	mouvement pendant l'essai à l'eau		
	S	stationnaire pendant l'essai à l'eau		
	W	intempéries		

Le code IK

Introduction

■ Certains pays avaient ressenti le besoin de codifier aussi la protection procurée par les enveloppes contre les impacts mécaniques. Pour cela ils ajoutaient un troisième chiffre caractéristique au code IP (cas de la Belgique, de l'Espagne, de la France et du Portugal). Mais depuis l'adoption de la CEI 529 comme norme européenne, aucun pays européen ne peut avoir un code IP différent.

■ La CEI ayant refusé jusqu'alors d'ajouter ce troisième chiffre au code IP, la seule solution pour maintenir une classification dans ce domaine était de créer un code différent. C'est l'objet du projet de norme européenne EN 50102 : code IK.

■ Comme les troisièmes chiffres des différents pays pouvaient avoir des significations différentes et qu'il a fallu introduire des niveaux supplémentaires pour couvrir les principaux besoins des normes de produit, les degrés du code IK ont une signification différente de celle des anciens troisièmes chiffres (cf. tableau ci-dessous).

Anciens 3 ^{èmes} chiffres du code IP de la NF C 20-010 (1986)	Code IK
IP XX1	IK 02
IP XX3	IK 04
IP XX5	IK 07
IP XX7	IK 08
IP XX9	IK 10

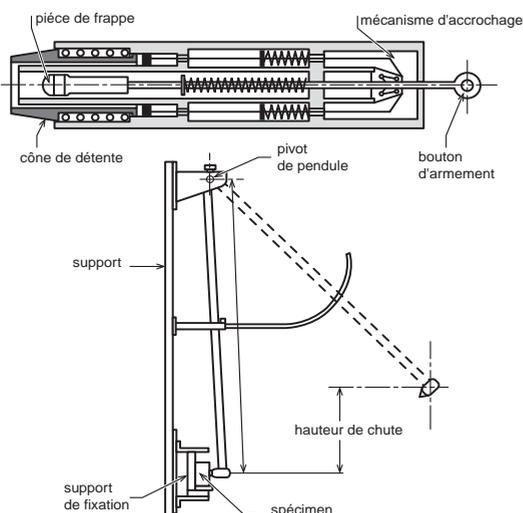
Nota : pour limiter les confusions, chaque nouveau degré est indiqué par un nombre à deux chiffres.

Définitions

■ Les degrés de protection correspondent à des niveaux d'énergies d'impact exprimés en joules :

- choc d'un marteau appliquée directement sur un matériel
- choc transmis par les supports, exprimés en termes de vibrations donc en fréquence et accélération.

■ Les degrés de protection contre les impacts mécaniques peuvent être vérifiés par différents types de marteau : marteau pendulaire, marteau à ressort ou marteau à chute libre verticale (schéma ci-dessous).



Les différents IK et leur signification

Code IK	IK 01	IK 02	IK 03	IK 04	IK 05	IK 06	IK 07	IK 08	IK 09	IK 10
énergies joules	0,15	0,2	0,35	0,5	0,7	1	2	5	10	20
rayon mm ¹	10	10	10	10	10	10	25	25	50	50
matière ¹	P	P	P	P	P	P	A	A	A	A
acier = A ²										
polyamide = P ³										
marteau										
pendulaire	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
à ressort	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
vertical								✓	✓	✓

✓ = OUI

Nota :¹ de la tête de frappe² Fe 490-2 selon ISO 1052, de dureté 50 HR à 58 HR selon ISO 6508³ de dureté HR 100 selon ISO 2039-2



Introduction

- Le disjoncteur est un appareil qui assure la commande et la protection d'un réseau. Il est capable d'établir, de supporter et d'interrompre les courants de service ainsi que les courants de court-circuit.
- Le circuit principal doit supporter sans dommage :
 - le courant thermique = courant de court-circuit pendant 1 ou 3 s
 - le courant électrodynamique :
 - 2,5 • I_{cc} pour 50 Hz (CEI)
 - 2,6 • I_{cc} pour 60 Hz (CEI)
 - 2,7 • I_{cc} (ANSI), pour constante de temps particulière (CEI)
 - le courant de charge permanent.
- Un disjoncteur étant la plupart du temps en position "fermé", le courant de charge doit circuler sans emballement thermique pendant toute la durée de vie de l'appareil.

Caractéristiques

Caractéristiques assignées obligatoires

- Tension assignée
- Niveau d'isolement assigné
- Courant assigné en service continu
- Courant de courte durée admissible assigné
- Valeur de crête du courant admissible assigné
- Durée du court-circuit assigné
- Tension assignée d'alimentation des dispositifs de fermeture d'ouverture et des circuits auxiliaires
- Fréquence assignée
- Pouvoir de coupure assigné en court-circuit
- Tension transitoire de rétablissement assignée
- Pouvoir de fermeture assigné en court-circuit
- Séquence de manœuvre assignée
- Durées assignées.

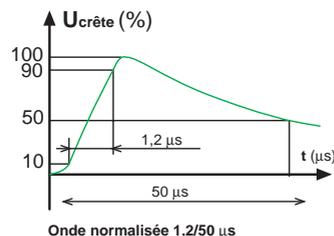
Caractéristiques assignées particulières

- Ces caractéristiques ne sont pas obligatoires mais peuvent être demandées pour des applications spécifiques :
 - pouvoir de coupure assigné en discordance de phases
 - pouvoir de coupure assigné des câbles à vide
 - pouvoir de coupure assigné des lignes à vide
 - pouvoir de coupure assigné de batterie unique de condensateurs
 - pouvoir de coupure assigné des batteries de condensateurs en gradins
 - pouvoir de fermeture assigné des batteries de condensateurs
 - pouvoir de coupure assigné de faibles courants inductifs.

Tension assignée (cf. § 4.1 CEI 60 694)

La tension assignée est la valeur efficace maximale de la tension que le matériel peut supporter en service normal. Elle est toujours supérieure à la tension de service.

- Valeurs normalisées pour U_r (kV) : 3,6 - 7,2 - 12 - 17,5 - 24 - 36 kV.



Niveau d'isolement assigné (cf. § 4.2 CEI 60 056 et 60 694)

- Le niveau d'isolement est caractérisé par deux valeurs :
 - la tenue à l'onde de choc (1,2/50 μs)
 - la tenue à la fréquence industrielle pendant une minute.

Tension assignée (Ur en kV)	Tenue à l'onde de choc (Up en kV)	Tenue à la fréquence industrielle (Ud en kV)
7,2	60	20
12	75	28
17,5	95	38
24	125	50
36	170	70

Courant assigné en service continu (cf. § 4.4 CEI 60 694)

Un disjoncteur étant toujours fermé, le courant de charge doit circuler en respectant une valeur maximale de température fonction des matériaux et du type de liaisons.

La CEI fixe l'échauffement maximal admissible des différents matériaux utilisés pour une température de l'air ambiant ne dépassant pas 40 °C (cf. § 4.4.2 tableau 3 CEI 60 694).

Courant de courte durée admissible (cf. § 4.5 CEI 60 694)

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot U}$$

S_{cc}	:	puissance de court-circuit	(en MVA)
U	:	tension de service	(en kV)
I_{cc}	:	courant de court-circuit	(en kA)

C'est la valeur normalisée efficace du courant de court-circuit maximale admissible sur un réseau pendant 1 ou 3 secondes.

- Valeurs du pouvoir de coupure assigné en court-circuit maximale (kA) : 6,3 - 8 - 10 - 12,5 - 16 - 20 - 25 - 31,5 - 40 - 50 kA.

Valeur de crête du courant admissible (cf. § 4.6 CEI 60 694) et pouvoir de fermeture (cf. § 4.103 CEI 60 056)

Le pouvoir de fermeture est la valeur maximale qu'un disjoncteur est capable d'établir et de maintenir sur une installation en court-circuit. Il doit être supérieur ou égal à la valeur crête du courant de courte durée assigné.

I_{cc} étant la valeur maximale du courant de court-circuit assigné pour la tension assignée du disjoncteur. La valeur de crête du courant de courte durée admissible est égale à :

- 2,5 • I_{cc} pour 50 Hz
- 2,6 • I_{cc} pour 60 Hz
- 2,7 • I_{cc} pour les applications particulières.

Durée du court-circuit assignée (cf. § 4.7 CEI 60 694)

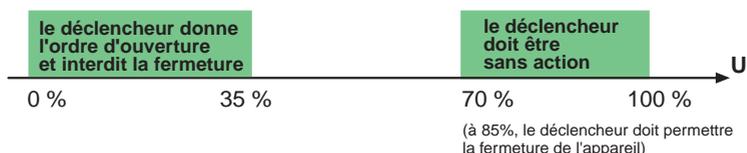
La durée de court-circuit assignée est égale à 1 ou 3 secondes.

Tension assignée d'alimentation des dispositifs de fermeture, d'ouverture et des circuits auxiliaires (cf. § 4.8 CEI 60 694)

- Valeurs de tension d'alimentation des circuits auxiliaires :
 - en courant continu (cc) : **24 - 48 - 60 - 110 ou 125 - 220 ou 250** volts,
 - en courant alternatif (ca) : **120 - 220 - 230 - 240** volts.

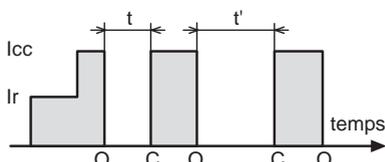
- Les tensions de fonctionnement doivent se trouver dans les plages suivantes :

- moteur et déclencheurs de fermeture :
 - 15 % à +10 % de U_r en cc et ca
- déclencheurs d'ouverture :
 - 30 % à +10 % de U_r en cc
 - 15 % à +10 % de U_r en ca
- déclencheurs d'ouverture à minimum de tension



Fréquence assignée (cf. § 4.9 CEI 60 694)

Deux fréquences sont actuellement utilisées dans le monde : 50 Hz en Europe et 60 Hz en Amérique, quelques pays utilisent les deux fréquences. La fréquence assignée est de 50 Hz ou 60 Hz.



Séquence de manœuvre assignée (cf. § 4.104 CEI 60 056)

- Séquence de manœuvres assignée suivant CEI, O - t - CO - t' - CO. (cf : schéma ci-contre)

O	:	représente une manœuvre d'ouverture
CO	:	représente une manœuvre de fermeture suivie immédiatement d'une manœuvre d'ouverture

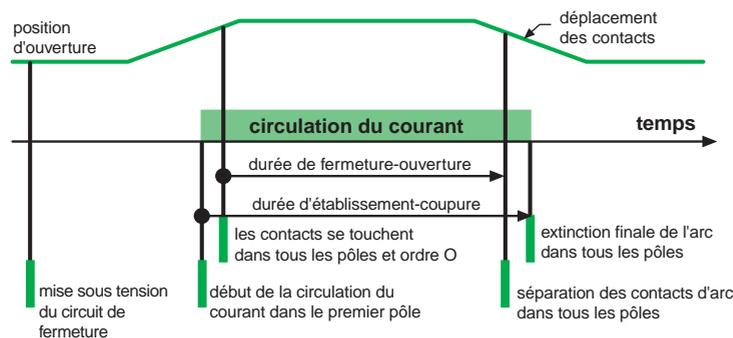
- Trois séquences de manœuvre assignées existent :

- lent : O - 3 mn - CO - 3 mn - CO
- rapide 1 : O - 0,3 s - CO - 3 mn - CO
- rapide 2 : O - 0,3 s - CO - 15 s - CO

Nota : d'autres séquences peuvent être demandées.

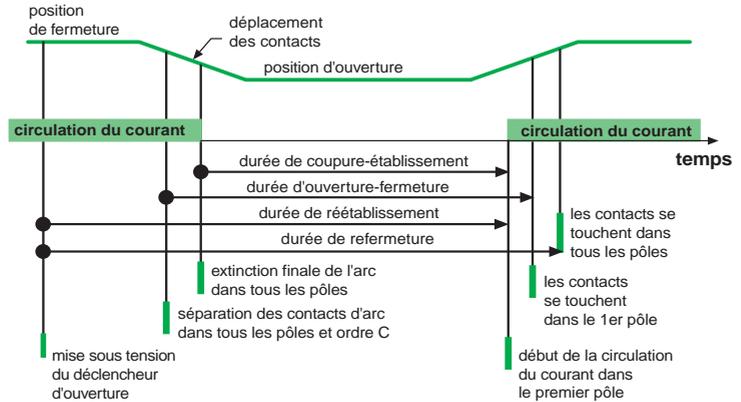
■ Cycle de Fermeture/Ouverture

Hypothèse : ordre O dès que le disjoncteur est fermé.



■ Cycle de refermeture automatique

Hypothèse : ordre C dès que le disjoncteur est ouvert,
(avec temporisation pour obtenir 0,3 sec ou 15 secs ou 3 min).



Exemple 1 :

■ Pour un disjoncteur de durée d'ouverture minimum de 45 ms (Top) auquel on ajoute 10 ms (Tr) dû au relayage, le graphique nous donne un pourcentage de composante apériodique d'environ 30 % pour une constante de temps $\tau = 45$ ms :

$$\%DC = e^{-\frac{(45 + 10)}{45}} = 29,5\%$$

Exemple 2 :

■ Supposons que le % DC d'un disjoncteur MT soit égal à 65 % et que le courant de court-circuit symétrique calculé (Isym) soit égal à 27 kA.

A quoi est égal Iasym ?

$$I_{asym} = I_{sym} \sqrt{1 + 2 \frac{(\%DC)^2}{100}} \quad [A]$$

$$= 27kA \sqrt{1 + 2(0,65)^2}$$

$$= 36,7kA$$

■ En se basant sur la formule [A], ceci équivaut à un courant de court-circuit symétrique de calibre :

$$\frac{36,7kA}{1,086} = 33,8kA \text{ pour un \%DC de 30\%}$$

■ Le calibre du disjoncteur devra donc être supérieur à 33,8 kA. Selon la CEI, le calibre normalisé le plus proche est 40 kA.

Pouvoir de coupure assigné en court-circuit (cf. § 4.101 CEI 60 056)

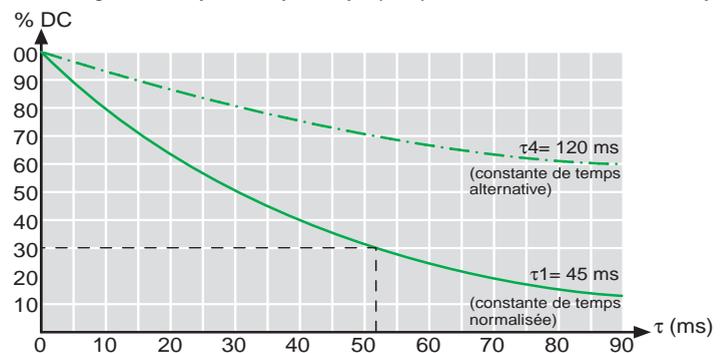
Le pouvoir de coupure assigné en court-circuit est la valeur la plus élevée du courant que le disjoncteur doit être capable de couper sous sa tension assignée.

■ Il est caractérisé par deux valeurs :

- la valeur efficace de sa composante périodique, dénommée par l'abréviation : "pouvoir de coupure assigné en court-circuit"
- le pourcentage de la composante apériodique correspondant à la durée d'ouverture du disjoncteur à laquelle on ajoute une demi-période de la fréquence assignée. La demi-période correspond au temps minimal d'activation d'une protection à maximum de courant, soit 10 ms à 50 Hz.

■ Suivant la CEI, le disjoncteur doit couper la valeur efficace de la composante périodique du court-circuit (= son pouvoir de coupure nominal) avec le pourcentage d'asymétrie défini par les courbes ci-dessous.

Pourcentage de la composante apériodique (% DC) en fonction de l'intervalle de temps (τ)



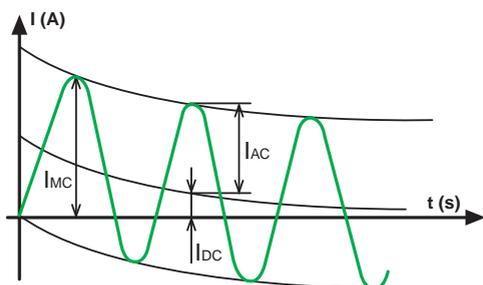
τ : durée d'ouverture du disjoncteur (Top), augmentée d'une demi-période à la fréquence industrielle (Tr).

■ En standard la CEI définit les équipements MT pour un %DC de 30%, pour une valeur crête du courant maximal égale à $2,5 \cdot I_{cc}$ en 50 Hz ou $2,6 \cdot I_{cc}$ en 60 Hz. Dans ce cas utiliser la courbe τ_1 .

- Pour les circuits faiblement résistifs comme les arrivées générateurs, %DC peut être plus grande, avec une valeur crête du courant maximal égale à $2,7 \cdot I_{cc}$. Dans ce cas utiliser la courbe τ_4 .
Pour toutes les constantes comprises entre τ_1 et τ_4 , utiliser la formule :

$$\% DC = 100 \cdot e^{\frac{-(T_{op} + T_r)}{\tau_{1, \dots, 4}}}$$

- Valeurs de pouvoir de coupure assigné en court-circuit :
6,3 - 8 - 10 - 12,5 - 16 20 - 25 - 31,5 - 40 - 50 - 100 kA.



- Les essais de coupure en court-circuit doivent répondre aux 5 séquences d'essais suivantes :

Séquence	% Isym.	% composante apériodique %DC
1	10	≤ 20
2	20	≤ 20
3	60	≤ 20
4	100	≤ 20
5*	100	selon formule

* pour des disjoncteurs ouvrant en moins de 80 ms

I _{MC} :	courant établi
I _{AC} :	valeur de crête de la composante périodique (I_{cc} crête)
I _{DC} :	valeur de la composante apériodique
%DC :	% d'asymétrie ou composante apériodique :

$$\frac{I_{DC}}{I_{AC}} \cdot 100 = 100 \cdot e^{\frac{-(T_{op} + T_r)}{\tau_{(1, \dots, 4)}}}$$

- Courant de court-circuit symétrique (en kA) :

$$I_{sym} = \frac{I_{AC}}{\sqrt{2}}$$

- Courant de court-circuit asymétrique (en kA) :

$$I_{asym}^2 = I_{AC}^2 + I_{DC}^2$$

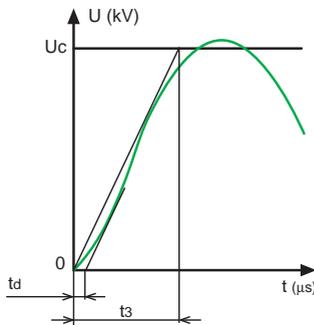
$$I_{asym} = I_{sym} \sqrt{1 + 2 \left(\frac{\%DC}{100} \right)^2}$$

Tension Transitoire de Rétablissement assignée (TTR) (cf. § 4.102 CEI 60 056)

C'est la tension qui apparaît entre les bornes d'un pôle de disjoncteur après l'interruption du courant. La forme d'onde de la tension de rétablissement est variable suivant la configuration réelle des circuits. Un disjoncteur doit être capable d'interrompre un courant donné pour toute tension de rétablissement dont la valeur reste inférieure à la TTR assignée.

- Facteur de premier pôle

Pour les circuits triphasés, la TTR se réfère au pôle qui coupe le premier, c'est-à-dire à la tension aux bornes du pôle ouvert. Le rapport de cette tension à une tension simple s'appelle facteur de premier pôle, il est égal à 1,5 pour les tensions jusqu'à 72,5 kV.



■ Valeur de la TTR assignée

□ la TTR est fonction de l'asymétrie, elle est donnée pour une asymétrie de 0%

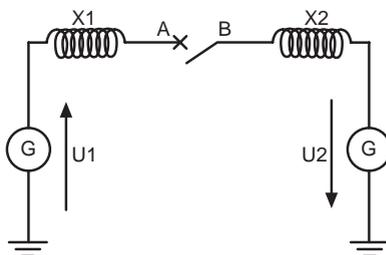
Tension assignée (Ur en kV)	Valeur de la TTR (Uc en kV)	Temps (t3 en µs)	Retard (td en µs)	Vitesse d'accroissement (Uc/td en kV/µs)
7,2	12,3	52	8	0,24
12	20,6	60	9	0,34
17,5	30	72	11	0,42
24	41	88	13	0,47
36	62	108	16	0,57

$$U_c = 1,4 \cdot 1,5 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_r = 1,715 U_r$$

$$t_d = 0,15 t_3$$

□ Représentation d'une TTR spécifiée par un tracé de référence à deux paramètres et par un segment de droite définissant un retard

T_d	:	temps de retard
t₃	:	temps mis pour atteindre Uc
U_c	:	tension de crête de la TTR en kV
Vitesse d'accroissement de la TTR : U _c /t ₃ en kV/µs		



$$U_A - U_B = U_1 - (-U_2) = U_1 + U_2$$

si $U_1 = U_2$ alors $U_A - U_B = 2U$

Pouvoir de coupure assigné en discordance de phases (cf. § 4.106 CEI 60 056)

Lorsqu'un disjoncteur est ouvert et que les conducteurs de part et d'autre ne sont pas synchrones, la tension entre ses bornes peut croître jusqu'à la somme des tensions des conducteurs (opposition de phases).

■ En pratique, la norme demande au disjoncteur de couper **un courant égal à 25 % du courant de défaut aux bornes**, sous une tension égale au double de la tension par rapport à la terre.

■ Si Ur est la tension assignée du disjoncteur, la tension de rétablissement (TTR) à fréquence industrielle est égale à :

□ $2\sqrt{3}\sqrt{3} U_r$ pour les réseaux dont le neutre est direct à la terre

□ $2,5\sqrt{3} U_r$ pour les autres réseaux.

■ Valeurs crête de la TTR pour les réseaux autres que ceux avec neutre à la terre :

$$U_c = 1,25 \cdot 2,5 \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot U_r$$

Tension assignée (Ur en kV)	Valeur de la TTR (Uc en kV)	Temps (t3 en µs)	Vitesse d'accroissement (Uc/td en kV/µs)
7,2	18,4	104	0,18
12	30,6	120	0,26
17,5	45	144	0,31
24	61	176	0,35
36	92	216	0,43

Pouvoir de coupure assigné des câbles à vide (cf. § 4 .108 CEI 60 056)

La spécification d'un pouvoir de coupure assigné pour un disjoncteur situé en tête de câbles à vide n'est pas obligatoire et est considérée comme non nécessaire pour des tensions \leq à 24 kV.

■ Valeurs normales du pouvoir de coupure assigné pour un disjoncteur situé en tête de câbles à vide :

Tension assignée (U _r en kV)	Pouvoir de coupure assigné des câbles à vide (I _c en kA)
7,2	10
12	25
17,5	31,5
24	31,5
36	50

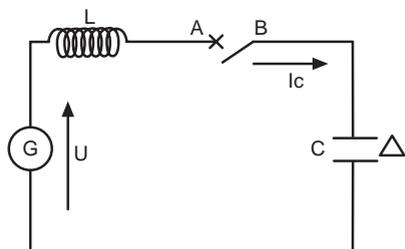
Pouvoir de coupure assigné des lignes à vide (cf. § 4 .107 CEI 60 056)

La spécification d'un pouvoir de coupure assigné pour un disjoncteur de manoeuvre situé en tête de lignes à vide est limité aux lignes aériennes triphasées et de tension assignée \geq 72 kV.

Pouvoir de coupure assigné de batterie unique de condensateurs (cf. § 4 .109 CEI 60 056)

La spécification d'un pouvoir de coupure d'un disjoncteur de manoeuvre situé en amont de condensateurs n'est pas obligatoire. A cause de la présence d'harmoniques, le pouvoir de coupure condensateurs est égal à 0,7 fois la valeur du courant assigné de l'appareil.

Courant assigné (A)	Pouvoir de coupure condensateurs (A)
400	280
630	440
1250	875
2500	1750
3150	2200



Par définition

$$pu = U_r \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

■ La valeur normale de la surtension obtenue est égale à 2,5 pu, soit :

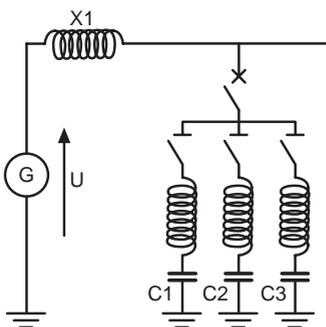
$$2,5 \cdot U_r \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

Pouvoir de coupure assigné de batterie de condensateurs en gradins (cf. § 4.110 CEI 60 056)

La spécification d'un pouvoir de coupure condensateurs en gradins n'est pas obligatoire.

■ Si n est égal au nombre de gradins, alors la surtension est égale à :

$$\frac{2n}{2n+1} pu \text{ avec } pu = U_r \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

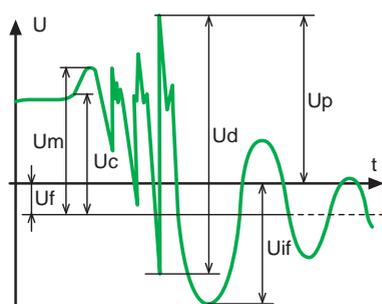


Pouvoir de fermeture assigné de batteries de condensateurs (cf. § 4.111 CEI 60 056)

Le pouvoir de fermeture assigné de batteries de condensateurs est la valeur crête du courant que le disjoncteur doit être capable d'établir sous sa tension assignée. La valeur du pouvoir de fermeture assigné du disjoncteur doit être supérieure à la valeur du courant d'enclenchement de la batterie de condensateurs. En service, la fréquence du courant d'appel est normalement dans la zone 2 - 5 kHz.

Pouvoir de coupure assigné de faibles courants inductifs (cf. § 4.112 CEI 60 056)

La coupure d'un courant faiblement inductif (quelques ampères à quelques dizaines d'ampères) provoque des surtensions. Le type de disjoncteur sera choisi afin que les surtensions qui apparaissent n'endommagent pas l'isolement des récepteurs (transformateurs, moteurs).



■ La figure ci-contre représente les différentes tensions côté charge

Uf	:	valeur instantanée de la tension réseau
Uc	:	tension réseau à l'instant de la coupure
Um	:	point d'extinction
Uif	:	surtension par rapport à la terre
Up	:	surtension maximale rapport à la terre
Ud	:	amplitude maximale crête-à-crête de la surtension due au réamorçage.

■ Niveaux d'isolement des moteurs

La CEI 60 034 stipule les niveaux d'isolement des moteurs. Les essais de tenue à fréquence industrielle et aux chocs sont donnés par le tableau ci-dessous (niveaux d'isolement nominaux pour machines tournantes).

Isolément	Essai à 50 (60) Hz	Essai choc
valeur efficace		
Entre spire		(4 U _r + 5) kV 4,9 pu + 5 = 31 kV à 6,6 kV (50% sur un échantillon) temps de montée 0,5 μs
Par rapport à la terre	(2 U _r + 5) kV 2U _r + 1 ⇒ 2(2U _r + 1) ⇒ 0 14 kV ⇒ 28 kV ⇒ 0	(4 U _r + 5) kV 4,9 pu + 5 = 31 kV à 6,6 kV temps de montée 1,2 μs

Conditions normales de fonctionnement (cf. CEI 60 694)

Pour tout matériel fonctionnant dans d'autres conditions que celles décrites ci-dessous, un déclassement est à prévoir (voir chapitre déclassement). Les matériels sont conçus pour un fonctionnement normal aux conditions suivantes :

■ Température

0°C	Installation		
	Ambiante instantanée	Intérieure	Extérieure
minimale	-5°C	-25°C	
maximale	+40°C	+40°C	
valeur maxi moyenne journalière	35°C	35°C	

■ Humidité

Valeur moyenne de l'humidité relative pour une période	Matériel intérieur
24 heures	95 %
1 mois	90 %

■ Altitude

L'altitude ne doit pas dépasser 1 000 mètres.

Endurance électrique

L'endurance électrique demandée par la recommandation est de 3 coupures à I_{cc} .

Les disjoncteurs Merlin Gerin assurent au minimum 15 fois la coupure I_{cc} .

Endurance mécanique

L'endurance mécanique demandée par la recommandation est de 2 000 manœuvres.

Les disjoncteurs Merlin Gerin assurent 10 000 manœuvres.

Coordination des valeurs assignées (cf. § CEI 60 056)

Tension assignée	Pouvoir de coupure assigné en court-circuit	Courant assigné en service continu				
U_r (kV)	I_{cc} (kV)	I_r (A)				
3,6	10	400				
	16	630		1250		
	25	1250			1600	2500
	40	1250			1600	2500 3150
7,2	8	400				
	12,5	400	630	1250		
	16	630		1250 1600		
	25	630			1250	1600 2500
	40	1250			1600	2500 3150
12	8	400				
	12,5	400	630	1250		
	16	630		1250 1600		
	25	630			1250	1600 2500
	40	1250			1600	2500 3150
	50	1250			1600	2500 3150
17,5	8	400	630	1250		
	12,5	630		1250		
	16	630		1250		
	25	1250				
	40	1250			1600	2500 3150
	50	1250			1600	2500 3150
24	8	400	630	1250		
	12,5	630		1250		
	16	630		1250		
	25	1250			1600	2500
	40	1250			1600	2500 3150
	50	1250			1600	2500 3150
36	8	630				
	12,5	630		1250		
	16	630		1250 1600		
	25	1250			1600	2500
	40	1250			1600	2500 3150
	50	1250			1600	2500 3150

Attention !
Ne jamais laisser un
TC sur circuit ouvert.



Il est destiné à donner au secondaire un courant proportionnel au courant primaire.

Rapport de transformation (Kn)

$$K_n = \frac{I_{pr}}{I_{sr}} = \frac{N_2}{N_1}$$

Nota : les transformateurs de courant doivent être conformes à la norme CEI 185 mais peuvent être également définis par les normes BS 3938 et ANSI.

■ Il est constitué d'un ou plusieurs enroulements primaires autour d'un ou plusieurs enroulements secondaires ayant chacun leur circuit magnétique, le tout enrobé dans une résine isolante.

■ Il est dangereux de laisser un TC en circuit ouvert car des tensions dangereuses pour le personnel et le matériel peuvent apparaître à ses bornes.

Caractéristiques du circuit primaire selon normes CEI

Fréquence assignée (fr)

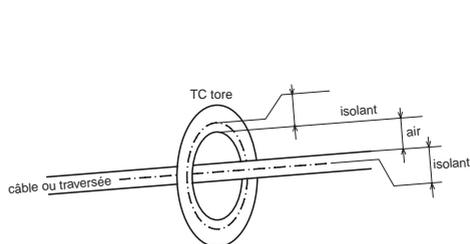
Un TC défini à 50 Hz pourra être installé sur un réseau 60 Hz. Sa précision est conservée. **L'inverse n'est pas vrai.**

Tension assignée du circuit primaire (Upr)

■ Cas général :

Tension assignée TC ≥ tension assignée de l'installation

La tension assignée fixe le niveau d'isolement du matériel (voir chapitre "Introduction" du guide). Généralement, nous choisirons la tension assignée du TC à partir de la tension de service U de l'installation, suivant le tableau :



(traversée avec ou sans gaine isolante)

U	3,3	5	5,5	6	6,6	10	11	13,8	15	20	22	30	33
Upr	7,2 kV												
				12 kV									
						17,5 kV							
								24 kV					
										36 kV			

■ Cas particulier :

Le TC est un **tore BT** installé sur une traversée ou sur un câble.

L'isolement diélectrique est assurée par l'isolant du câble ou de la traversée et l'air situé entre eux. Le TC tore est lui même isolé.

Courant de service primaire (I_{ps})

Le courant primaire de service I (kA) d'une installation (un départ transformateur par exemple) est égale au courant de service primaire du TC (I_{ps}) en tenant compte des déclassements éventuels.

■ Si :

S	:	puissance apparente en kVA
U	:	tension primaire de service en kV
P	:	puissance active du moteur en kW
Q	:	puissance réactive des condensateurs en kvars
I _{ps}	:	courant primaire de service en A

■ Nous aurons :

cellule arrivée

$$I_{ps} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}$$

arrivée alternateur

$$I_{ps} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}$$

départ transformateur

$$I_{ps} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}$$

départ moteur

$$I_{ps} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \eta}$$

η : rendement du moteur

Si vous ne connaissez pas les valeurs exactes de φ et de η, vous pouvez prendre en première approximation : cos φ = 0,8 ; η = 0,8.

départ condensateur

1,3 est un coefficient de déclassement de 30% pour tenir compte des échauffements dus aux harmoniques dans les condensateurs.

$$I_{ps} = \frac{1,3 \cdot Q}{\sqrt{3} \cdot U}$$

couplage

Le courant I_{ps} du TC est la valeur du plus grand courant permanent pouvant circuler dans le couplage.

Courant primaire assigné (I_{pr})

Le courant assigné (I_{pr}) sera toujours supérieur ou égal au courant de service (I) de l'installation.

■ Valeurs normalisées :

10 - 12,5 - 15 - 20 - 25 - 30 - 40 - 50 - 60 - 75 et leurs multiples et sous-multiples.

■ Pour les comptages et les protections ampèremétriques usuelles, le courant primaire assigné ne doit pas dépasser 1,5 fois le courant de service.

Dans le cas de protection, il faut vérifier que le courant assigné choisi permet, en cas de défaut, d'atteindre le seuil de réglage du relais.

Nota: les transformateurs de courant doivent supporter en permanence 1,2 fois le courant assigné et ceci conformément à la norme.

Exemple :

Une protection thermique moteur a une gamme de réglage comprise entre 0,6 et 1,2 • I_{TC}. Pour bien protéger ce moteur, le réglage souhaité doit correspondre au courant assigné du moteur.

■ Supposons un I_r moteur = 45 A, le réglage souhaité est donc 45 A ;

si nous utilisons un TC 100/5, le relais ne verra jamais 45 A car : 100 • 0,6 = 60 > 45 A.

si par contre, nous choisissons un TC 75/5, on aura :

$$0,6 < \frac{45}{75} < 1,2$$

donc nous pourrions régler notre relais. Ce TC convient.

Dans le cas de température ambiante supérieure à 40 °C au niveau du TC, le courant nominal du TC (I_{pn}) devra être supérieur au I_{ps} multiplié par le facteur de déclassement correspondant à la cellule.
En règle générale, le déclassement est de 1 % de I_{pn} par degré au-delà de 40 °C. (voir chapitre "Déclassement" du guide).

Courant de court-circuit thermique assigné (I_{th})

Le courant de court-circuit thermique assigné est en général la valeur efficace du courant de court-circuit maximale de l'installation et la durée de celui-ci est généralement prise égale à 1 s.

■ Chaque TC doit pouvoir supporter thermiquement et dynamiquement le courant de court-circuit établi qui peut traverser son primaire jusqu'à la coupure effective du défaut.

■ Si S_{cc} est la puissance de court-circuit du réseau exprimée en MVA, alors :

$$I_{th} = \frac{S_{cc}}{U \cdot \sqrt{3}}$$

■ Lorsque le TC est installé dans une cellule protégée par fusibles, I_{th} à prendre en compte est égal à 80 Ir.

■ Si $80 I_r > I_{th}$ 1 s de l'appareil de sectionnement, alors I_{th} 1 s du TC = I_{th} 1 s de l'appareil.

Exemple :

■ $S_{cc} = 250 \text{ MVA}$

■ $U = 15 \text{ kV}$

$$I_{th1s} = \frac{S_{cc} \cdot 10^3}{U \cdot \sqrt{3}} = \frac{250 \cdot 10^3}{15 \cdot \sqrt{3}} = 9600 \text{ A}$$

Coefficient de surintensité (K_{si})

Le connaître permet de savoir si un TC sera plus ou moins facile à fabriquer.

■ Il est égale à :

$$K_{si} = \frac{I_{th1s}}{I_{pr}}$$

■ Plus K_{si} est faible, plus le TC sera facile à fabriquer.

Un K_{si} élevé entraîne un surdimensionnement de la section des enroulements primaires. Le nombre de spires primaires sera limité ainsi que la force électromotrice induite ; le TC sera d'autant plus difficile à réaliser.

Ordre de grandeur K_{si}	Fabrication
$K_{si} < 100$	standard
$100 < K_{si} < 300$	parfois difficile pour certaines caractéristiques secondaires
$100 < K_{si} < 400$	difficile
$400 < K_{si} < 500$	limitée à certaines caractéristiques secondaires
$K_{si} > 500$	très souvent impossible

Les circuits secondaires d'un TC doivent être adaptés aux contraintes liées à son utilisation soit en mesure soit en protection.

Caractéristiques du circuit secondaire selon normes CEI

Courant secondaire assigné (I_{sr}) 5 ou 1 A ?

■ **Cas général :**

- pour une utilisation en **local** $I_{sr} = 5 \text{ A}$
- pour une utilisation à **distance** $I_{sr} = 1 \text{ A}$

■ **Cas particulier :**

- pour une utilisation en local** $I_{sr} = 1 \text{ A}$

Nota : l'emploi de 5 A pour une utilisation à distance n'est pas interdit mais entraîne une augmentation des dimensions du transformateur et de la section des fils, (pertes en lignes : $P = R I^2$).

Classe de précision (cl)

- Comptage : classe 0,5
- Mesure sur le tableau : classe 1
- Protection ampèremétrique : classe 10P parfois 5P
- Protection différentielle : classe X
- Protection homopolaire : classe 5P.

Puissance réelle que devra fournir le TC en VA

C'est la somme de la consommation de la filerie et des consommations de chaque appareil accordé sur le secondaire du TC.

- **Consommation de la filerie en cuivre** (pertes en ligne de la filerie), sachant que : $P = R \cdot I^2$ et $R = r \cdot L/S$ alors :

$$(VA) = k \cdot \frac{L}{S}$$

k = 0,44 :	si $I_{sr} = 5 \text{ A}$
k = 0,0176 :	si $I_{sr} = 1 \text{ A}$
L :	longueur en mètres des conducteurs de liaison (aller/retour)
S :	section du fil en mm^2

- **Consommation des appareils de mesure ou de protection.**

Les consommations des différents appareils sont indiquées sur les fiches techniques du constructeur.

Puissance de précision

Prendre la valeur normalisée immédiatement supérieure à la puissance réelle que devra fournir le TC.

- Les valeurs normalisées de la puissance de précision sont : **2,5 - 5 - 10 - 15 - 30 VA.**

Facteur de sécurité en mesure (FS)

■ La protection des appareils de mesure en cas de défaut est définie par le facteur de sécurité **FS**. La valeur de **FS** sera choisie en fonction de la tenue au courant de courte durée des récepteurs : 5 - FS - 10. **FS** est le rapport entre le courant limite primaire assigné (I_{pl}) et le courant primaire assigné (I_{pr}).

$$FS = \frac{I_{pl}}{I_{pr}}$$

- I_{pl} est la valeur du courant primaire pour lequel l'erreur de courant secondaire est = 10 %.

Exemple :

■ Section filerie :	2,5 mm^2
■ Longueur de la filerie (aller/retour) :	5,8 m
■ Puissance consommée par la filerie :	1 VA

■ Un ampèremètre est généralement garanti pour supporter un courant de courte durée de 10 I_r soit 50 A pour un appareil 5 A.
Pour être sûr que cet appareil ne soit pas détruit en cas de défaut primaire, le transformateur de courant devra saturer avant 10 I_r secondaire. Un FS de 5 convient.

■ Conformément à la norme, les TC Schneider Electric ont un FS ≤ 10. Toutefois, en fonction des caractéristiques du récepteur, un FS inférieur peut être demandé.

Facteur limite de précision en protection (FLP)

En protection, nous avons deux contraintes : avoir un facteur limite de précision et une classe de précision adaptés à l'utilisation.

Le FLP nécessaire à notre besoin sera déterminé comme suit :

Protection à maximum de I à temps constant.

■ Le relais fonctionnera parfaitement si :

$$FLP_{\text{réel du TC}} > 2 \cdot \frac{I_{re}}{I_{sr}}$$

I _{re}	:	seuil de réglage du relais
I _{sr}	:	courant secondaire assigné du TC

■ Pour un relais à deux seuils de réglage, nous utiliserons le seuil le plus élevé,

□ pour un départ transformateur, on aura en général un seuil haut instantané réglé à 14 I_r maximum, d'où le FLP réel nécessaire > **28**

□ pour un départ moteur, on aura en général un seuil haut réglé à 8 I_r maximum, d'où le FLP réel nécessaire > **16**.

Protection à maximum de I à temps inverse

■ Dans tous les cas, se référer à la fiche technique du fabricant de relais.
Pour ces protections, le TC doit garantir la précision pour toute la courbe de déclenchement du relais jusqu'à 10 fois le courant de réglage.

$$FLP_{\text{réel}} > 20 \cdot I_{re}$$

■ Cas particuliers :

□ si le courant de court-circuit maximum est supérieur ou égal à 10 I_{re} :

$$FLP_{\text{réel}} > 20 \cdot \frac{I_{re}}{I_{sr}}$$

I _{re}	:	seuil de réglage du relais
-----------------	---	----------------------------

□ si le courant de court-circuit maximum est inférieur à 10 I_{re} :

$$FLP_{\text{réel}} > 2 \cdot \frac{I_{cc \text{ secondaire}}}{I_{sr}}$$

□ si la protection a un seuil instantané haut utilisé, (jamais vrai sur des départs vers d'autres tableaux ou sur des arrivées) :

$$FLP_{\text{réel}} > 2 \cdot \frac{I_{r2}}{I_{sr}}$$

I _{r2}	:	seuil de réglage du module instantané haut
-----------------	---	--

Protection différentielle

De nombreux fabricants de relais de protections différentielles préconisent des TC en classe X.

- La classe X est souvent demandée sous la forme :

$$VK \leq a \cdot I_f(R_{cl} + R_b + R_r)$$

La formule exacte est donnée par le constructeur du relais.

Valeurs caractérisant le TC

V_k	:	tension de coude ou Knee-point voltage en volts
a	:	coefficient tenant compte de l'asymétrie
R_{ct}	:	résistance maxi. de l'enroulement secondaire en Ohm
R_b	:	résistance de la boucle (ligne aller retour) en Ohm
R_r	:	résistance des relais non située dans la partie différentielle du circuit en Ohm
I_f	:	valeur du courant de défaut maximum vu par le TC au circuit secondaire pour un défaut externe à la zone à protéger
		$I_f = \frac{I_{cc}}{K_n}$
I_{cc}	:	courant de court-circuit primaire
K_n	:	rapport de transformation du TC

Quelles valeurs pour I_f dans la détermination du V_k ?

- Le courant de court-circuit est choisi en fonction de l'application :
 - différentielle groupe
 - différentielle moteur
 - différentielle transformateur
 - différentielle barres.

■ Pour une différentielle groupe :

- si I_{cc} est connu : I_{cc} courant de court-circuit du groupe seul

$$I_f = \frac{I_{cc}}{K_n}$$

- si le $I_{r\text{ groupe}}$ est connu : on prendra par excès

$$I_f = \frac{7 \cdot I_{r\text{ groupe}}}{K_n}$$

- si le $I_{r\text{ groupe}}$ n'est pas connu : on prendra par excès

$$I_f = 7 \cdot I_{sr(TC)}$$

$$I_{sr(TC)} = 1 \text{ ou } 5A$$

■ Pour une différentielle moteur :

- si le courant de démarrage est connu : on prendra

$$I_{cc} = I_{démarrage}$$

$$I_f = \frac{I_{cc}}{K_n}$$

- si le $I_{r\text{ moteur}}$ est connu : on prendra par excès

$$I_f = \frac{7 \cdot I_r}{K_n}$$

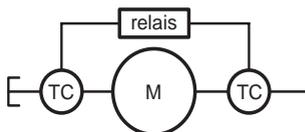
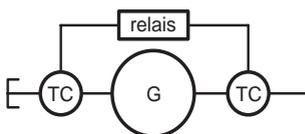
- si le $I_{r\text{ moteur}}$ n'est pas connu : on prendra par excès

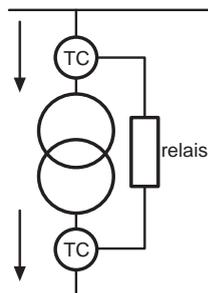
$$I_f = 7 \cdot I_{sr(TC)}$$

$$I_{sr(TC)} = 1 \text{ ou } 5A$$

Rappel

I_r : courant assigné





■ Pour une différentielle transformateur

Le I_{cc} à prendre en compte est celui qui traverse les TC pour un défaut côté récepteur. Dans tous les cas, la valeur du courant de défaut I_r est inférieure à $20 I_{sr(TC)}$.

□ si on ne connaît pas la valeur exacte, on prendra par excès :

$$I_r = 20 I_{sr(TC)}$$

■ Pour une différentielle barres

□ le I_{cc} à prendre en compte est le I_{th} du tableau

$$I_r = \frac{I_{th}}{K_n}$$

■ Pour une différentielle ligne

Le I_{cc} à prendre en compte est le I_{cc} calculé à l'autre extrémité de la ligne, donc limité par l'impédance du câble. Si l'impédance du câble n'est pas connue, on prendra par excès le I_{th} du tableau.

On peut laisser un transformateur de tension en circuit ouvert sans danger mais il ne devra jamais être en court-circuit.*



Le transformateur de tension est destiné à donner au secondaire une tension secondaire proportionnelle à celle qui est appliquée au primaire.

Nota : la norme CEI 60 186 définit les conditions auxquelles répondent les transformateurs de tension.

Il est constitué d'un enroulement primaire, d'un circuit magnétique, d'un ou plusieurs enroulements secondaires, le tout enrobé dans une résine isolante.

Caractéristiques

Le facteur de tension assigné (KT)

Le facteur de tension assigné est le facteur par lequel il faut multiplier la tension primaire assignée pour déterminer la tension maximale pour laquelle le transformateur doit répondre aux prescriptions d'échauffement et de précision spécifiées. Suivant les conditions de mise à la terre du réseau, le transformateur de tension doit pouvoir supporter cette tension maximale pendant le temps nécessaire à l'élimination du défaut.

Valeurs normales du facteur de tension assigné		
Facteur de tension assigné	Durée assignée	Mode de connexion de l'enroulement primaire et conditions de mise à la terre du réseau
1,2	continue	entre phases d'un réseau quelconque entre point neutre de transformateurs en étoiles et terre dans un réseau quelconque
1,2	continue	entre phase et terre dans un réseau à neutre effectivement à la terre
1,5	30 s	
1,2	continue	entre phase et terre dans un réseau à neutre non effectivement à la terre avec élimination automatique du défaut à la terre
1,9	30 s	
1,2	continue	entre phase et terre dans un réseau à neutre isolé sans élimination automatique du défaut à la terre, ou dans un réseau compensé par bobine d'extinction sans élimination automatique du défaut à la terre
1,9	8 h	

Nota : des durées assignées réduites sont admissibles par accord entre le constructeur et l'utilisateur.

Généralement, les fabricants de transformateurs de tension respectent pour les TT phase/terre 1,9 durant 8 h et pour les TT phase/phase 1,2 continu.

Tension primaire assignée (U_{pr})

■ Suivant leur conception, les transformateurs de tension seront raccordés :

□ soit entre phase et terre

$$U_{pr} = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

□ soit entre phase et phase

$$U_{pr} = U$$

La tension secondaire assignée (Usr)

- Pour les TT phase/phase la tension secondaire assignée est 100 ou 110 V.
- Pour les transformateurs monophasés destinés à être branchés entre phase et terre, la tension secondaire assignée doit être divisée par $\sqrt{3}$.

$$\text{Exemple : } \frac{100V}{\sqrt{3}}$$

La puissance de précision

Exprimée en VA, elle est la puissance apparente que le transformateur de tension peut fournir au secondaire lorsqu'il est branché sous sa tension primaire assignée et raccordé à sa charge de nominale.

Elle ne doit pas introduire d'erreur dépassant les valeurs garanties par la classe de précision. ($S = \sqrt{3} UI$ en triphasé)

- Les valeurs normalisées sont :
10 - 15 - 25 - 30 - 50 - 75 - 100 - 150 - 200 - 300 - 400 - 500 VA.

La classe de précision

Elle définit les limites d'erreurs garanties sur le rapport de transformation et sur la phase dans des conditions spécifiées de puissance et de tension.

Mesure suivant CEI 60 186

Les classes 0,5 et 1 répondent à la majorité des cas, la classe 3 et très peu usitée.

Application	Classe de précision
pas utilisée industriellement	0,1
comptage précis	0,2
comptage courant	0,5
comptage statistique et/ ou mesure	1
mesure ne nécessitant pas de grande précision	3

Protection suivant CEI 60 186

Les classes 3P et 6P existent mais **en pratique seule la classe 3P est utilisée.**

- La classe de précision est garantie pour les valeurs :
 - de tensions comprises entre 5 % de la tension primaire et la valeur maximale de cette tension qui est le produit tension primaire par le facteur de tension assigné ($kT \times U_{pr}$)
 - pour une charge au secondaire comprise entre 25 % et 100 % de la puissance de précision avec un facteur de puissance de 0,8 inductif.

Classe de précision	Erreur de tension en \pm %		Déphasage en minutes	
	entre 5 % de U_{pr} et $kT \cdot U_{pr}$	entre 2 % et 5 % de U_{pr}	entre 5 % de U_{pr} et $kT \cdot U_{pr}$	entre 2 % et 5 % de U_{pr}
3P	3	6	120	240
6P	6	12	24	480

U_{pr} = tension primaire assignée

kT = facteur de tension

déphasage = voir explication ci-après

Le rapport de transformation (K_n)

$$K_n = \frac{U_{pr}}{U_{sr}} = \frac{N_1}{N_2} \text{ pour un TT}$$

L'erreur sur le rapport de tension

Elle est l'erreur que le transformateur introduit dans la mesure de la tension.

$$\text{erreur de tension (\%)} = \frac{(K_n U_{sr} - U_{pr}) \cdot 100}{U_{pr}}$$

K_n = rapport de transformation

L'erreur de phase ou déphasage

Elle est la différence de phase entre la tension primaire U_{pr} et secondaire U_{sr} . Elle est exprimée en minutes d'angle.

La puissance thermique limite ou puissance d'échauffement

C'est la puissance apparente que le transformateur peut fournir en régime continu à sa tension secondaire assignée sans dépasser les limites d'échauffement fixées par les normes.

Introduction

Les différentes normes ou recommandations imposent des limites de validité des caractéristiques des appareils.

Les conditions normales d'utilisation sont décrites dans le chapitre "Disjoncteur moyenne tension".

Au-delà de ces limites, il est nécessaire de réduire certaines valeurs, c'est-à-dire de les déclasser.

■ Les déclassements sont à prévoir :

- sur le niveau d'isolement, pour des altitudes supérieures à 1 000 mètres
 - sur le courant assigné, lorsque la température ambiante dépasse 40 °C et pour un degré de protection au-delà de IP3X, (voir chapitre "Degrès de protection").
- Ces différents déclassements peuvent être cumulés si nécessaire.

Nota : il n'y a pas de norme traitant spécifiquement du déclassement.

Cependant, le tableau V § 442 de la CEI 60 694 traite des échauffements et donne des valeurs limites de température à ne pas dépasser en fonction de l'organe, du matériau et du diélectrique.

Déclassement du niveau d'isolement en fonction de l'altitude

Les normes prévoient un déclassement pour tout matériel installé à une altitude supérieure à 1 000 mètres.

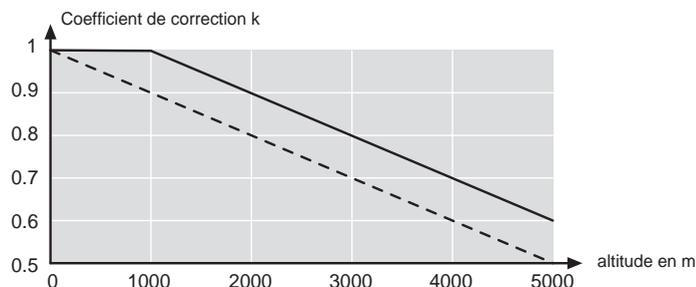
En règle générale, il faut déclasser de 1,25 % U crête tous les 100 mètres au-delà de 1 000 mètres.

Il est applicable sur la tenue à la tension au choc de foudre et sur la tenue à tension à fréquence industrielle 50 Hz - 1 mn. L'altitude n'a aucune incidence sur la tenue diélectrique des disjoncteurs dans le SF6 ou vide car ils sont sous enveloppe étanche. Ce déclassement, par contre, doit être pris en compte lorsque le disjoncteur est installé dans des cellules. L'isolement s'effectue dans ce cas dans l'air.

■ Merlin Gerin utilise les coefficients de correction :

- pour les disjoncteurs hors cellule, utiliser la courbe ci-dessous
- pour les disjoncteurs en cellule, se référer au tableau de choix de la cellule (le déclassement dépend de la conception de la cellule).

Exception du marché mexicain : le déclassement commence depuis zéro mètre (cf. courbe pointillée ci-dessous).



Exemple d'application :

Un matériel de tension assigné 24 kV peut-il être installé à 2500 mètres ?

La tenue à l'onde de choc demandée est de 125 kV.

La tenue à fréquence industrielle 50 Hz est de 50 kV. 1 mn.

■ Pour 2500 m :

- k est égal à 0,85
- la tenue à l'onde de choc doit être de $125/0,85 = 147,05$ kV
- la tenue à fréquence industrielle 50 Hz doit être de $50/0,85 = 58,8$ kV

■ Non, le matériel qui doit être installé est :

- tension assignée = 36 kV
- tenue à l'onde de choc = 170 kV
- tenue à 50 Hz = 70 kV

Nota :

si nous ne voulons pas fournir du matériel 36 kV, nous devons avoir en possession les certificats d'essais prouvant que notre matériel répond à la demande.

Déclassement du courant assigné en fonction de la température

En règle générale, le déclassement est de 1 % de I_r par degré au-delà de 40 °C. La norme CEI 60 694 § 442 tableau 5 définit un échauffement maximal admissible pour chaque organe, matériau et diélectrique avec une température de référence ambiante de 40 °C.

■ **Cet échauffement dépend en fait de trois paramètres :**

- le courant assigné
- la température ambiante
- le type de cellule et son IP (indice de protection).

Le déclassement se fera suivant les tableaux de choix des cellules car les conducteurs extérieurs aux disjoncteurs servent de radiateur de dissipation des calories.



Unités de base

Grandeur	Symbole de la grandeur ¹	Unité	Symbole de l'unité	Dimension
Unités de base				
longueur	l, (L)	mètre	m	L
masse	m	kilogramme	kg	M
temps	t	seconde	s	T
intensité de courant électrique	I	ampère	A	I
température thermodynamique ²	T	kelvin	K	θ
quantité de matière	n	mole	mol	N
intensité lumineuse	I, (Iv)	candela	cd	J
Unités supplémentaires				
angle (angle plan)	$\alpha, \beta, \gamma \dots$	radian	rad	sans
angle solide	$\Omega, (\omega)$	stéradian	sr	sans

Grandeurs et unités courantes

Nom	Symbole	Dimension	Unité SI : nom (symbole)	Remarques et autres unités
Grandeur : espace et temps				
longueur	l, (L)	L	mètre (m)	centimètre (cm) : 1 cm = 10 ⁻² m (le micron ne doit plus être utilisé, mais le micromètre (µm))
superficie aire	A, (S)	L ²	mètre carré (m ²)	are (a) : 1 a = 10 ² m ² hectare (ha) : 1 ha = 10 ⁴ m ² (mesures agraires)
volume	V	L ³	mètre cube (m ³)	
angle plan	$\alpha, \beta, \gamma \dots$	sans	radian (rad)	grade (gr) : 1 gr = 2π rad/400 tour (tr) : 1 tr = 2π rad degré (°) : 1° = 2π rad/360 = 0,017 453 3 rad minute (') : 1' = 2π rad/21 600 = 2,908 882 10 ⁻⁴ rad seconde (") : 1" = 2π rad/1 296 000 = 4,848 137 10 ⁻⁶ rad
angle solide	$\Omega, (\omega)$	sans	stéradian (sr)	
temps	t	T	seconde (s)	minute (mn) heure (h) jour (d)
vitesse	v	L T ⁻¹	mètre par seconde (m/s)	tour par seconde (tr/s) : 1 tr/s = 2π rad/s
accélération	a	L T ⁻²	mètre par seconde carrée (m/s ²)	accélération due à la pesanteur : g = 9,80665 m/s ²
vitesse angulaire	ω	T ⁻¹	radian par seconde (rad/s)	
accélération angulaire	α	T ⁻²	radian par seconde carré (rad/s ²)	
Grandeur : masse				
masse	m	M	kilogramme (kg)	gramme (g) : 1 g = 10 ⁻³ kg tonne (t) : 1 t = 10 ³ kg
masse linéique	ρ_1	L ⁻¹ M	kilogramme par mètre (kg/m)	
masse surfacique	ρ_A (ps)	L ⁻² M	kilogramme par mètre carré (kg/m ²)	
masse volumique	ρ	L ⁻³ M	kilogramme par mètre cube (kg/m ³)	
volume massique	v	L ³ M ⁻¹	mètre cube par kilogramme (m ³ /kg)	
concentration	ρ_B	M L ⁻³	kilogramme par mètre cube (kg/m ³)	concentration en masse du constituant B (suivant NF X 02-208)
densité	d	sans	sans	
Grandeur : phénomènes périodiques				
période	T	T	seconde (s)	
fréquence	f	T ⁻¹	hertz (Hz)	1 Hz = 1s ⁻¹ , f = 1/T
déphasage	φ	sans	radian (rad)	
longueur d'onde	λ	L	mètre (m)	l'emploi de l'angström (10 ⁻¹⁰ m) est interdit. L'utilisation du sous-multiple nanomètre (10 ⁹ m) est recommandée $\lambda = c/f = cT$ (c = célérité de la lumière)
niveau de puissance	Lp	sans	décibel (dB)	

¹ le symbole entre parenthèses peut aussi être utilisé

² la température Celsius t est liée à la température thermodynamique T par la relation : t = T - 273,15 K

Nom	Symbole	Dimension	Unité SI : nom (symbole)	Remarques et autres unités
Grandeur : mécanique				
force	F	$L M T^{-2}$	newton	$1 N = 1 m.kg/s^2$
poids	G, (P, W)			
moment d'une force	M, T	$L^2 M T^{-2}$	newton-mètre (N.m)	N.m et non m.N pour éviter toute confusion avec le millinewton
tension superficielle	γ, σ	$M T^{-2}$	newton par mètre (N/m)	$1 N/m = 1 J/m^2$
travail	W	$L^2 M T^{-2}$	joule (J)	$1 J : 1 N.m = 1 W.s$
énergie	E	$L^2 M T^{-2}$	joule (J)	wattheure (Wh) : $1 Wh = 3,6 \cdot 10^3 J$ (utilisé dans le domaine de la consommation d'énergie électrique)
puissance	P	$L^2 M T^{-3}$	watt (W)	$1 W = 1 J/s$
contrainte	σ, τ	$L^{-1} M T^{-2}$	pascal (Pa)	$1 Pa = 1 N/m^2$
pression	p			(pour la pression dans les fluides on utilise le bar (bar) : $1 bar = 10^5 Pa$)
viscosité dynamique	η, μ	$L^{-1} M T^{-1}$	pascal-seconde (Pa.s)	$1 P = 10^{-1} Pa.s$ (P = poise, unité CGS)
viscosité cinématique	v	$L^2 T^{-1}$	mètre carré par seconde (m ² /s)	$1 St = 10^{-4} m^2/s$ (St = stokes, unité CGS)
quantité de mouvement	p	$L M T^{-1}$	kilogramme-mètre par seconde (kg.m/s)	$p = mv$
Grandeurs : électricité				
intensité de courant	I	I	ampère (A)	
charge électrique	Q	TI	coulomb (C)	$1 C = 1 A.s$
potentiel électrique	V	$L^2 M T^{-3} I^{-1}$	volt (V)	$1 V = 1 W/A$
champ électrique	E	$L M T^{-3} I^{-1}$	volt par mètre (V/m)	
résistance électrique	R	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$	ohm (Ω)	$1 \Omega = 1 V/A$
conductance électrique	G	$L^{-2} M^{-1} T^3 I^2$	siemens (S)	$1 S = 1 A/V = 1 \Omega^{-1}$
capacité électrique	C	$L^{-2} M^{-1} T^4 I^2$	farad (F)	$1 F = 1 C/V$
inductance électrique	L	$L^2 M T^{-2} I^{-2}$	henry (H)	$1 H = 1 Wb/A$
Grandeurs : électricité, magnétisme				
induction magnétique	B	$M T^{-2} I^{-1}$	tesla (T)	$1 T = 1 Wb/m^2$
flux d'induction magnétique	Φ	$L^2 M T^{-2} I^{-1}$	weber (Wb)	$1 Wb = 1 V.s$
aimantation	H_i, M	$L^{-1} I$	ampère par mètre (A/m)	
champ magnétique	H	$L^{-1} I$	ampère par mètre (A/m)	
force magnétomotrice	F, F _m	I	ampère (A)	
résistivité	ρ	$L^3 M T^{-3} I^{-2}$	ohm-mètre ($\Omega.m$)	$1 \mu\Omega.cm^2/cm = 10^{-8} \Omega.m$
conductivité	γ	$L^{-3} M^{-1} T^3 I^2$	siemens par mètre (S/m)	
permittivité	ϵ	$L^{-3} M^{-1} T^4 I^2$	farad par mètre (F/m)	
puissance active	P	$L^2 M T^{-3}$	watt (W)	$1 W = 1 J/s$
puissance apparente	S	$L^2 M T^{-3}$	voltampère (VA)	
puissance réactive	Q	$L^2 M T^{-3}$	var (var)	$1 var = 1 W$
Grandeurs : thermique				
température thermodynamique	T	θ	kelvin (K)	Kelvin et non degré kelvin ou °kelvin
température Celsius	t, θ	θ	degré Celsius (°C)	$t = T - 273,15 K$
énergie	E	$L^2 M T^{-2}$	joule (J)	
capacité thermique	C	$L^2 M T^{-2} \theta^{-1}$	joule par kelvin (J/K)	
entropie	S	$L^2 M T^{-2} \theta^{-1}$	joule par kelvin (J/K)	
capacité thermique massique	c	$L^2 T^{-2} \theta^{-1}$	watt par kilogramme-kelvin (J/(kg.K))	
conductivité thermique	λ	$L M T^{-3} \theta^{-1}$	watt par mètre-kelvin (W/(m.K))	
quantité de chaleur	Q	$L^2 M T^{-2}$	joule (J)	
flux thermique	Φ	$L^2 M T^{-3}$	watt (W)	$1 W = 1 J/s$
puissance thermique	P	$L^2 M T^{-3}$	watt (W)	
coefficient de rayonnement thermique	hr	$M T^{-3} \theta^{-1}$	watt par mètre carré-kelvin (W/(m ² .K))	

Correspondance entre unités anglo-saxonnes et unités du système international (SI)

Grandeur	Unité	Symbole	Conversion
accélération	foot per second squared	ft/s ²	1 ft/s ² = 0,304 8 m/s ²
capacité calorifique	british thermal unit per pound	Btu/lb	1 Btu/lb = 2,326 • 10 ³ J/kg
capacité thermique	british thermal unit per cubit foot.degree Fahrenheit	Btu/ft ³ .°F	1 Btu/ft ³ .°F = 67,066 1 • 10 ³ J/m ³ .°C
	british thermal unit per (pound.degree Fahrenheit)	Btu/lb.°F	1 Btu/lb.°F = 4,186 8 • 10 ³ J/(Kg.°C)
champ magnétique	oersted	Oe	1 Oe = 79,577 47 A/m
conductivité thermique	British thermal unit per square foot.hour.degree Fahrenheit	Btu/ft ² .h.°F	1 Btu/ft ² .h.°F = 5,678 26 W/(m ² .°C)
énergie	British thermal unit	Btu	1 Btu = 1,055 056 • 10 ³ J
énergie (couple)	pound force-foot	lbf.ft	1 lbf.ft = 1,355 818 J
	pound force-inch	lbf.in	1 lbf.in = 0,112 985 J
flux thermique	British thermal unit per square foot.hour	Btu/ft ² .h	1 Btu/ft ² .h = 3,154 6 W/m ²
	British thermal unit per second	Btu/s	1 Btu/s = 1,055 06 • 10 ³ W
force	pound-force	lbf	1 lbf = 4,448 222 N
longueur	foot (pied)	ft, '	1 ft = 0,304 8 m
	inch (pouce) ⁽¹⁾	in, "	1 in = 25,4 mm
	mile (UK)	mile	1 mile = 1,609 344 km
	mille marin, mille	-	1 852 m
	yard ⁽²⁾	yd	1 yd = 0,914 4 m
masse	once (ounce)	oz	1 oz = 28,349 5 g ⁽⁶⁾
	pound (livre)	lb	1 lb = 0,453 592 37 kg
masse linéique	pound per foot	lb/ft	1 lb/ft = 1,488 16 kg/m
	pound per inch	lb/in	1 lb/in = 17,858 kg/m
masse surfacique	pound per square foot	lb/ft ²	1 lb/ft ² = 4,882 43 kg/m ²
	pound per square inch	lb/in ²	1 lb/in ² = 703,069 6 kg/m ²
masse volumique	pound per cubic foot	lb/ft ³	1 lb/ft ³ = 16,018 46 kg/m ³
	pound per cubic inch	lb/in ³	1 lb/in ³ = 27,679 9 • 10 ³ kg/m ³
moment d'inertie	pound square foot	lb.ft ²	1 lb.ft ² = 42,140 g.m ²
	pression	foot of water	ft H ₂ O
pression - contrainte	inch of water	in H ₂ O	1 in H ₂ O = 2,490 89 • 10 ² Pa
	pound force per square foot	lbf/ft ²	1 lbf/ft ² = 47,880 26 Pa
pression - contrainte	pound force per square inch ⁽³⁾	lbf/in ² (psi)	1 lbf/in ² = 6,894 76 • 10 ³ Pa
	puissance calorifique	british thermal unit per hour	Btu/h
superficie	square foot	sq.ft, ft ²	1 sq.ft = 9,290 3 • 10 ⁻² m ²
	square inch	sq.in, in ²	1 sq.in = 6,451 6 • 10 ⁻⁴ m ²
température	degree Fahrenheit ⁽⁴⁾	°F	T _K = 5/9 (q °F + 459,67)
	degree Rankine ⁽⁵⁾	°R	T _K = 5/9 q °R
viscosité	pound force-second per square foot	lbf.s/ft ²	1 lbf.s/ft ² = 47,880 26 Pa.s
	pound per foot-second	lb/ft.s	1 lb/ft.s = 1,488 164 Pa.s
volume	cubic foot	cu.ft	1 cu.ft = 1 ft ³ = 28,316 dm ³
	cubic inch	cu.in, in ³	1 in ³ = 1,638 71 10 ⁻⁵ m ³
	fluid ounce (UK)	fl oz (UK)	fl oz (UK) = 28,413 0 cm ³
	fluid ounce (US)	fl oz (US)	fl oz (US) = 29,573 5 cm ³
	gallon (UK)	gal (UK)	1 gaz (UK) = 4,546 09 dm ³
	gallon (US)	gal (US)	1 gaz (US) = 3,785 41 dm ³

⁽¹⁾ 12 in = 1 ft

⁽²⁾ 1 yd = 36 in = 3 ft

⁽³⁾ Ou p.s.i. : pound force per square inch

⁽⁴⁾ T_K = temperature kelvin avec q°C = 5/9 (q°F - 32)

⁽⁵⁾ °R = 5/9 °K

⁽⁶⁾ Hors masse des métaux précieux (argent, or, par exemple) où l'once d'apothicaire est utilisée (1 oz ap = 3,110 35 10⁻² kg)



Où commander
les publications CEI ?

**Bureau Central de la Commission
Electrotechnique Internationale**
1, rue de Varembe Genève - Suisse.

Le Service documentation (Usine A2)
de Merlin Gerin vous fournira des
informations sur les normes.



●	■ Vocabulaire Electrotechnique International	CEI 60 050
●	■ Les disjoncteurs à courant alternatif à haute tension	CEI 60 056
●	■ Transformateurs de courant	CEI 60 185
●	■ Transformateurs de tension	CEI 60 186
●	■ Sectionneurs à courant alternatif et sectionneurs de terre	CEI 60 129
●	■ Interrupteurs à haute tension	CEI 60 265
●	■ Appareillage sous enveloppe métallique pour courant alternatif de tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 72,5 kV	CEI 60 298
●	■ Combinés interrupteurs-fusibles et combinés disjoncteurs-fusibles à courant alternatif à haute tension	CEI 60 420
●	■ Contacteurs haute tension à courant alternatif	CEI 60 470
●	■ Spécifications communes aux normes de l'appareillage à haute tension	CEI 60 694
●	■ Règles de calcul dans les installations industrielles	CEI 60 909
●	■ Déclasséments	ANSI C37 04

Le comparatif qui suit est basé sur les différentes caractéristiques des disjoncteurs.



Synthèse des principales différences

Thème	ANSI	CEI
pouvoir de coupure asymétrique sur défauts aux bornes	50 % avec déclassement de courant	30 % sans déclassement
niveau d'isolement : onde de choc	impose des ondes coupées pour le matériel d'extérieur 115 % $U_w/3$ s 129 % $U_w/2$ s	
valeur de crête du courant de courte durée admissible	2,7 I_{cc}	2,5 I_{cc} en 50 Hz 2,6 I_{cc} en 60 Hz 2,7 I_{cc} cas particulier
Tension Transitoire de Rétablissement ⁽¹⁾	environ 2 fois plus sévère	
endurance électrique	4 fois $K.S.I_{cc}$	3 fois I_{cc}
endurance mécanique	1 500 à 10 000 suivant U_a et I_{cc}	2 000
surtensions moteurs	pas de texte	circuit d'essais type

⁽¹⁾ tension crête ANSI est supérieure de 10% à la tension définie par la CEI.
La pente $E2/t2$ est plus forte de 50% que la pente $Uc/t3$.
Par contre, la partie la plus importante de la courbe est la partie initiale où le SF6 se reconstitue. Les deux normes permettent facilement au SF6 de se reconstituer.

Tensions assignées

Suivant CEI

- Valeurs normalisées pour U_r (kV) : 3,6 - 7,2 - 12 - 17,5 - 24 - 36 kV

Suivant ANSI

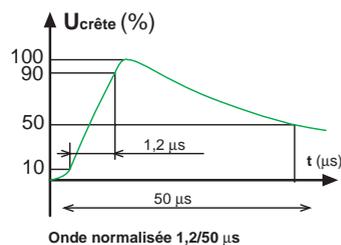
- La norme ANSI définit une classe et un facteur de tension "voltage range factor K" qui définit une plage de tension assignée à **puissance constante**.

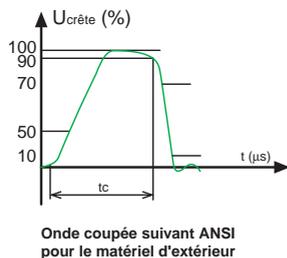
	Valeurs normalisées pour U_r (kV)			
	classe (kV)	U_{max} (kV)	U_{min} (kV)	K
Matériel d'intérieur	4,16	4,76	3,85	1,24
	7,2	8,25	6,6	1,25
	13,8	15	11,5	1,3
Matériel d'extérieur	38	38	23	1,65
	15,5			1
	25			1
	38			1

Niveau d'isolement assigné

Suivant CEI

Tension assignée (kV)	Tenue à l'onde de choc (kV)	fréquence industrielle (kV)
7,2	60	20
12	75	28
17,5	95	38
24	125	50
36	170	70





Suivant ANSI

Tension assignée (kV)	Tenue à l'onde de choc (kV)	fréquence industrielle (kV)
Matériel d'intérieur		
4,16	60	19
7,2	95	36
13,8	95	36
38	150	80
Matériel d'extérieur		
15,5	110	50
25,8	125	60
	150	
38	150	80
	200	

Nota

■ BIL : Basic Insulation Level

Le matériel d'extérieur est essayé avec des ondes coupées.

■ La tenue à l'onde de choc est égale à :

1,29 BIL pour une durée $t_c = 2 \mu s$

1,15 BIL pour une durée $t_c = 3 \mu s$

Courant assigné en continu

Suivant CEI

■ Valeurs des courants assignés : 400 - 630 - 1250 - 1600 - 2500 - 3150 A

Suivant ANSI

■ Valeurs des courants assignés : 1200 - 2000 - 3000 A

Courant de courte durée admissible

Suivant CEI

■ Valeurs de pouvoir de coupure assigné en court-circuit :

6,3 - 8 - 10 - 12,5 - 16 - 20 - 25 - 31,5 - 40 - 50 - 63 kA

Suivant ANSI

■ Valeurs de pouvoir de coupure assigné en court-circuit :

□ matériel d'intérieur : 12,5 - 20 - 25 - 31,5 - 40 kA

□ matériel d'extérieur :

Classe (MVA)	Pouvoir de coupure (kA)	
	I à U_{max}	KI à U^2
250	29	36
350	41	49
500	18	23
750	28	36
1000	37	46
1500	21	35
2750	40	40

Valeur crête du courant admissible et pouvoir de fermeture

Suivant CEI

- La valeur crête du courant de courte durée admissible est égale à :
 - $2,5 \cdot I_{cc}$ en 50 Hz
 - $2,6 \cdot I_{cc}$ en 60 Hz
 - $2,7 \cdot I_{cc}$ cas particulier.

Suivant ANSI

- La valeur crête du courant de courte durée admissible et égale à :
 - $2,7 \cdot K \cdot I_{cc}$ en valeur crête
 - $1,6 \cdot K \cdot I_{cc}$ en valeur efficace.
 (K : facteur de tension)

Durée de court-circuit assignée

Suivant CEI

- La durée de court-circuit assignée est égale à **1 ou 3 secondes**.

Suivant ANSI

- La durée de court-circuit assignée est égale à **3 secondes**.

Tension assignée d'alimentation des dispositifs de fermeture, d'ouverture et de circuits auxiliaires

Suivant CEI

- Valeurs de tension d'alimentation des circuits auxiliaires :
 - en courant continu (cc) : **24 - 48 - 60 - 110 ou 125 - 220 ou 250 volts**
 - en courant alternatif (ca) : **120 - 220 - 230 - 240 volts**.
- Les tensions de fonctionnement doivent se trouver dans les plages suivantes :
 - moteur et déclencheurs de fermeture : **-15 % à +10 % de U_r** en cc et ca
 - déclencheurs d'ouverture : **-15 % à +10 % de U_r** en ca ; **-30 % à +10 % de U_r** en cc
 - déclencheurs d'ouverture à minimum de tension



Suivant ANSI

- Valeurs de tension d'alimentation des circuits auxiliaires :
 - en courant continu (cc) : **24 - 48 - 125 - 250 volts**.
 - en courant alternatif (ca) : **120 - 240 volts**

- Les tensions de fonctionnement doivent se trouver dans les plages suivantes :

Tension	Plage de tension (V)
Moteur et déclencheurs de fermeture	
48 Vcc	36 à 56
125 Vcc	90 à 140
250 Vcc	180 à 280
120 Vca	104 à 127
240 Vca	208 à 254
Déclencheurs d'ouverture	
24 Vcc	14 à 28
48 Vcc	28 à 56
125 Vcc	70 à 140
250 Vcc	140 à 220
120 Vca	104 à 127
240 Vca	208 à 254

Fréquence assignée

Suivant CEI

- Fréquence assignée : **50 Hz.**

Suivant ANSI

- Fréquence assignée : **60 Hz.**

Pouvoir de coupure en court-circuit à la séquence de manœuvre assignée

- L'ANSI spécifie 50% d'asymétrie et la CEI 30 %. Dans 95 % des applications, 30 % suffisent. Quand 30 % est trop faible, il s'agit de cas spécifiques (proximité de générateurs) pour lequel l'asymétrie peut être supérieure à 50 %.

- Pour les deux systèmes de normes, le concepteur doit vérifier le pouvoir de coupure du disjoncteur. La différence n'est pas importante car sans tenir compte du facteur d'asymétrie "S", elle est égale à 10 %.

$$\text{ANSI : } I_{\text{asym}} = I_{\text{sym}} \sqrt{(1 + 2A^2)} = 1,22 I_{\text{sym}} \text{ (A = 50\%)}$$

$$\text{CEI : } I_{\text{asym}} = I_{\text{sym}} \sqrt{(1 + 2A^2)} = 1,08 I_{\text{sym}} \text{ (A = 30\%)}$$

Suivant CEI

- Les essais de coupure en court-circuit doivent répondre aux 5 séquences d'essais suivantes :

Séquence n°	% I _{sym}	% composante apériodique
1	10	≤ 20
2	20	≤ 20
3	60	≤ 20
4	100	≤ 20
5*	100	30

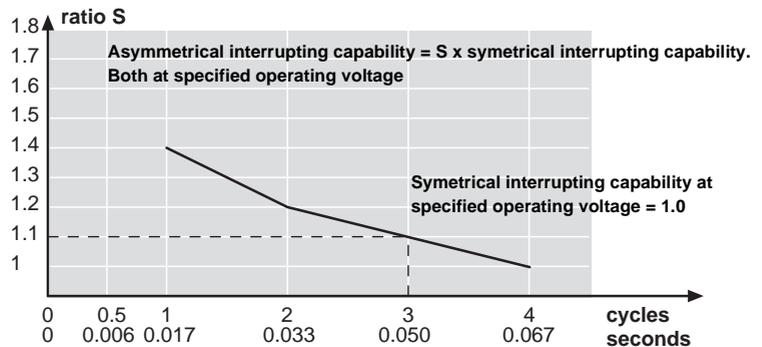
* pour des disjoncteurs ouvrant en moins de 80 ms

Suivant ANSI

- Le disjoncteur doit savoir couper :
 - le courant de court-circuit (rated short circuit current) à la tension maximale de service (rated maxi voltage)
 - K fois le courant de court-circuit (maxi symmetrical interrupting capability avec K : voltage range factor) à la tension de service (tension maxi/K)
 - entre les deux courants obtenus par la relation :

$$\frac{\text{maxi symmetrical current}}{\text{rated short-circuit current}} = \frac{\text{rated maxi voltage}}{\text{rated voltage}} = K$$

On a donc une puissance de coupure constante (en MVA) sur une plage de tension donnée. De plus, le courant asymétrique sera fonction du tableau suivant en prenant S = 1,1 pour les disjoncteurs Merlin Gerin.



- Valeur de pouvoir de coupure assigné en court-circuit (kA)

Séquence n°	courant coupé	% composante apériodique
1	10	50 - 100
2	30	< 20
3	60	50 - 100
4	100	< 20
5	KI à V/K	< 20
6	SI à V	50 - 100
7	KSI à V/K	50 - 100
8	endurance électrique	
9/10	cycle de refermeture à ASI et AKSI	
11	C - 2 s - O à KI	
12	durée assignée de I _{cc} = KI durant 3 s	
13/14	essais en monophasé à KI et à KSI (0,58 V)	

Exemple :

- I_{cc} = 40 kA
- % d'asymétrie = 50%
- I_{asym} = 1,1 · 40 = 44 kA
- $$I_{sym} = \frac{44}{\sqrt{1 + 2(50\%)^2}} = \frac{44}{1,22} = 36 \text{ kA}$$
- La séquence 6 sera donc testé à 36 kA + 50% d'asymétrie, soit 44 kA de courant total.

Les essais de coupure en court-circuit doivent répondre aux 14 séquences d'essais ci-dessus, avec :

I	:	pouvoir de coupure symétrique à la tension maximale
R	:	coefficient pour cycle de réenclenchement (Reclosing factor)
K	:	voltage range factor : $K = \frac{V_{max}}{V_{min}}$
S	:	facteur d'asymétrie : $\frac{I_{asym}}{I_{sym}} = 1,1$ pour les disjoncteurs Merlin Gerin
V	:	tension maximale assignée

Coordinations des valeurs assignées

Suivant CEI

Tension assignée	Pouvoir de coupure assigné en court-circuit	Courant assigné en service continu				
U_r (kV)	I_{cc} (kA)	I_r (A)				
3,6	10	400				
	16	630 1250				
	25	1250 1600 2500				
	40	1250 1600 2500 3150				
7,2	8	400				
	12,5	400 630 1250				
	16	630 1250 1600				
	25	630 1250 1600 2500				
	40	1250 1600 2500 3150				
12	8	400				
	12,5	400 630 1250				
	16	630 1250 1600				
	25	630 1250 1600 2500				
	40	1250 1600 2500 3150				
	50	1250 1600 2500 3150				
17,5	8	400 630 1250				
	12,5	630 1250				
	16	630 1250				
	25	1250				
	40	1250 1600 2500 3150				
24	8	400 630 1250				
	12,5	630 1250				
	16	630 1250				
	25	1250 1600 2500				
	40	1250 1600 2500 3150				
36	8	630				
	12,5	630 1250				
	16	630 1250 1600				
	25	1250 1600 2500				
	40	1250 1600 2500 3150				

Suivant ANSI

Tension maximale assignée	Pouvoir de coupure assigné en court-circuit à U_{max}	Tension minimale assignée	Pouvoir de coupure assigné en court-circuit à U_{min}	Courant assigné en service continu			
U_{max} (kV)	I_{cc} (kA)	(kV)	I_{cc} (kA)	I_r (A)			
4,76	18	3,5	24	1200			
	29	3,85	36	1200 2000			
	41	4	49	1200 3000			
8,25	7	2,3	25	600 1200 2000			
	17	4,6	30	1200			
	33	6,6	41	1200 2000			
15	9,3	6,6	21	1200			
	9,8	4	37	1200			
	18	11,5	23	1200 2000			
	19	6,6	43	1200 2000			
	28	11,5	36	1200 2000			
15,5	37	11,5	48	1200 3000			
	8,9	5,8	24	600			
	18	12	23	1200			
	35	12	45	1200			
	56	12	73	2000 3000 4000			
25,8	5,4	12	12	600			
	11	12	24	1200			
38	22	23	36	1200 3000			
	36	24	57	1200			

Déclassements

Suivant CEI

- Se référer au chapitre "définition d'appareillages/Déclassements"

Suivant ANSI

- La norme ANSI C37 04 prévoit pour des températures supérieures à 1 000 mètres :

- un facteur de correction pour la tension applicable sur le niveau d'isolement assigné et sur la tension maximale assignée,
- un facteur de correction pour le courant assigné en service continu.

Le tableau des facteurs de correction en fonction de l'altitude (Altitude Corrections Factors : ACF).

Altitude (ft)	Altitude (m)	ACF for : voltage	ACF for : continuous current
3 300	1 000	1,00	1,00
5 000	1 500	0,95	0,99
10 000	3 000	0,8	0,96

Nota : pour les disjoncteurs du type à "système scellé", il n'est pas nécessaire d'appliquer le ACF voltage sur la tension maximum assignée

Endurance électrique

Les disjoncteurs Merlin Gerin assurent au minimum 15 fois I_{cc} .
Les normes CEI et ANSI imposent des valeurs beaucoup trop faibles car elles tiennent compte des disjoncteurs à coupure dans l'huile.
Ces valeurs ne sont pas importantes et il faut, dans le cas de demande client, fournir celles de l'appareil considéré.

Suivant CEI

- L'endurance électrique est égale à **3 fois I_{cc}** .

Suivant ANSI

- L'endurance électrique est égale à **4 fois K.S. I_{cc}** .

I_{cc}	:	pouvoir de coupure symétrique à la tension maximale
S	:	facteur d'asymétrie
K	:	voltage range factor

Endurance mécanique

Suivant CEI

- L'endurance mécanique est de 2 000 cycles de manœuvres.

Suivant ANSI

- L'endurance mécanique est comprise entre 1 500 et 10 000 cycles de manœuvres suivant la tension et le pouvoir de coupure.

Construction

Suivant CEI

- La CEI n'impose pas de contraintes particulières, toutefois, le fabricant a la responsabilité de déterminer ce qu'il faut comme matériau (épaisseur, etc) pour répondre à une performance de rigidité.

Suivant ANSI

- L'ANSI impose une épaisseur de 3 mm pour les tôles.

Les matériels sont conçus pour un fonctionnement normal aux conditions suivantes



Conditions normales de fonctionnement

Température

Normes	0°C ambiante instantanée	Installation	
		intérieure	extérieure
Suivant CEI	minimale	- 5 °C	- 25 °C
	maximale	+ 40 °C	+ 40 °C
	valeur maxi	35 °C	35 °C
	moyenne journalière		
Suivant ANSI	minimale	- 30 °C	
	maximale	+ 40 °C	

Nota :

Pour tout matériel fonctionnant dans d'autres conditions que celles décrites ci-dessus, un déclassement est à prévoir (voir chapitre déclassement).

Altitude

Suivant CEI

- L'altitude ne doit pas dépasser 1 000 mètres, sinon déclassement.

Suivant ANSI

- L'altitude ne doit pas dépasser 3 300 feet (1 000 mètres), sinon déclassement.

Humidité

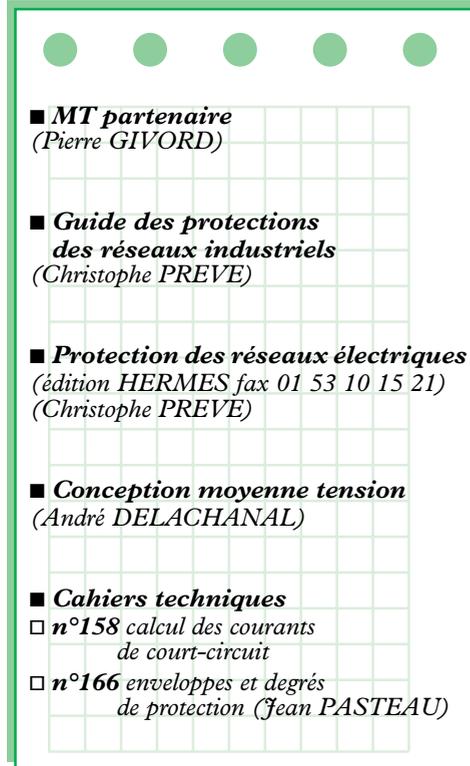
Suivant CEI

Valeur moyenne de l'humidité relative pour une période	Matériel intérieur
24 heures	95 %
1 mois	90 %

Suivant ANSI

- Pas de contraintes spécifiques.





- **MT partenaire**
(Pierre GIVORD)
- **Guide des protections
des réseaux industriels**
(Christophe PREVE)
- **Protection des réseaux électriques**
(édition HERMES fax 01 53 10 15 21)
(Christophe PREVE)
- **Conception moyenne tension**
(André DELACHANAL)
- **Cahiers techniques**
 - n°158 calcul des courants
de court-circuit
 - n°166 enveloppes et degrés
de protection (Jean PASTEAU)



Dénominations	pages		pages
A		Crête	50
Accélération	67-69	Cubic foot	69
Accélération angulaire	67	Cubic inch	69
Aimantation	68	D	
Aire	67	Déclassements	64-65-78
Altitude	53-79	Degré de protection	41-43
Angle	67	Degree Fahrenheit	69
Angle plan	67	Degree Rankine	69
Angle solide	67	Densité	67
Arcs en défaut	16	Déphasage	63-67
B		Différentielle(s)	59-60
Batterie	51-52	Différentielle transformateur	60
Blindé	10	Discordance	50
Bloc	10	Disjoncteur	45-48
British thermal unit	69	Disjoncteur débrochable	9
British thermal unit per (pound.degree fahrenheit)	69	Disjoncteur fixe	9
British thermal unit per cubic foot.degree fahrenheit	69	Disposition	29
British thermal unit per hour	69	Distances	38-39
British thermal unit per pound	69	Distances minimales	39
British thermal unit per second	69	Documentation (référence)	81
British thermal unit per square foot.hour	69	E	
British thermal unit per square foot.hour deg. fahr.	69	Echauffement	22-23
C		Effets mécaniques	21
Câbles	15-51	Effets thermiques	21
Calcul d'un effort	27	Efforts	27
Calcul des intensités	15	Efforts entre conducteurs	27
Calcul des jeux de barres	21	Endurance	53-78
Calcul en triphasé	17	Endurance électrique	53-78
Capacité	68	Endurance mécanique	53-78
Capacité calorifique	69	Energie	68-69
Capacité thermique	69	Energie (couple)	69
Cellules	10	Entre phase	39-63
Celsius	68	Entre phase et terre	39
Champ	68	Entropie	68
Champ magnétique	69	Enveloppe métallique	9
Charge	68	Environnements	40
Chocs de foudre	39	Equipements	9
Classe de précision	57-62	Erreur de phase	63
Code IK	43	Erreur sur le rapport	63
Code IP	41	Essais de choc	39
Coefficient de rayonnement	68	Exemple de calcul en triphasé	17
Coefficient de surintensité	56	F	
Comparatif	72	Facteur	49-61
Compartimenté	10	Facteur limite de précision	58
Compensateurs synchrones	16	Facteur de sécurité	57
Composante apériodique	48	Faibles courants inductifs	52
Composante périodique	48	Fermeture	52
Concentration	67	Fermeture-ouverture	47
Condensateurs	51-52	Fluid ounce (UK)	69
Condensation	38	Fluid ounce (US)	69
Conditions	52	Flux	68
Conductance	68	Flux thermique	69
Conductivité	68	Foot (pied)	69
Conductivité thermique	69	Foot of water	69
Construction	78	Foot per second squared	69
Contacteur débrochable	9	Force	68-69
Contacteur fixe	9	Forme de pièces	38-39
Contrainte	68	Fréquence	9-29-37-47-54-67
Contrainte admissible	28	Fréquence assignée	75
Contrainte résultante	28	G	
Coordination	53-77	Gallon (UK)	69
Courant	8-67-68	Gallon (US)	69
Courant assigné	8-21-24-46-73	Générateurs synchrones	14-15
Courant de court-circuit	9-19	Gradins	51
Courant de court-circuit de courte durée	26	Grandeurs	67
Courant de courte durée admissible	46-73	H	
Courant de court-circuit thermique	56	Humidité	38-53-79
Courant de service	55	I	
Courant primaire	55	Impédance équivalente	16
Court-circuit assigné	46-74	Inch (pouce)	69
		Inch of water	69

Dénominations	pages		
Inductance	68	Puissance calorifique	69
Induction	68	Puissance de court-circuit	11-21
Intensité de service	8	Puissance de précision	57-62
Interrupteur	9	Puissance réactive	68
Interrupteur sectionneur	9	Puissance thermique	63
J		Q	
Jeu de barres	15-21-28	Quantité	68
L		R	
Lignes	15-51	Rapport de transformation	63
Longueur	67-69	Refermeture automatique	48
Longueur d'onde	67	Régimes	14
Lumineuse	67	Réseau	15
M		Résistance	68
Masse	67-69	Résistivité	68
Masse linéique	29-37-67-69	Résonance	29-37
Masse surfacique	67-69	Rétablissement	49
Masse volumique	67-69	Rigidité diélectrique	38
Massique	68	S	
Matière	67	Schéma équivalent	19
Méthode des impédances	17	Section d'une barre	21
Mètre	67	Sectionneur	9
Mile (UK)	69	Sectionneur de terre	9
Mille marin, Mille	69	Séquence de manœuvre	47-75
Module d'élasticité	29-37	Seuil d'ionisation	38
Module d'inertie	28-29-37	Square foot	69
Moment d'inertie	29-69	Square inch	69
Moment d'une force	68	Superficie	67-69
Moment fléchissant	28	Supports	27-29
Moteur asynchrone	14-16	Surtensions	6
Moteurs	16	Symboles	67
Mouvement	68	Synthèse	72
N		T	
Niveau d'isolement	6	Température	38-52-69-79
Niveau d'isolement assigné	46-72	Température thermodynamique	67-68
Niveau de pollution	40	Temps	67
Niveau de puissance	67	Tension	6-49-62-68
Normes	71	Tension assignée	6-7-21-45-47-54-72-74
O		Tension de service	6-21
Oersted	69	Tension primaire	61
Once (ounce)	69	Tenue diélectrique	38-39
P		Tenue diélectrique onde de choc	7
Période	67	Tenue électrodynamique	27
Permittivité	68	Tenue mécanique des barres	28
Phénomènes périodiques	67	Tenue thermique	24
Poids	68	Thermique	56-68
Pollution	38-40	Thermodynamique	67-68
Potentiel	68	Transformateur de courant	54-55
Pound (livre)	69	Transformateur de tension	61
Pound force per square foot	69	Transformateur(s)	13-14-15
Pound force per square inch	69	Transitoire	49
Pound force-foot	69	Travail	68
Pound force-inch	69	Traversées	27-29-37
Pound force-second per square foot	69	U	
Pound per cubic foot	69	Unités	67
Pound per cubic inch	69	Unités de mesure	67
Pound per foot	69	V	
Pound per foot-second	69	Valeur crête	9-46-74
Pound per inch	69	Valeur efficace	9
Pound per square foot	69	Valeurs assignées	77
Pound per square inch	69	Vibration	29-37
Pound square foot	69	Viscosité	68-69
Pound-force	69	Vitesse	67
Pouvoir de coupure	48-50-51-75	Vitesse angulaire	67
Pouvoir de fermeture	74	Volume	67-69
Précision	57	Volume massique	67
Pression	38-68-69	Y	
Pression-contrainte	69	Yard	69
Puissance	14-68		
Puissance active	68		
Puissance apparente	68		

**Schneider Electric
Industrie SA**

Adresse postale
F-38050 Grenoble cedex 9
Tél. : +33 (0)4 76 57 60 60
<http://www.schneider-electric.com>

Les données techniques contenues dans ce guide sont transmises à titre d'information. De ce fait, la responsabilité de Schneider Electric Industries SA ne pourra être engagée en cas d'erreur ou d'omission dans le contenu de ce guide.

 Ce document a été imprimé sur du papier écologique.

ART86204

Rcs Nanterre B 954 503 439

Publication : Schneider Electric Industries SA
Création, réalisation : HeadLines
Impression :

AMTED300014FR

03/2000