

## 10.4. La protection contre les courts-circuits

### 10.4.1. Approche théorique

#### 10.4.1.1. Introduction

Un court-circuit est caractérisé par la mise en relation directe de deux points qui sont portés à des potentiels électriques différents :

- en courant alternatif : liaison entre phases, entre phase et neutre ou entre phase et masse conductrice,
- en courant continu : liaison entre les deux polarités ou entre la masse et la polarité qui en est isolée.

Le court-circuit peut avoir des causes diverses: desserrage, rupture ou dénudage de fils ou de câbles, présence de corps métalliques étrangers, dépôts conducteurs (poussières, humidité ...), pénétration d'eau ou autres liquides conducteurs, détérioration du récepteur, erreur de câblage à la mise en route ou lors d'une intervention.

Un court-circuit se traduit par une augmentation brutale du courant qui peut atteindre en quelques millisecondes une valeur égale à plusieurs centaines de fois le courant d'emploi. Ce courant engendre des effets électrodynamiques et thermiques pouvant provoquer des destructions importantes sur le matériel, les câbles et les jeux de barres situés en amont du point de court-circuit. Les dispositifs de protection doivent donc détecter le défaut et interrompre le circuit très rapidement, si possible avant que le courant n'atteigne sa valeur maximale.

Ces dispositifs peuvent être :

- des coupe-circuit fusibles qui interrompent le circuit par leur fusion, laquelle nécessite leur remplacement,
- des disjoncteurs qui interrompent le circuit par ouverture de leurs pôles et dont la remise en service ne nécessite qu'une manœuvre de ré enclenchement.

La protection contre les courts-circuits peut être intégrée à des appareils à fonctions multiples tels que les disjoncteurs-moteurs et les contacteurs-disjoncteurs, décrits au sous-chapitre "Appareils à fonctions multiples".

#### 10.4.1.2. Le courant présumé de court-circuit $I_{cc}$

C'est la valeur efficace du courant symétrique permanent qui s'établirait au point considéré du circuit si on remplaçait le dispositif de protection par un conducteur d'impédance négligeable. Cette valeur dépend uniquement de la tension d'alimentation et de l'impédance par phase  $Z_0$  (transformateur + ligne).

On démontre que le calcul d'un courant de court-circuit triphasé se ramène à celui d'un courant de court-circuit monophasé qui s'établirait entre une phase et le neutre. Il est égal au quotient de la tension simple  $E_0$  (tension entre phase et neutre) par l'impédance de ligne  $Z_0$  par phase. Cette impédance de ligne comprend les résistances  $R$  et les inductances  $L$  de tous les éléments situés en amont du court-circuit.

L'impédance de ligne s'exprime par la relation suivante :

$$Z_0 = \sqrt{(\sum R^2) + \sum L\omega^2}$$

Le courant de court-circuit a pour expression :

$$I_{cc} = \frac{E_0}{Z_0}$$

### 10.4.1.3. Courant de court-circuit d'un transformateur

C'est le courant qui serait débité par le secondaire d'un transformateur mis en court-circuit (court-circuit boulonné), le primaire étant normalement alimenté. En cas de court-circuit sur une installation, cette valeur de courant ne peut être atteinte que si le défaut se produit aux bornes du transformateur. Dans tous les autres cas, elle est limitée à une valeur inférieure par l'impédance de la ligne.

Le tableau ci-dessous donne des ordres de grandeur de courants de court-circuit pour des transformateurs de construction usuelle ayant une tension secondaire de 400 V.

S(kVA)	In (A)	I <sub>cc</sub> (kA)
80	115	3
160	230	6
315	450	12
800	1150	25
2500	3600	50

### 10.4.1.4. Effets électrodynamiques

Deux conducteurs parallèles parcourus par des courants  $i_1$  et  $i_2$  sont soumis à une force qui tend à les rapprocher si les courants sont de même sens ou à les éloigner s'ils sont de sens contraires. Les deux conducteurs font généralement partie d'un même circuit avec des courants égaux et de sens opposés. La force est alors répulsive et proportionnelle au carré du courant.

Exemple :

Sur un jeu de barres, l'effort exercé entre 2 barres longues de 1 m et distantes de 5 cm, traversées par un courant crête de 50 kA, atteint 1 000 daN ou 1 tonne-force.

Sur un pôle de contacteur, les contacts fixe et mobile se séparent sans avoir reçu d'ordre d'ouverture dès que la force de répulsion devient supérieure à l'effort exercé par le ressort de compression. Cette répulsion de contact est due à :

- l'effet de boucle : un pôle se présente comme une boucle plus ou moins partielle selon la forme des pièces qui le constituent et le modèle de contacteur; chaque pièce du pôle est soumise à une force électrodynamique dirigée vers l'extérieur de la boucle,
- la striction des lignes de courant dans la zone de contact.

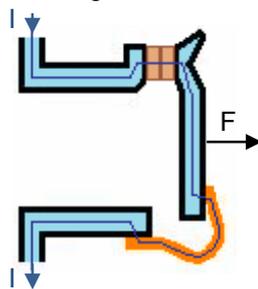


Fig. 10.4-1

Effet de boucle

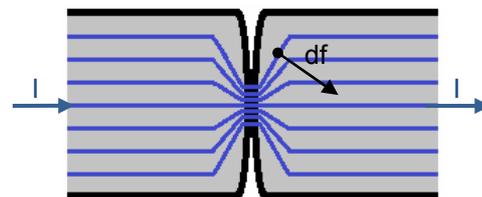


Fig. 10.4-2

Striction des lignes de courant

Les efforts électrodynamiques entraînent sur les constituants les effets suivants :

- la casse ou la déformation des pièces et des jeux de barres,
- la répulsion des contacts,
- la propagation des arcs électriques.

### 10.4.1.5. Effets thermiques

Les effets thermiques d'un court-circuit entraînent sur les constituants les conséquences suivantes :

- fusion des contacts, des enroulements de bilames, des connexions,
- calcination des matériaux isolants.

*Exemple :*

Supposons un conducteur d'une résistance de  $1\text{ m}\Omega$ , traversé par un courant efficace de  $50\text{ kA}$  pendant  $10\text{ ms}$ . L'énergie dissipée de  $2\,500\text{ joules}$  correspond à une puissance de  $250\text{ kW}$ .

Sur un contacteur tripolaire où les contacts s'ouvriraient par répulsion en générant des arcs électriques, on peut estimer que l'énergie dissipée serait plusieurs fois supérieure.

## 10.4.2. Les coupe-circuit fusibles

### 10.4.2.1. Symboles

Fig. 10.4-3a



Symbole général

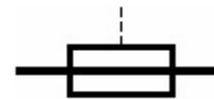


Fig. 10.4-3b

Fusible à percuteur

### 10.4.2.2. Description

Le fusible est un appareil de connexion dont la fonction est d'ouvrir par la fusion d'un de ses éléments calibrés à cet effet, le circuit dans lequel il est inséré et d'interrompre le courant lorsque celui-ci dépasse pendant un temps suffisant une valeur précise.

Le principe du fusible est basé sur la création d'un point faible dans un circuit avec un conducteur dont la nature, la section et le point de fusion sont parfaitement connus. La nature du métal fusible varie selon les types de fusibles et les fabricants (zinc, argent, aluminium, alliage d'étain, etc.), et la technologie de ce matériau est particulièrement complexe. Les premiers fusibles se présentaient sous forme d'un fil nu, dont la couleur et la ductilité rappelaient le plomb.

Cet élément se trouve noyé dans de la silice (sable) qui a pour but de refroidir l'arc électrique lors de la fusion de l'élément fusible.

Cartouche cylindrique

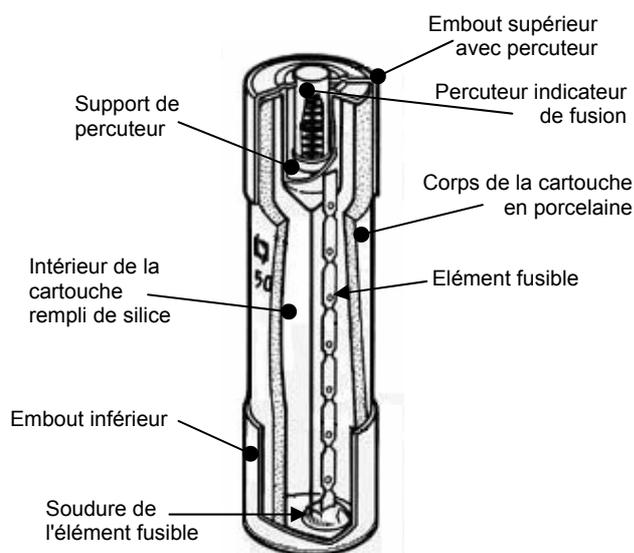


Fig. 10.4-4a

Cartouche à couteaux

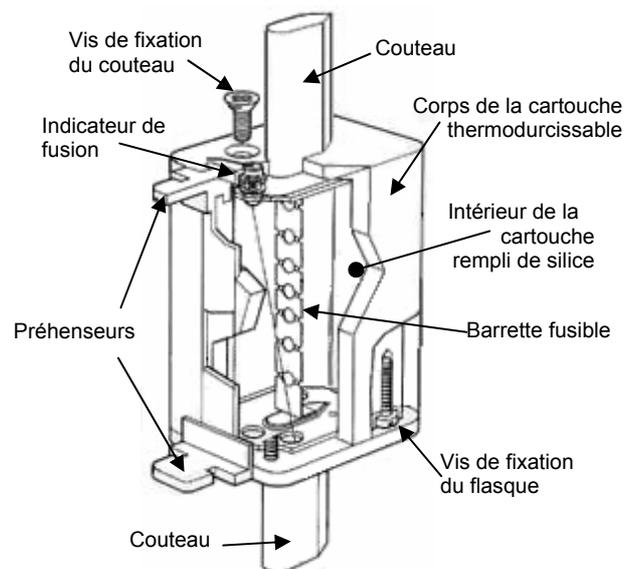


Fig. 10.4-4b

### 10.4.2.3. Principaux types de fusibles utilisés dans les équipements

Dans les équipements industriels, on rencontre principalement 3 modes de fonctionnement de fusibles suivant la norme IEC 60269 :

- **Type gG** <sup>(1)</sup> : Fusible de distribution à usage général, le marquage est noir.  
Il offre une protection à la fois contre les courts-circuits et contre les surcharges les circuits ne présentant pas de pointes de courants importants (ex : circuits résistifs).  
En général, leur calibre doit être immédiatement supérieur au courant de pleine charge du circuit protégé.  
C'est le type de fusible le plus courant utilisé pour la protection des installations domestiques.
- **Type aM** : Fusible accompagnement moteurs, le marquage est vert et ils sont reconnaissables par l'escargot dessiné sur l'enveloppe (significatif de la lenteur de son déclenchement).  
Ils protègent contre les courts-circuits soumis à des pointes de courant élevées (pointes magnétisantes à la mise sous tension primaires des transformateurs ou d'électro-aimants, pointes de démarrage de moteurs asynchrones). Leurs caractéristiques de fusion permettent aux fusibles aM de "laisser passer" ces surintensités, mais les rendent totalement inaptes à la protection contre les surcharges. Si une telle protection est également nécessaire, elle doit être faite par un autre dispositif (relais thermique par exemple).  
En général, leur calibre doit être immédiatement supérieur au courant de pleine charge du circuit protégé.
- **Type UR** : Fusible ultra-rapide  
Ils sont employés pour la protection des semi-conducteurs de puissance. Ces fusibles présentent un temps de fusion très inférieur à ceux assurés par les fusibles de type aM ou gG.  
Il est nécessaire de connaître la caractéristique  $I^2t$  des semi-conducteurs de puissance à protéger et faire en sorte que  $I^2t$  du fusible UR soit  $< I^2t$  du semi-conducteur.

(1) La norme IEC60269-2 a remplacé l'appellation "type gI" par "type gG".

#### Remarque:

Les fusibles miniatures pouvant être utilisés pour la protection des fonctions de contrôle en électronique respectent la norme IEC 60127. Celle-ci prévoit quatre types de fusibles (FF, F, T, TT), chaque type étant défini suivant le temps nécessaire pour couper dix fois le courant nominal :

- FF (ultra-rapide / *very fast*), inférieur à 1 ms,
- F (rapide / *fast*, de l'allemand *flink* = rapide, agile), de 1 à 10 ms,
- T (retard / *slow blow*, de l'allemand *träge* = inerte, à grande inertie), de 10 à 100 ms,
- TT (ultra-retard, *Very slow acting*), de 100 ms à 1 s.

### 10.4.2.4. Dimensions

Les fusibles gG et aM selon la directive IEC 60269 sont proposés dans de nombreuses technologies et formes différentes définies par des normes locales comme: normes anglaises, normes françaises, normes allemandes etc. Les formes peuvent être variées : CP cylindriques, BS88 cylindriques à contacts à couteaux déportés, NH à couteau, D Diazed en forme de bouteille. Nous évoquerons ci-dessous quelques

➤ Les fusibles à **cartouches cylindriques**

Les fusibles à cartouches cylindriques industriels répondant à la norme IEC 60269. Ils sont disponibles en quatre tailles différentes allant de 8,5 x 31,5 à 22 x 58 (voir tableau ci-dessous).

Taille	Gamme de courant (A) <small>(selon la tension d'usage, percuteurs et des fabricants)</small>	Type
8,5x31,5	0,5-1-2-4-6-8-10-12-16-20-25	gG
10x38	0,5-1-2-4-6-8-10-12-16-20-25-32	
14x51	1-2-4-6-8-10-12-16-20-25-32-40-50	
22x58	1-2-4-6-8-10-12-16-20-25-32-40-50-63--80-100-125	
8,5x31,5	1-2-4-6-8-10-12	aM
10x38	0,16-0,25-0,5-1-2-4-6-8-10-12-16-20-25-32	
14x51	0,25-0,5-1-2-4-6-8-10-12-16-20-25-32-40-45-50	
22x58	1-2-4-6-8-10-12-16-20-25-32-40-50-63--80-100-125	

Remarque :

Il existe également des fusibles à usage domestique adaptés aux sections des lignes utilisées dans le cadre de la norme NF C 15-100. Ils sont soumis à la norme IEC 60127.

Ci-dessous quelques exemples de fusibles industriels à cartouches cylindriques :



Fig. 10.4-5

➤ Les fusibles à **cartouches à couteaux**

Pour les fusibles à cartouches à couteaux répondant à la norme IEC 60269, il existe 7 tailles de corps allant de la taille 000 à taille 4 (voir tableau ci-dessous).

Taille	Gamme de courant (A) <small>(selon les tensions, percuteurs et fabricants)</small>	Type
<b>000/00C</b>	2-4-6-10-16-20-25-32-35-40-50-63-80-100	<b>gG</b>
<b>00</b>	125-160	
<b>0</b>	6-10-16-20-25-32-35-40-50-63--80-100-125-160-200-224-250	
<b>1</b>	16-20-25-32-35-40-50-63--80-100-125-160-200-224-250-315-355	
<b>2</b>	25-32-35-40-50-63--80-100-125-160-200-224-250-315-350-400-425-500	
<b>3</b>	250-300-315-355-400-425-450-500-630-800	
<b>4/4a</b>	315-400-500-630-800-1000-1250	
<b>000</b>	2-4-6-10-16-20-25-32-35-40-50-63-80	
<b>00</b>	100-125-160	
<b>0</b>	16-20-25-32-40-50-63-80-100-125-160-200	
<b>1</b>	80-100-125-160-200-224-250-315	
<b>2</b>	100-125-160-200-250-315-355-400-500	
<b>3</b>	315-355-400-425-500- 630	
<b>4/4a</b>	315-400-500-630-800-1000-1250	

Ci-dessous quelques exemples de fusibles à couteaux :



Fig. 10.4-6

➤ Les fusibles types **bouteilles "Diazed" et "Neozed"**

Ces fusibles sont surtout utilisés dans les pays limitrophes de la France (Suisse, Allemagne, Autriche, etc.) Ils sont tout à fait comparables aux fusibles industriels cités plus haut.

- Les cartouches fusibles Diazed (Type D) ont un corps en céramique en forme de bouteille avec embouts de métal et sont montés à l'intérieur de porte-fusibles à vis (filetage Edison). Ils existent en cinq tailles différentes de 2 A jusqu'à 200 A (voir tableau suivant). La désignation d'une taille se compose de la lettre "D" suivie d'un chiffre romain.

Taille	Intensité (A)	Φ filetage en mm
DI (Suisse)	2, 4, 6, 10, 16	17 (SE21)
NDZ (DI)	2, 4, 6, 10, 16, 20, 25	13 (E16)
DII	2, 4, 6, 10, (13) 16, 20, 25	22 (E27)
DIII	(32) 35, 40, 50, 63	27 (E33)
DIV	80, 100	33 (R 1 <sup>1/4</sup> ")
DV	125, 160, 200	46 (R 2 ")

Les tailles DIV et DV sont très rarement utilisées, alors que les modèles DI et DV ne font pas partie de la norme IEC 60269.

- Les cartouches fusibles Neozed (Type D0) sont similaires aux cartouches type D, mais elles possèdent un corps cylindrique de plus petite taille. Ces fusibles sont disponibles en trois tailles différentes de 2 A jusqu'à 100 A (voir tableau ci-dessous).

Taille	Intensité (A)	Φ filetage en mm
D01	2, 4, 6, 10, 13, 16	11 (E14)
D02	20, 25, 35, 50, 63	15 (E18)
D03	80, 100	22 M 30x2

Remarque :

Les cartouches fusibles Diazed et Neozed sont munies d'une pastille de couleur qui renseigne sur l'intensité nominale du fusible sans avoir besoin de le démonter.

<b>DI, DII, DII</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>13</b>	<b>16</b>	<b>20</b>	<b>25</b>
	 Rose	 Brun	 Vert	 Rouge	 Noir	 Gris	 Bleu	 Jaune
<b>DIV</b>	<b>32</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>63</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	
	 Noir	 Noir	 Noir	 Blanc	 Cuivre	 Argent	 Rouge	
<b>DV</b>	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>					
	 Jaune	 Cuivre	 Bleu					
<b>D01</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>16</b>			
	 Rose	 Brun	 Vert	 Rouge	 Gris			
<b>D02</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>35</b>	<b>50</b>	<b>63</b>			
	 Bleu	 Jaune	 Noir	 Blanc	 Cuivre			
<b>D03</b>	<b>80</b>	<b>100</b>						
	 Argent	 Rouge						

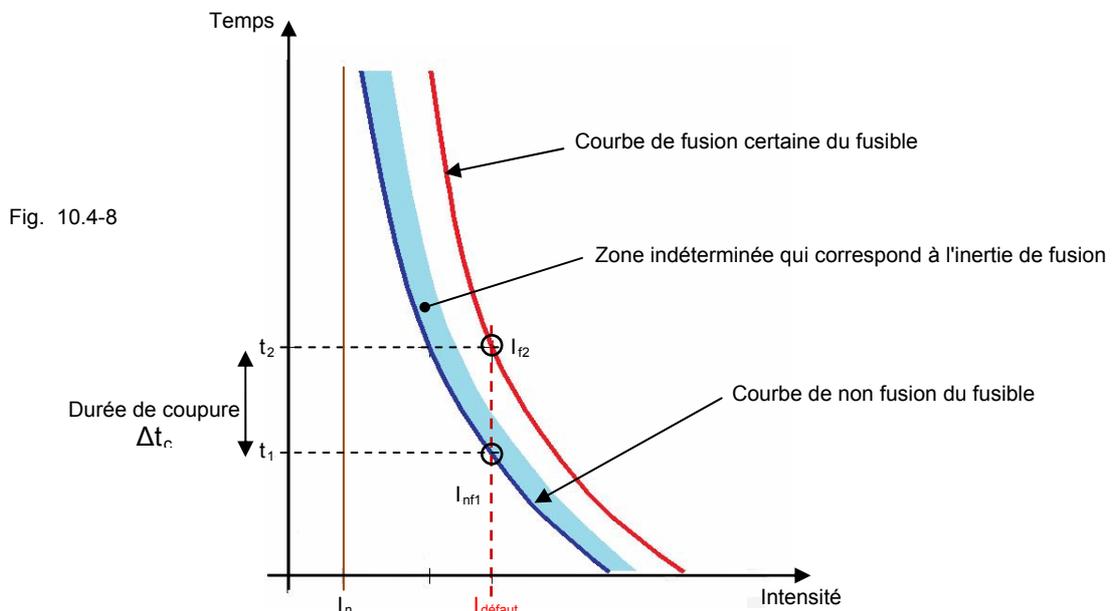
Ci-dessous quelques exemples de fusibles bouteilles :

Fig. 10.4-7a	Fig. 10.4-7b	Fig. 10.4-7c	Fig. 10.4-7d	Fig. 10.4-7e	Fig. 10.4-7f
					
NDZ	DII	DIII	DIV	DV	D01

### 10.4.2.5. Caractéristiques électriques principales

Nous définirons un fusible par :

- son type (gG, aM, ...)
- la valeur de la tension nominale (250, 400, 500, 660 V),
- le courant nominal  $I_n$ ,
- le pouvoir de coupure qui définit la valeur du courant maximal qu'un fusible peut couper sans que la tension de rétablissement ne provoque un réamorçage de l'arc. Les fusibles possèdent des pouvoirs de coupure élevés (Pdc) exprimés en kA.
- la courbe de fonctionnement (voir caractéristique type ci-dessous).



Remarque :

- *le courant de non fusion  $I_{nf}$*  : Valeur du courant qui peut être supporté par l'élément fusible, pendant un temps conventionnel, sans fondre.
- *le courant de fusion  $I_f$*  : Valeur du courant qui provoque la fusion du fusible avant le temps conventionnel.
- *la durée de coupure  $\Delta t_c$*  : c'est le temps qui s'écoule entre le moment où commence à circuler un courant suffisant pour provoquer la fusion et la fin de cette fusion.

### 10.4.3. Les disjoncteurs magnétiques

#### 10.4.3.1. Fonction

Ils assurent, dans la limite de leur pouvoir de coupure et par l'intermédiaire de leurs déclencheurs magnétiques (un déclencheur par phase), la protection des circuits contre les courts-circuits. Ils peuvent également assurer la protection contre les contacts indirects, exigée par les normes pour les régimes de neutre, pour les schémas TN ou IT. Dans le cas des schémas TT, il peut être nécessaire d'utiliser une protection différentielle résiduelle (voir chapitre 20 les schémas des régimes de neutre). Suivant le type de circuit à protéger (distribution, moteur ...), le seuil de déclenchement magnétique est situé entre 3 et 15 fois le courant thermique  $I_{th}$ . Selon le type de disjoncteur, ce seuil de déclenchement est fixe ou réglable par l'utilisateur.

Les disjoncteurs réalisent d'origine une coupure omnipolaire : le fonctionnement d'un seul déclencheur magnétique suffit pour commander l'ouverture simultanée de l'ensemble des pôles. Pour des courants de court-circuit peu élevés, le fonctionnement des disjoncteurs est plus rapide que celui des fusibles.

#### 10.4.3.2. Symbole

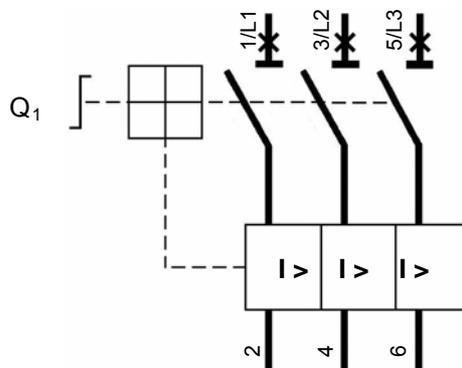


Fig. 10.4-9

Symbole disjoncteur magnétique tripolaire

#### 10.4.3.3. Principales caractéristiques

##### ➤ Pouvoir de coupure PdC

C'est la plus grande valeur du courant présumé de court-circuit qu'un disjoncteur peut interrompre sous une tension donnée et dans certaines conditions. Il s'exprime en kilo ampères efficaces symétriques.

La norme IEC 947-2 définit deux valeurs pour le pouvoir de coupure des disjoncteurs :

- le pouvoir assigné de coupure ultime  $I_{cu}$

C'est la valeur efficace maximale du courant permettant d'effectuer avec succès une coupure suivie d'une fermeture-ouverture. Elle est pratiquement équivalente au pouvoir de coupure  $I_{cn}$  cycle P1 de la norme IEC 157-1.

- le pouvoir assigné de coupure de service  $I_{cs}$

C'est la valeur efficace maximale du courant permettant d'effectuer avec succès une coupure suivie de deux fermetures-ouvertures. Elle est pratiquement équivalente au pouvoir de coupure  $I_{cn}$  cycle P2 de la norme IEC 157-1.

##### ➤ Pouvoir de fermeture PdF

C'est la plus grande valeur du courant qu'un disjoncteur peut établir sous sa tension nominale dans des conditions spécifiées. En alternatif, il s'exprime par la valeur de crête du courant.

Le pouvoir de fermeture est égal à k fois le pouvoir de coupure (voir le tableau ci-dessous issu de la norme IEC 947-2).

PdC	cos φ	PdF
4,5 kA < PdC ≤ 6 kA	0,7	1,5 PdC
6kA < PdC ≤ 10kA	0,5	1,7 PdC
10kA < PdC ≤ 20kA	0,3	2 PdC
20 kA < PdC ≤ 50 kA	0,25	2,1 PdC
50 kA < PdC	0,2	2,2 PdC

➤ **Autoprotection**

C'est l'aptitude d'un appareil à limiter le courant de court-circuit à une valeur inférieure à son pouvoir de coupure grâce à son impédance interne.

➤ **Pouvoir de limitation**

Un disjoncteur est dit limiteur lorsque le courant réellement interrompu en cas de défaut est bien inférieur au courant présumé de court-circuit.

La limitation du courant de court-circuit dépend de la rapidité d'ouverture de l'appareil et de sa capacité à générer une tension d'arc supérieure à la tension du réseau. Elle permet d'atténuer les effets thermiques et électrodynamiques, d'où une meilleure protection des câbles et de l'appareillage.

**10.4.3.4. Exemple de schéma d'un départ moteur avec disjoncteur magnétique**

On remarquera sur ce schéma la présence d'un relais thermique qui assure la protection du circuit contre les surcharges.

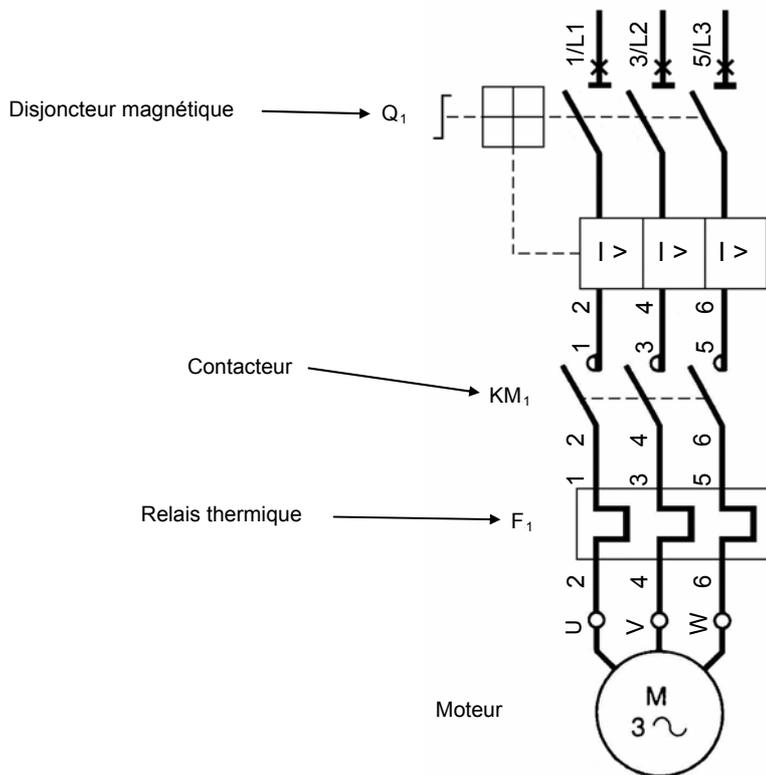


Fig. 10.4-10

### 10.4.3.5. Exemples de quelques disjoncteurs-magnétiques

Fig. 10.4-11a



C60 L MA 25A  
Gamme Multi 9  
2Pôles  
Schneider Electric

Fig. 10.4-11b



C60 L MA 25A  
Gamme Multi 9  
3Pôles  
Schneider Electric

Fig. 10.4-11c



NSX 100F MA 100  
Gamme Compact  
3Pôles  
Schneider Electric