

FUSIBLES POUR SEMI-CONDUCTEURS

1. LES SEMI-CONDUCTEURS DE PUISSANCE

- 1.1. Trois familles de semi-conducteurs de puissance
- 1.2. Historique du Semi-conducteurs de puissance
- 1.3. La conversion du courant : une application des semi-conducteurs de puissance
- 1.4. Domaines d'applications des semi-conducteurs de puissance

2. APPLICATIONS DES CONVERTISSEURS DE COURANT

- 2.1. Applications des redresseurs
- 2.2. Applications des onduleurs

3. PROTECTION PAR FUSIBLES DES CONVERTISSEURS STATIQUES DE PUISSANCE

- 3.1. Deux grandes familles de défauts
 - Défauts internes
 - Défauts externes
- 3.2. Deux grands types de protection
 - Protection totale
 - Protection interne
- 3.3. Critères de sélection des fusibles pour semi conducteur

4. SELECTION DE LA TENSION NOMINALE U_N DES FUSIBLES

5. SELECTION DU COURANT NOMINAL I_N DES FUSIBLES

6. PRESENTATION DES COEFFICIENTS CORRECTEURS

- 6.1. Coefficients utilisés sur la valeur efficace des courants de charge : a - B_1 - C_1 - C_{PE} - A'_2
- 6.2. Surcharges répétitives : coefficient B'_2 pour définir la courbe de préarc du fusible
- 6.3. Surcharges occasionnelles (coordination avec disjoncteur) : coefficient Cf'_3

7. COURBE DU I^2t

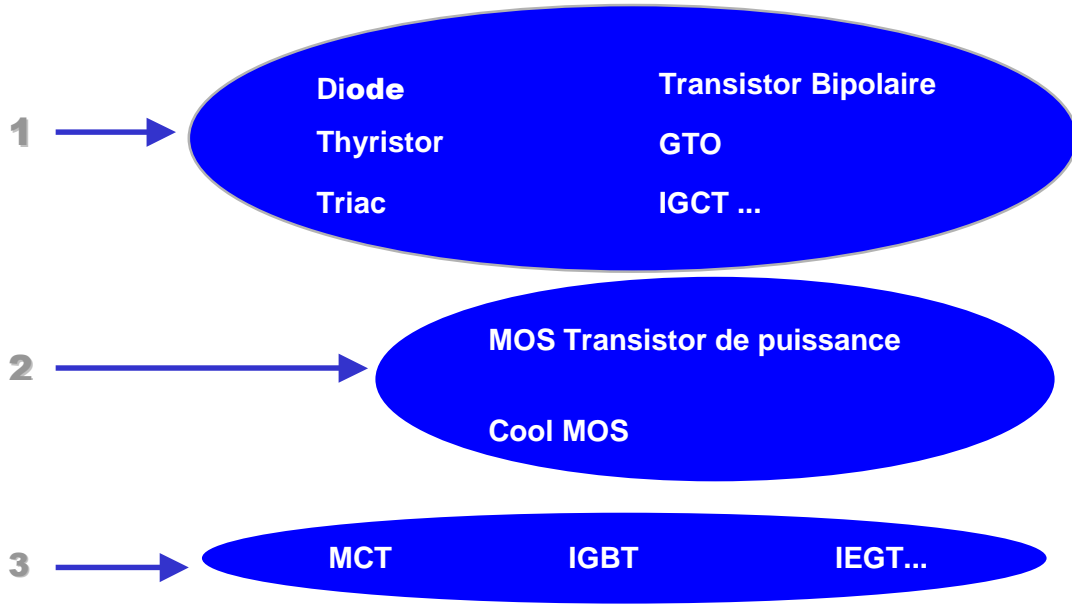
8. COURBE DES POSSIBILITES EN COURANT CONTINU

9. TECHNOLOGIES

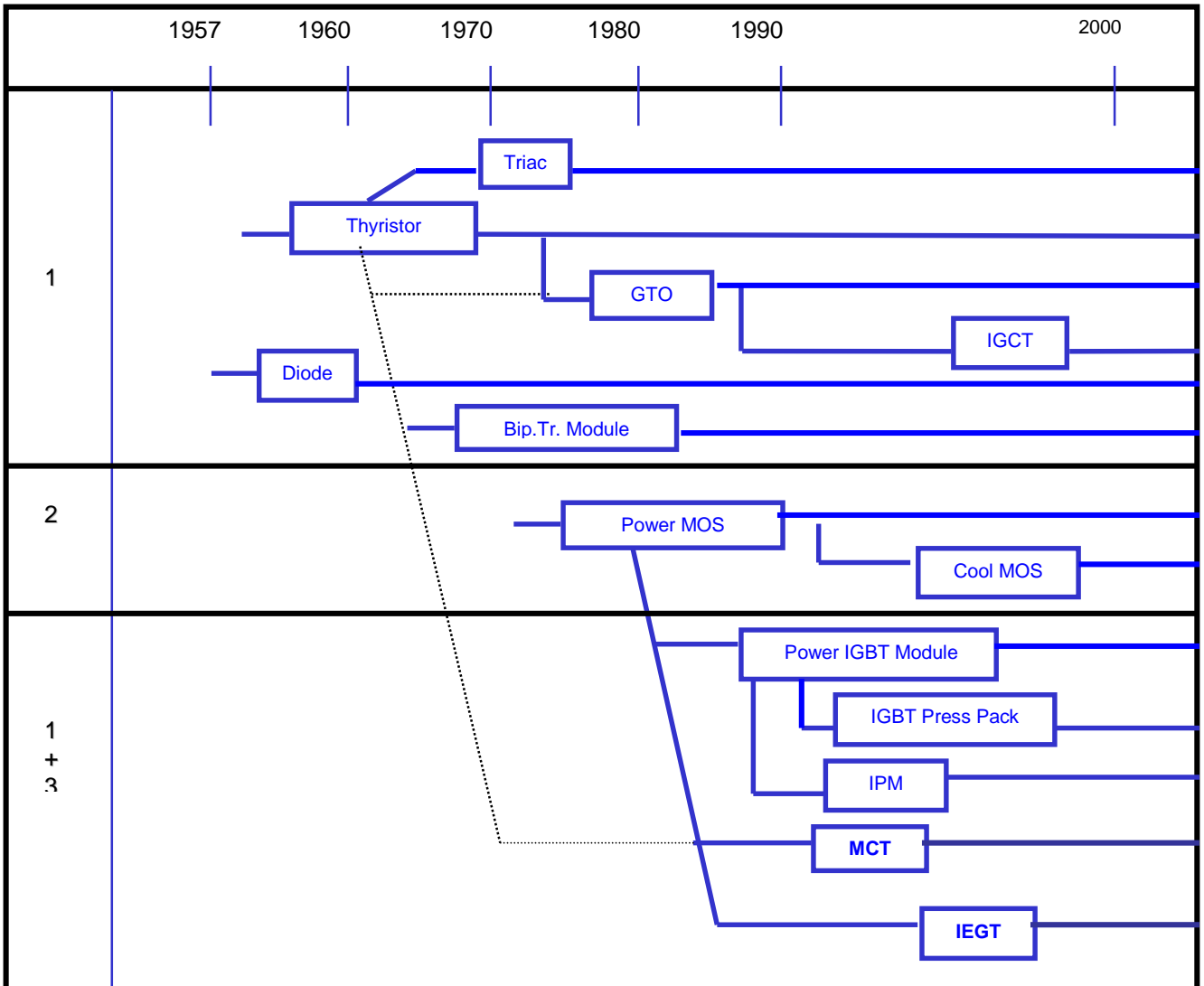
10. EXEMPLE D'INSTALLATION ELECTRIQUE DANS UNE GRANDE USINE DE PRODUCTION

1. LES SEMI-CONDUCTEURS DE PUISSANCE

1.1. Trois familles de semi-conducteurs de puissance



1.2. Historique du Semi-conducteurs de puissance



1.3. La conversion du courant : une application des semi-conducteurs de puissance

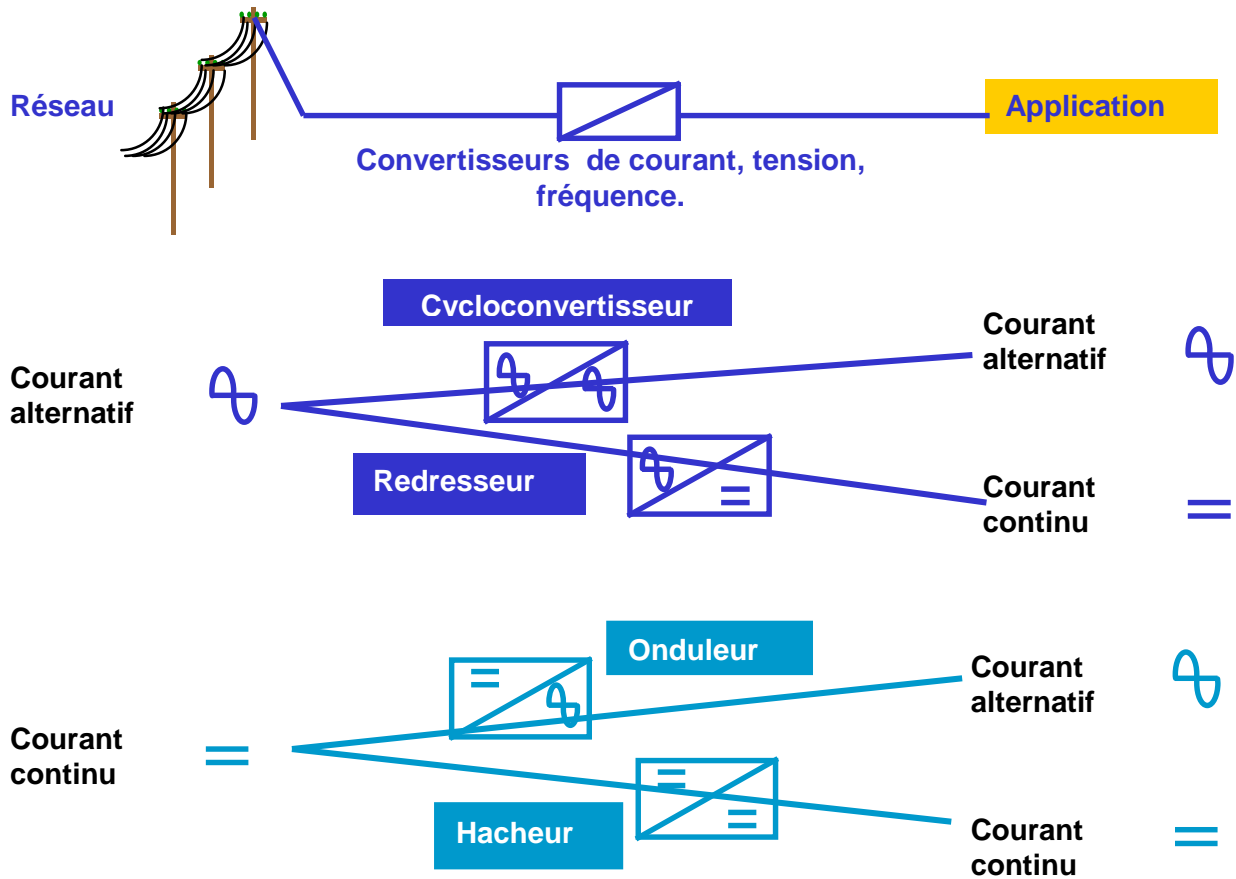
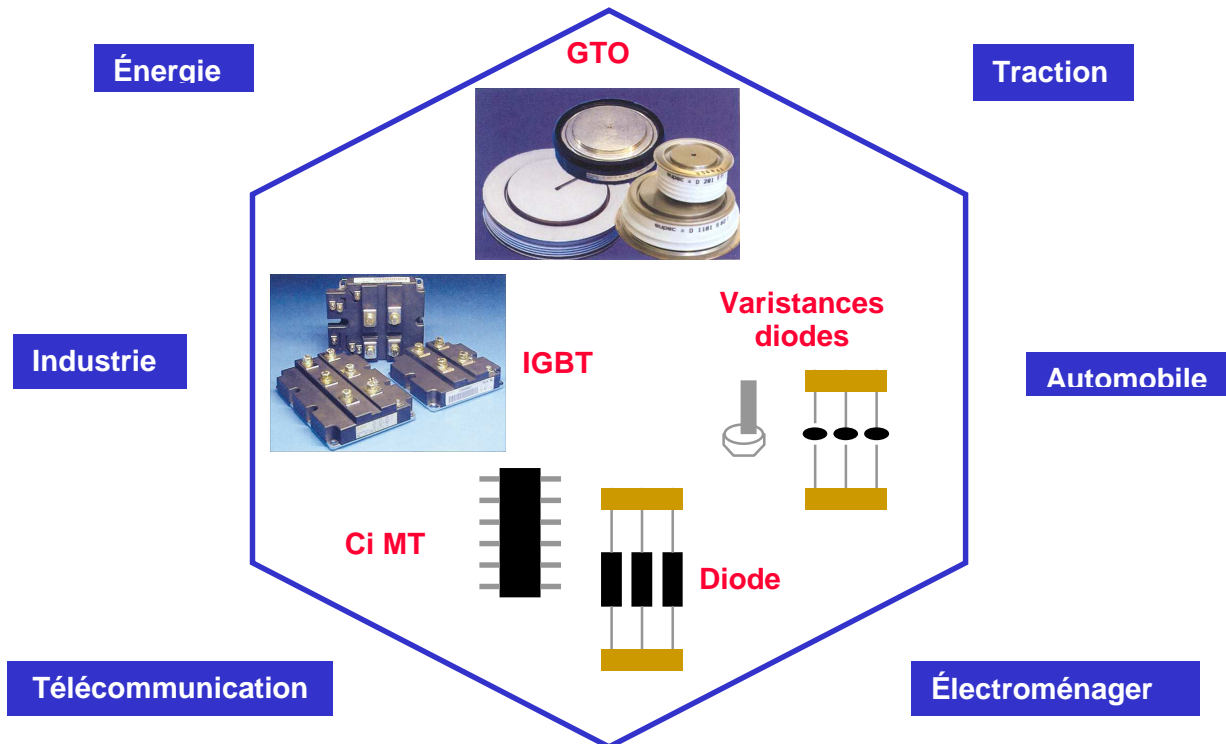


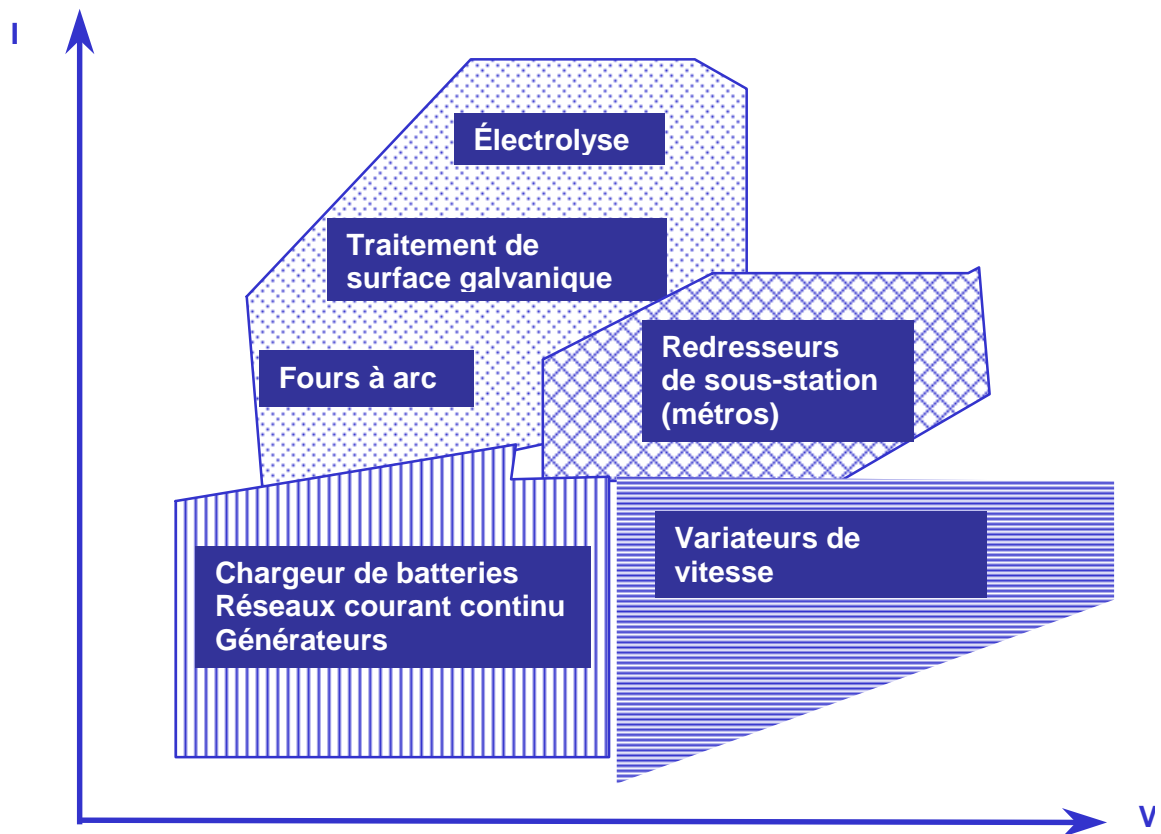
Figure 1 : la conversion du courant

1.4. Domaines d'applications des semi-conducteurs de puissance

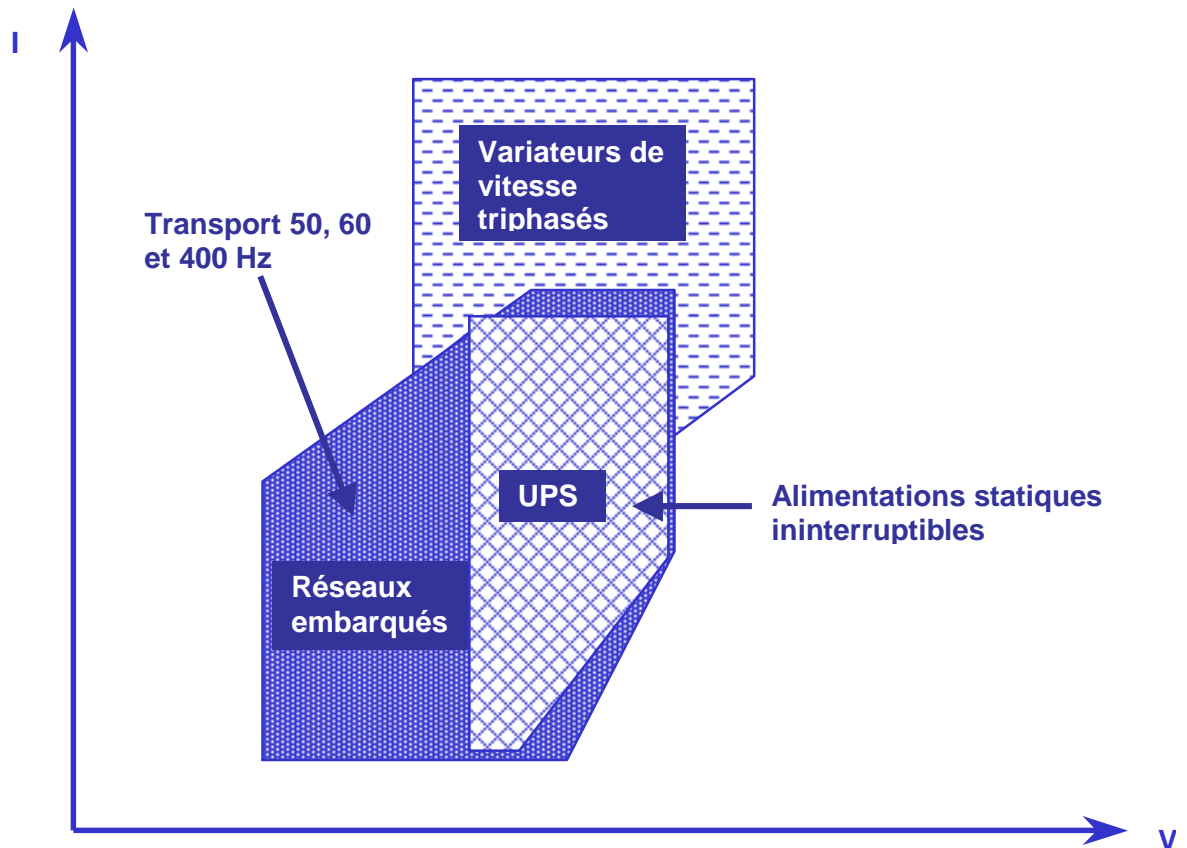


2. APPLICATIONS DES CONVERTISSEURS DE COURANT

2.1. Applications des redresseurs



2.2. Applications des onduleurs



3. PROTECTION PAR FUSIBLES DES CONVERTISSEURS STATIQUES DE PUISSANCE

3.1. Deux grandes familles de défauts

Il faut distinguer deux familles de défaut : défauts internes et défauts externes

- **Défauts internes : ils sont produits par une défaillance du convertisseur**

Exemple : un semi-conducteur « claque » et crée un court circuit .

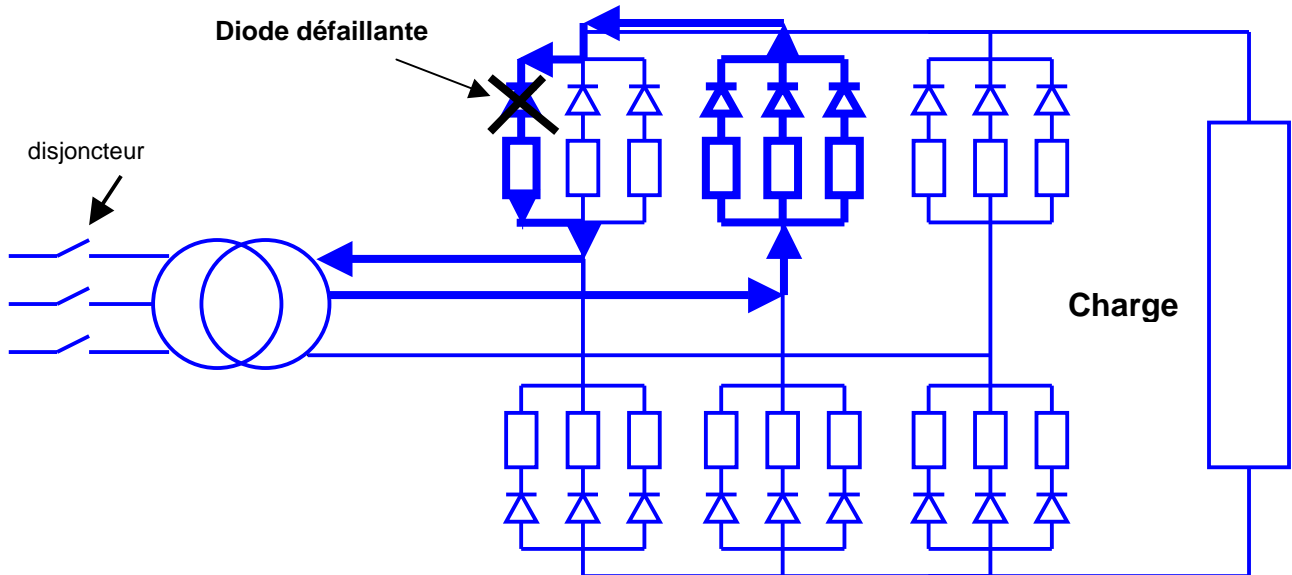


Figure 2: défaut interne

- **Défauts externes : ils se produisent à l'extérieur du convertisseur**

Exemple : court circuit dans l'équipement alimenté par le convertisseur

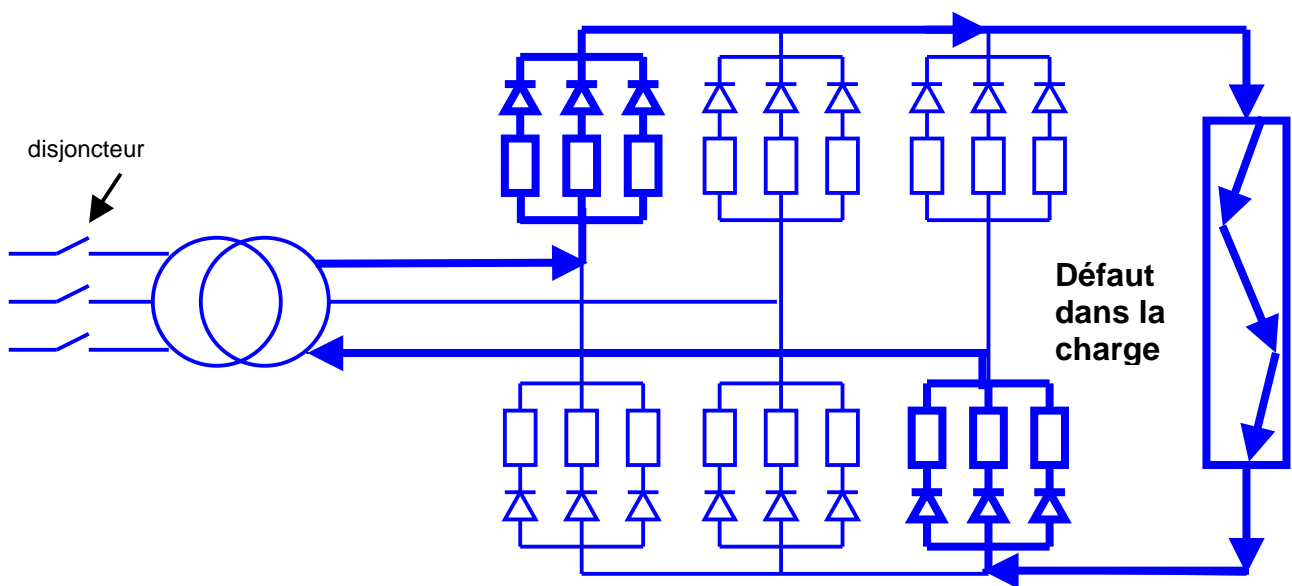


Figure 3: défaut externe

3.2. Deux grands types de protection

- **Protection totale : exemple de protection d'un pont redresseur avec 1 diode par bras**

Choix de l'emplacement des fusibles :

dans le cas du pont triphasé (connu aussi sous le nom de « pont de Graëtz ») avec une seule diode par bras il y a deux possibilités :

- Les fusibles sont placés dans les phases d'alimentation selon la figure 4 (3 fusibles F1)
- ou alors en série avec chaque diode selon la figure 5 (6 fusibles F2).

Le fusible doit interrompre tous les défauts : défauts internes et défaut externes. Dans ce cas le fusible est choisi avec un i^2t plus petit que celui de la jonction des semi-conducteurs. Il suffit donc, après l'interruption du courant de défaut, de remplacer les fusibles fondus (au minimum 2 fusibles) et quelques fois remplacer une diode (ou thyristor) si le défaut est créé par la défaillance d'une diode (ou thyristor).

Cependant il n'est pas toujours possible d'assurer la protection avec 3 fusibles F1 car ces fusibles ont un calibre $\sqrt{2}$ fois plus grand que le calibre des fusibles F2. En effet le courant efficace circulant dans les phases d'alimentation du pont redresseur est $\sqrt{2}$ fois plus grand que le courant efficace circulant dans chaque diode. La conséquence est que le i^2t du fusible F1 sera environ deux fois plus grand que celui des fusibles F2 et la protection des jonctions des diode (ou thyristor) ne sera pas toujours possible.

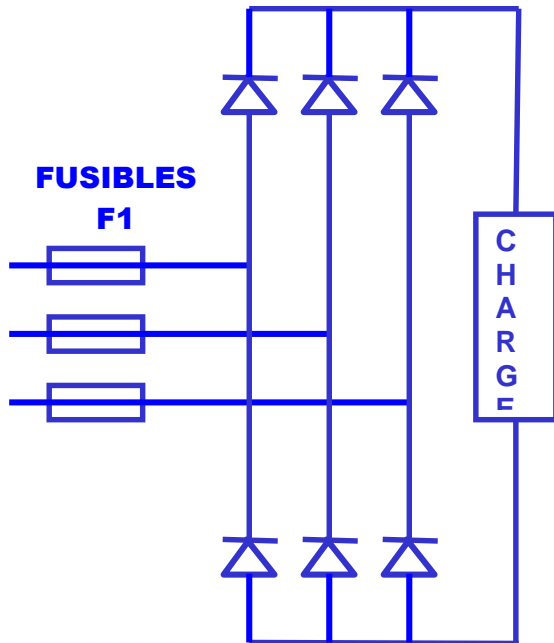


Figure 4 : protection avec 3 fusibles

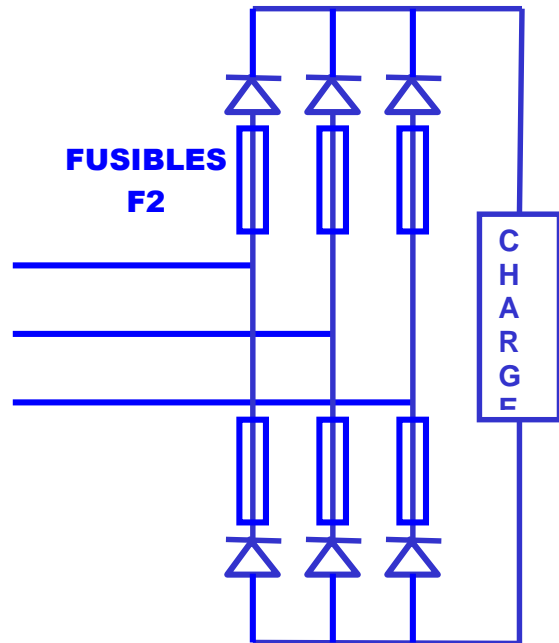


Figure 5 : protection avec 6 fusibles

- **Protection interne : cas du redresseur avec plusieurs diodes en parallèle par bras**

Ce cas est illustré par la figures 2

Il n'y a qu'un seul emplacement possible pour les fusibles : en série avec chaque semi-conducteur.

Le fusible interrompt seulement les courants de court circuit générés par les défauts internes. Le fusible empêche l'explosion du semi-conducteur « claqué ». Les dégâts dans le convertisseur sont minimisés.

Un autre dispositif de protection interrompt les défauts externes. En général le fusible est coordonné avec cet autre dispositif de protection pour qu'il ne soit absolument pas endommagé pendant le fonctionnement de ce dispositif de protection.

La protection de l'équipement est assurée quand :

- Le i^2t du fusible est plus petit que le i^2t d'explosion (c'est à dire le i^2t du boîtier) du semi-conducteur. Parfois le fabricant du semi-conducteur donne un courant crête maximum au lieu d'un i^2t .
- Le i^2t du fusible est plus petit que le i^2t de jonction global de « N » semi-conducteurs en parallèle.(c'est à dire N^2 fois le i^2t de jonction d'un semi-conducteur)
- La tension d'arc du fusible est plus petite que la tension inverse du semi-conducteur.

3.3. Critères de sélection des fusibles pour semi conducteur

TABLEAU 1

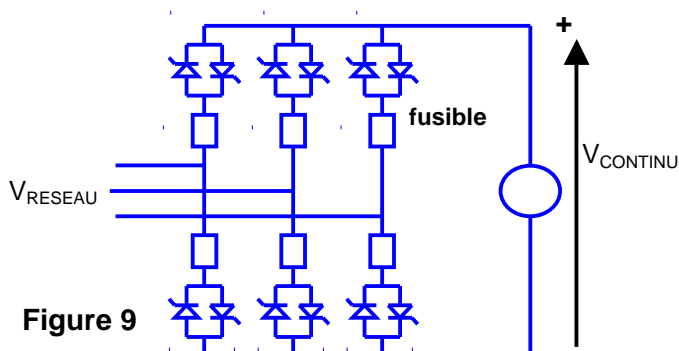
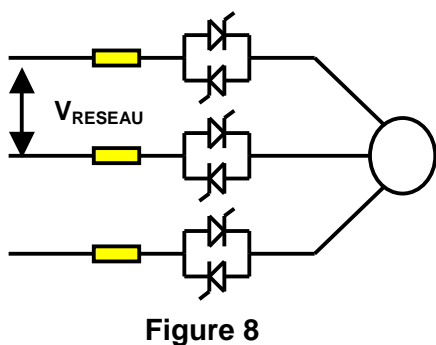
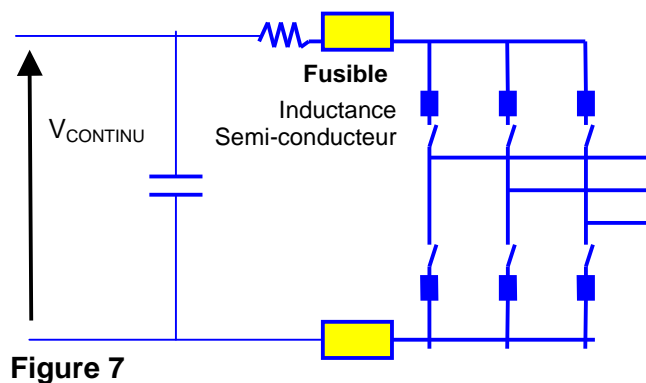
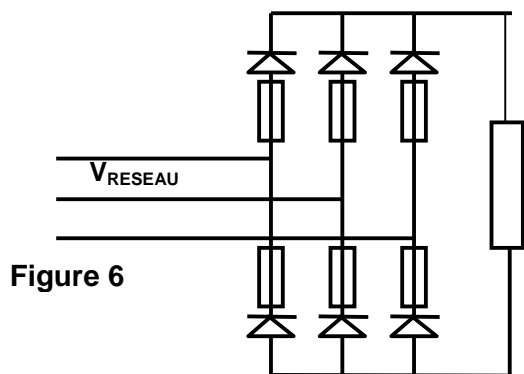
PARAMETRES	CONDITIONS
Tension	$V_{FUSIBLE} > V_{DEFAULT}$
Courant	$I_{FUSIBLE} > I_{RMS}$
I²t total	$I^2t_{total} < I^2t_{SEMI\ CONDUCTEUR}$ (JONCTION OU BOITIER)
Pouvoir de coupure	$PC_{FUSIBLE} > I_{DEFAULT}$
Tension d'arc	$V_{ARC\ FUSIBLE} < V_{SEMICONDUCTEUR}$

4. SELECTION DE LA TENSION NOMINALE U_N DES FUSIBLES

La sélection de la tension nominale U_N du fusible n'est pas seulement basée sur la tension entre phases du réseau qui alimente le convertisseur de courant mais doit tenir compte de la tension du ou des défauts que devra interrompre le fusible comme l'indique le tableau 1 du § 3.3.

TABLEAU 2

Redresseur	Figure 6	$U_N \geq V_{RESEAU}$
Onduleur à modulation de largeur d'impulsion	Figure 7	Pas de formule car le fusible interrompt une décharge de condensateur. Il faut utiliser une notice d'application spécifique avec des courbes spéciales appropriées.
Démarrateurs progressifs	Figure 8	$U_N \geq V_{RESEAU}$
Variateur de vitesse courant continu régénératif	Figure 9	$U_N \geq V_{RESEAU} + \frac{V_{CONTINU}}{\sqrt{2}}$



5. CHOIX DU COURANT NOMINAL I_N DES FUSIBLES

Le courant nominal I_N d'un fusible pour semi-conducteur PROTISTOR ou d'un fusible AMP-TRAP est la valeur efficace du courant que le fusible peut supporter en permanence sans détérioration dans des conditions spécifiées. La valeur de I_N est obtenue à partir d'un essai d'échauffement réalisé dans des conditions spécifiées par la CEI 60 269-4 ou par la norme UL 248-13. Pour ce type de fusible les normes ne précisent pas quelles sont les valeurs maximum des températures de fonctionnement.

Pour les fusibles à usages généraux et les fusibles pour circuits avec moteurs les normes CEI 60269 et UL 248 spécifient les conditions d'essais ainsi que des résultats comme : puissance consommée, échauffements des pièces de contact etc. Les normes précisent aussi plusieurs courants de fusion et de non fusion, pour des temps de fusion donnés, tenant compte de l'utilisation de ces fusibles. La courbe temps /courant de ces fusibles doit passer entre ces points.

Le sélection de ces fusibles est donc grandement simplifiée. Néanmoins tous les principes expliqués dans ce document concernent tous les types de fusibles.

Les conditions réelles de fonctionnement dans les équipements ne sont jamais les mêmes que celles des conditions d'essais. Pour cette raison des coefficients correcteurs adaptés à chaque type de fusible sont nécessaires pour le calcul du courant nominal I_N du fusible.

Le TABLEAU 3 résume les différences principales :

TABLEAU 3

PARAMETRES	CONDITIONS D'ESSAIS DE LA CEI 60269	CONDITIONS D'UTILISATION A L'INTERIEUR DES EQUIPMENTS
Température ambiante	30 °C max.	40 °C to 60 °C dans la plupart des cas
Dimensions des câbles & bus bar	1 m de chaque côté du fusible câbles jusqu'à 400 A 240 mm ² copper cable for 400 A 600 mm ² copper bars for 1000 A (voir l'annexe 1)	Longueur plus courte que 1 m , une extrémité peut être relié à un composant chaud ou à un refroidisseur à eau. Dans la plupart des applications la densité de courant dans les câbles et barres en cuivre est plus élevée. Le matériau utilisé est le cuivre ou l'aluminium
Refroidissement	naturel	naturel ou avec air forcé ou avec de l'eau
Courant de charge	permanent et stable	variable avec surcharges dans la plupart des cas
fréquence	50 ou 60 Hertz	0 à 20 kilohertz

De telles différences imposent l'utilisation de coefficients correcteurs afin de calculer le courant nominal I_N du fusible qui ne vieillira pas prématurément à cause de températures trop élevées ou de variations répétitives du courant. Avec un autre coefficient il est également possible d'éviter la fusion indésirable du fusible sur certaines grandes surcharges ou d'assurer la coordination entre fusibles et disjoncteurs.

La durée de vie d'un fusible est fonction de la variation de température $\Delta\theta$ des éléments fusibles. Le nombre de cycles et de surcharges que le fusible peut supporter diminue quand $\Delta\theta$ augmente et inversement. Des essais spécifiques avec un courant variable sont nécessaires pour définir la valeur des coefficients correcteurs. Tous les paramètres cités dans le TABLEAU 1 ont une influence sur la durée de vie d'un fusible car ils ont une influence directe sur la température de fonctionnement du fusible.

Note: les valeurs et l'utilisation des coefficients correcteurs ne sont pas nécessairement les mêmes pour tous les fabricants de fusibles car les choix des matériaux et des températures maximum de fonctionnement sont différents.

6. PRESENTATION DES COEFFICIENTS CORRECTEURS

Les coefficients utilisés sont: $a - B_1 - C_1 - C_{PE} - A'_2 - B'_2 - Cf'_3$

Note : les coefficients $A_2 - B_2 - Cf_3$ qui sont parfois publiés avec les courbes temps courant des fusibles pour la protection des semi-conducteurs sont des valeurs particulières des coefficients $A'_2 - B'_2 - Cf'_3$ et sont utilisables dans certaines conditions

6.1. Coefficients utilisés sur la valeur efficace des courants de charge : $a - B_1 - C_1 - C_{PE} - A'_2$

Le courant nominal I_N du fusible est obtenu en divisant la valeur efficace I_{RMS} du courant de charge par les coefficients correcteurs. L'utilisation de plusieurs coefficients peut être combinée dans le même calcul.

- **Température ambiante à l'intérieur de l'armoire : coefficient a**

quand la température ambiante θ_a est supérieure à une température de référence θ_0 (fixé par les normes et conditions d'essai) , ce coefficient permet de calculer le coefficient A_1 qui sera utilisé dans les calculs:

$$A_1 = \sqrt{\frac{a - \theta_a}{a - \theta_0}}$$

le coefficient A_1 est appliqué sur un courant permanent ou la valeur efficace d'un courant variable

$$\text{Donc le courant nominal } I_N \text{ du fusible est: } I_N \geq \frac{I_{RMS}}{A_1}$$

- **Ventilation forcée : coefficient B_1**

lorsqu'une ventilation forcée est appliquée sur le fusible avec une vitesse V ce coefficient permet de calculer le coefficient B_v qui sera utilisé dans les calculs:

$$B_v = 1 + (B_1 - 1) * \frac{V}{5} \quad \text{avec } V \text{ in m/s et avec } v \leq 5 \text{ m/s}$$

Lorsque $v \geq 5 \text{ m/s}$ il n'y a plus d'amélioration significative de l'échange de chaleur entre le fusible et l'air.

$$\text{Donc le courant nominal } I_N \text{ du fusible est: } I_N \geq \frac{I_{RMS}}{A_1 * B_v}$$

- **Connexions: coefficient C_1**

Ce coefficient permet de prendre en compte la taille des conducteurs connectés au fusible, de la présence d'autres composants produisant de la chaleur et également le refroidissement des pièces de connexions du fusibles. Les valeurs recommandées dans le TABLEAU 4 pour quelques gammes sont le résultat de notre expérience.

$$\text{Donc le courant nominal } I_N \text{ du fusible est: } I_N \geq \frac{I_{RMS}}{A_1 * B_v * C_1}$$

TABLEAU 4 : coefficient C_1 de quelques fusibles pour semi-conducteurs

TECHNOLOGIE	TAILLE	TYPE	Sans refroidisseur à liquide sur les connexions	La température des 2 contacts est maintenue à 60 °C ou moins
corps céramiques carrés	30-31-32-33 & doubles	UR-	0.85	1.30
		gR-	0.85	1.25
	70-71-72-73 & doubles	UR-	0.90	1.25
		gR-	0.90	1.20
	83-84 & doubles	UR-	0.90	1.20
		gR-	0.90	1.15

- **Effets des fréquences supérieures à 60 hertz: coefficient C_{PE}**

Ce coefficient est utilisé quand le courant de charge passant dans le fusible est à une fréquence supérieure à 100 hertz. Lorsque la fréquence est trop élevée il y a deux problèmes:

- l'effet de proximité.
- l'effet de peau.

Lorsqu'il y a plusieurs éléments fusibles en parallèle à l'intérieur du fusible le courant ne sera pas bien partagé par tous les éléments fusibles si sa fréquence est trop élevée et si un autre conducteur parcouru par le même courant est assez près du fusible. Le problème est le même quel que soit le sens du courant dans l'autre conducteur. Cette répartition inégale du courant est **l'effet de proximité**.

Il faut donc utiliser un coefficient correcteur puisque certains éléments fusibles sont surchargés.

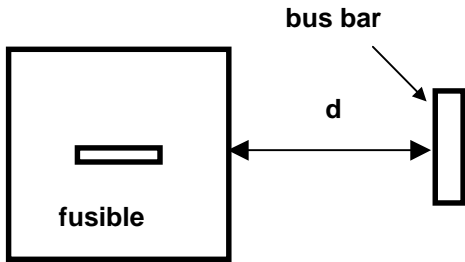


figure 10

TABLEAU 5

FREQUENCE (hertz)			C _{PE}
100	à	500	0.95
500	à	1500	0.90
1500	à	5000	0.80
5000	à	10000	0.70
10000	à	20000	0.60

Le déséquilibre est fonction de la fréquence et de la distance **d** entre le fusible et l'autre conducteur (lorsque la distance diminue le déséquilibre augmente).

Les valeurs indiquées dans le TABLEAU 5 ne sont pas très précises car elles ne tiennent pas compte du nombre d'éléments fusibles et ne montrent pas l'influence de la distance **d**. Ces valeurs sont néanmoins suffisantes pour une première approche.

Donc le courant nominal I_N du fusible est:
$$I_N \geq \frac{I_{RMS}}{A_1 * B_V * C_1 * C_{PE}}$$

- Effets des courants variables « cycliques » : coefficient A'_2

Ce coefficient est utilisé quand le courant de charge est « cyclique ». Le coefficient publié A_2 n'est qu'une valeur particulière de A'_2 correspondant au cas des cycles longs (c'est à dire les plus difficiles

I_{RMS} : valeur efficace du cycle de courant

Donc le courant nominal I_N du fusible est:
$$I_N \geq \frac{I_{RMS}}{A_1 * B_V * C_1 * C_{PE} * A'_2}$$

6.2. Surcharges répétitives : coefficient B'_2 pour définir la courbe de préarc du fusible

La valeur efficace du cycle de courant représenté dans la figure 11 est faible par rapport à la valeur de la surcharge I_C . **Dans ce cas il faut déterminer la position de la courbe de préarc par rapport à I_C .**

pour le temps t_{on} on calcule le courant de fusion I_F du fusible en divisant I_C par B'_2 .

$$I_F \geq \frac{I_C}{B'_2}$$

La valeur de B'_2 dépend du nombre de surcharges prévu.

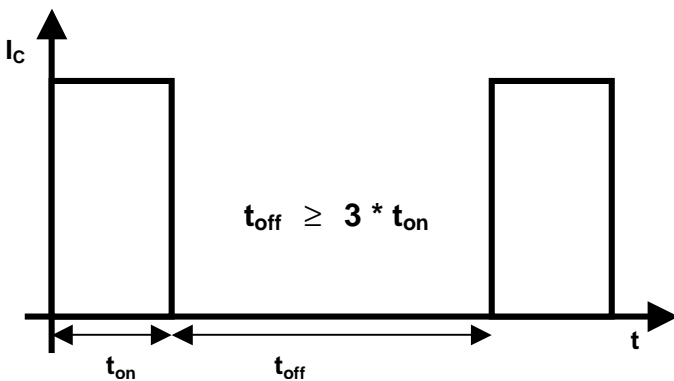


Figure 11

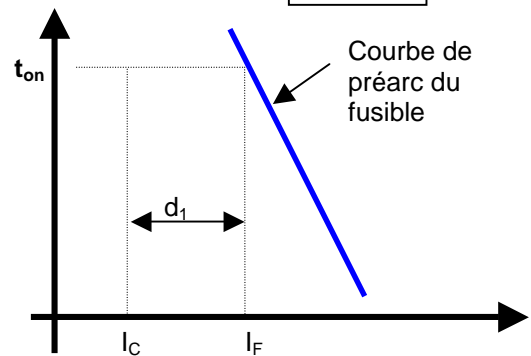


Figure 12

Pour tenir environ 100 000 surcharges il faut :

- $I_F = 3 I_C$ avec des fusibles PSC
- $I_F = 3,5 I_C$ avec des fusibles aM ou capsules UR- & gR-

6.3. Surcharges occasionnelles (coordination avec disjoncteur) : coefficient Cf'_3

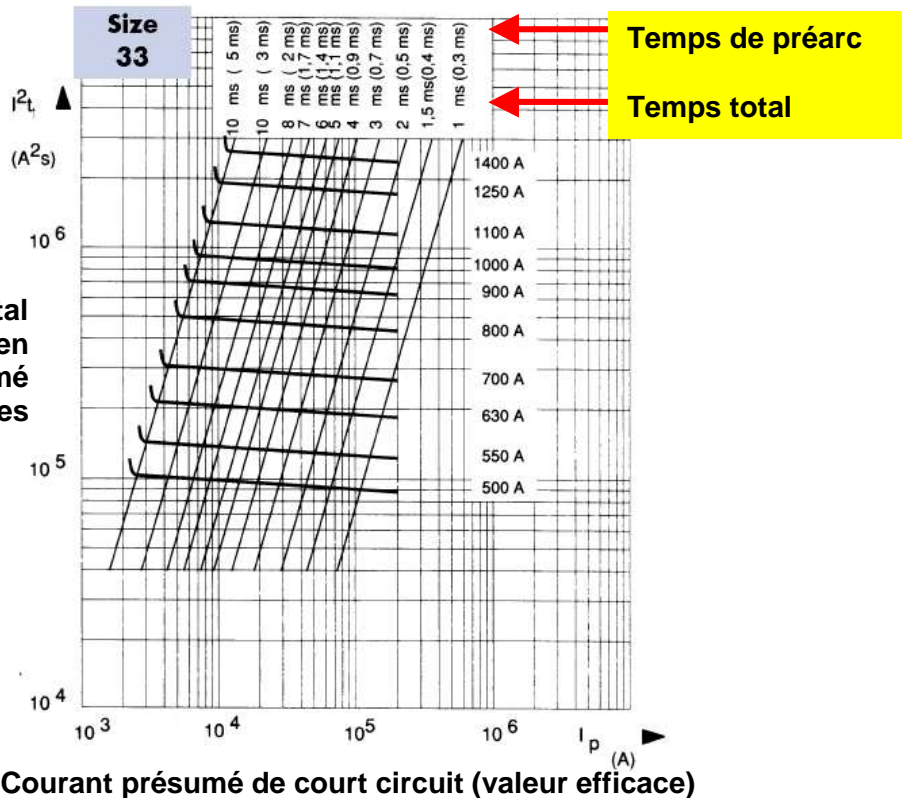
La méthode est la même que pour une surcharge répétitive. La seule différence est que le coefficient utilisé à une valeur fixe égale à

$$Cf'_3 = 0,75$$

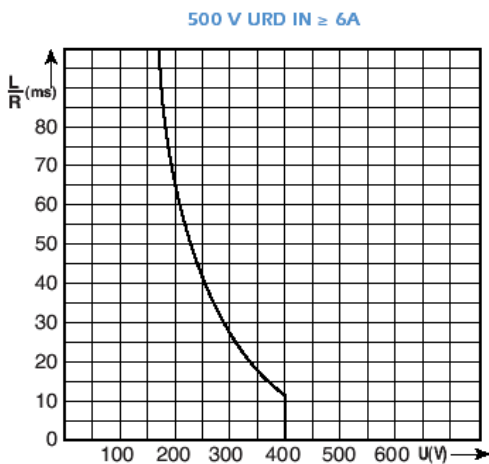
$$I_F \geq \frac{I_C}{Cf'_3} \quad \text{donc} \quad I_F = 1,33 I_C$$

ce coefficient est utilisé aussi pour vérifier la coordination entre fusible .
Il est valable pour environ 100 à 150 surcharges.

7. COURBE DU I^2t



8. COURBE DES POSSIBILITES EN COURANT CONTINU



Il n'est pas possible de sélectionner la tension nominale continue du fusible seulement à partir de la valeur de la tension.

Il est nécessaire de tracer la courbe $L/R = f(U)$

Cette courbe est tracée à partir des résultats des essais donnant l'énergie d'arc maximum. Des valeurs plus élevées de L/R sont acceptables lorsque le temps de préarc est plus petit que L/R .

Il faut toujours associer une valeur de L/R à la tension et il faut connaître les différentes valeurs possibles des courants de défaut.

Figure 14 : possibilités des fusibles CP 10.38 500 V URD

9. PRINCIPALES TECHNOLOGIES



Figure 6

10. EXEMPLE D'INSTALLATION ELECTRIQUE DANS UNE GRANDE USINE DE PRODUCTION (CIMENT, PAPIER , SUCRE etc...)

