

FERRAZ SHAWMUT IS NOW

 Mersen

FONCTIONNEMENT ET COMPORTEMENT DU FUSIBLE

1. INTRODUCTION

2. DESCRIPTION

3. FONCTIONNEMENT DU FUSIBLE SUR LES COURANTS DE DEFAUT

3.1. Introduction au préarc, à l'arc et aux deux types de surintensité

3.1.1. Le courant de court circuit

3.1.2. Fonctionnement du fusible sur des surcharges

3.2. Le préarc

3.3. L'arc

3.4. Deux grandes familles de fusibles

3.5. Energie de coupure, rôle de la matière de remplissage

4. COMPORTEMENT DU FUSIBLE SOUS LE COURANT NOMINAL DE CHARGE

5. DEFINITION DE LA CAPACITE EN COURANT I_{CC} , AUTRE DEFINITION DU COURANT NOMINAL

6. COMMENT AUGMENTER LE I_{CC} D'UN FUSIBLE

7. DEFINITIONS

1. INTRODUCTION

Les fusibles peuvent protéger toutes sortes de produits électriques: câbles, circuits moteurs, transformateurs, batteries etc. et même les semi-conducteurs. Il est bien établi qu'un semi conducteur de puissance, dû à sa faible capacité thermique, doit être associé à un dispositif de protection très rapide. Le fusible ultra rapide à très haut pouvoir de coupure est le meilleur dispositif de protection car il fonctionne avec le même phénomène thermique que le semi conducteur.

Ce document ne considère que le type de fusible le plus utilisé : le fusible rempli de sable et à fusion totalement enfermée. Il n'y a donc aucune manifestation extérieure lorsque ce type de fusible fonctionne sur un courant de défaut.

2. DESCRIPTION

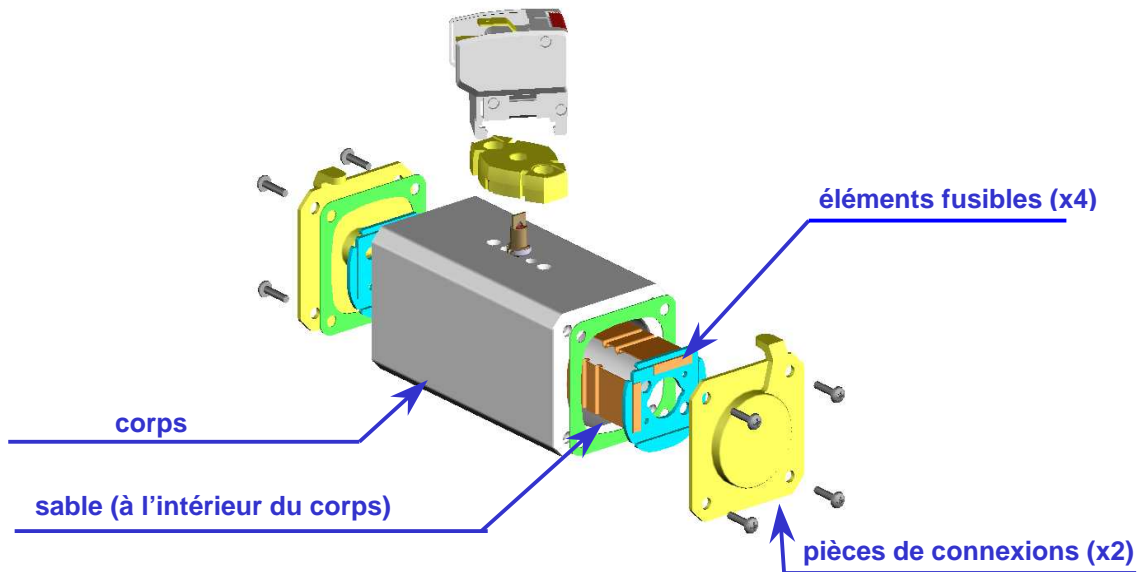


Figure 1

Les composants principaux (figure 1) d'un tel fusible sont:

- **Le corps:** fabriqué avec un matériau isolant (céramique ou fibre de verre par exemple). Le matériau utilisé doit avoir une bonne tenue mécanique et un bon comportement sous des températures élevées.
- **Les pièces de connexions:** elles sont généralement fabriquées avec du cuivre ou du laiton.
- **Les éléments fusibles:** un ou plusieurs éléments fusibles sont connectés aux pièces de connexions. Les formes et les dimensions des éléments fusibles dépendent des caractéristiques désirées et ils sont fabriqués dans un matériau ayant une conductibilité très élevée. Le matériau le plus utilisé est l'argent pur (99,99%) car il a une très petite résistivité, une bonne malléabilité, facile à usiner et une grande stabilité aux différentes températures sous lesquelles il travaille quand il est soumis à son courant nominal ou quand il doit supporter les surcharges normales de fonctionnement. Le long de l'élément fusible des rangées de sections réduites sont découpées avec précision (figure 2). Sur un courant de court circuit les sections réduites fondent très rapidement et simultanément. La forme des sections réduites changent les caractéristiques du fusible.



Figure 2 : élément fusible

- **La matière de remplissage:** c'est une matière inerte et anhydre tassée de manière à obtenir une porosité homogène et stable. On utilise généralement du sable. La granulométrie du sable est adaptée aux performances souhaitées pendant le régime d'arc. Le rôle de la matière de remplissage est d'absorber l'énergie d'arc et d'assurer une bonne isolation après l'extinction de cet arc.

3. FONCTIONNEMENT DU FUSIBLE SUR LES COURANTS DE DEFAUT

3.1. Introduction au prearc , à l'arc et aux 2 types de surintensité

Dès qu'une surintensité est plus élevée que le courant minimum de fusion du fusible, le fonctionnement du fusible est composée de deux périodes distinctes : la période de préarc et la période d'arc (figures 2 et 3)

La période de préarc: elle commence quand on applique le courant de défaut au fusible au temps 0 et se termine au temps t_p juste avant le moment de l'apparition de l'arc. Pendant la durée t_p du régime de préarc les caractéristiques du circuit ne sont pas modifiées par le fusible. Il est donc possible pendant cette période de définir le courant de défaut en fonction de la tension et des paramètres du circuit.

La période d'arc: elle commence exactement au moment où un ou plusieurs arcs en série apparaissent dans le fusible. Elle dure jusqu'à l'extinction complète de l'arc au temps t_t . L'extinction de l'arc dépend de la source de tension, des paramètres du circuit, ainsi que des caractéristiques du fusible. Le fusible modifie les caractéristiques du circuit pendant cette période.

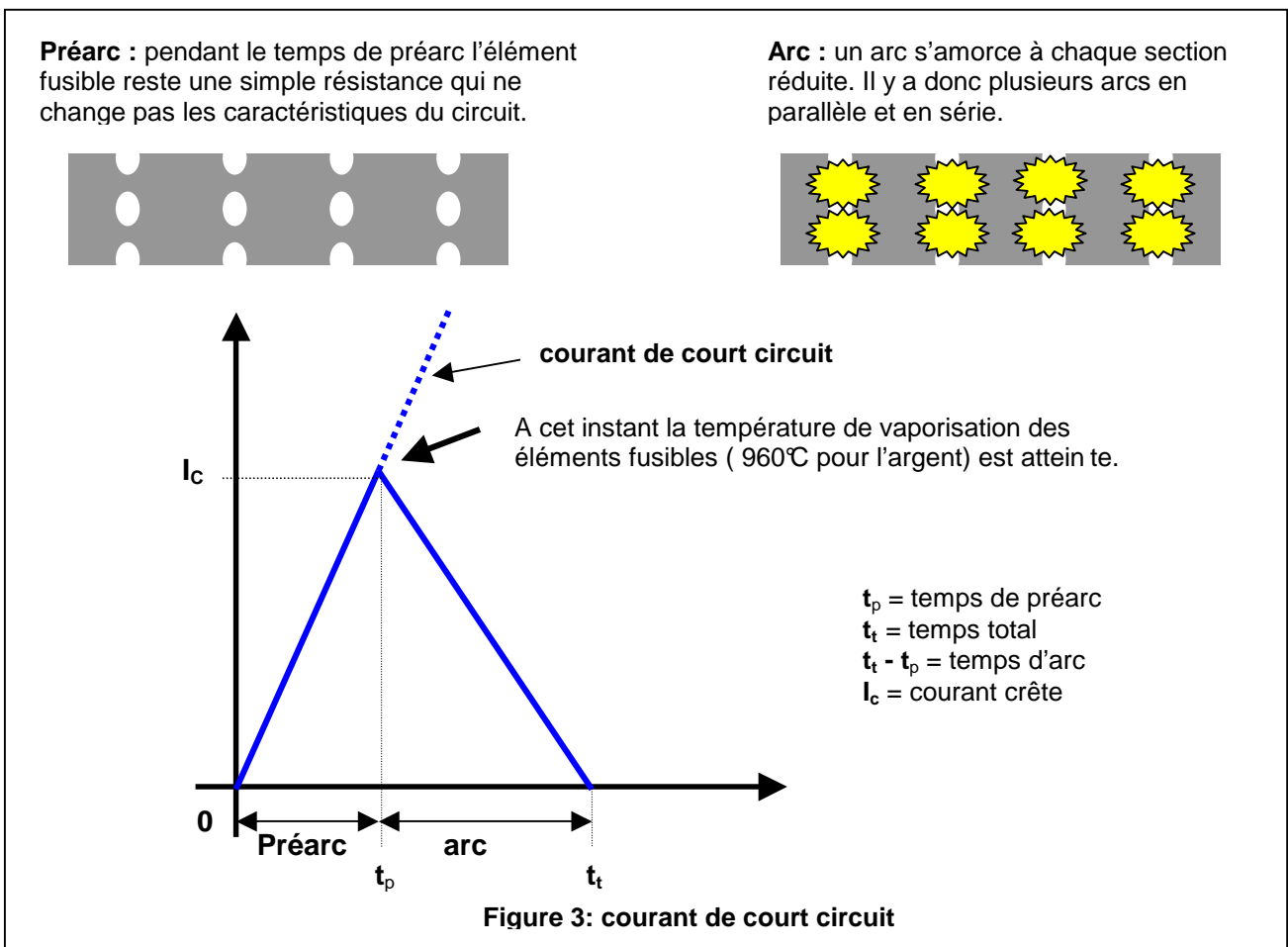
On distingue deux types de surintensité: le courant de court circuit (grandes valeurs) et la surcharge. Tous les fusibles fonctionnent bien sur un courant de court circuit. Mais la plupart des fusibles pour semi conducteurs ne sont pas conçus pour la protection contre les surcharges. D'autres dispositifs de protection doivent être utilisés pour ouvrir le circuit en cas de surcharge. Cependant un nouveau type de fusible pour semi conducteur, le gR (ainsi défini par la CEI 60269), peut protéger contre des surcharges aussi basses que 160% du courant nominal du fusible comme peut le faire un fusible gG protégeant des câbles.

Il y a donc deux grandes familles de fusibles.

3.1.1. Le courant de court circuit (figure 3) :

Tous les fusibles fonctionnent de la même manière lorsqu'ils coupent un courant de court circuit.

A la fin du prearc la température de fusion des éléments fusibles est atteinte sur chaque section réduite (960°C pour l'argent). Puis après un très court instant l'argent est transformé en vapeur et des arcs commencent simultanément sur toutes les sections réduites. Le courant est limité à la valeur I_c et commence à décroître vers la valeur zéro.



3.1.2. Fonctionnement du fusible sur des surcharges (figure 4)

Lorsque le temps de préarc est long il y a deux sortes de problèmes:

- **le corps du fusible est endommagé :**

pour des durées supérieures à 1 seconde il y aura un échauffement excessif des éléments fusibles (plusieurs centaines de degrés) entraînant des dégâts dans le corps du fusible tels que :
des **fissures** pour des corps en céramique
ou une **carbonisation** des corps en fibre de verre imprégnés de d'autres matériaux (époxy, mélamine, silicone, ...).

Ces dégâts se produisent avant la fusion des éléments fusibles.

La courbe CC' (voir le §3.3.) qui est tracée sur la courbe temps courant de certains fusibles indique le moment où le corps du fusible est endommagé.

Tous les fusibles avec la courbe CC' sont des fusibles du type « a » selon la CEI 60269.

- **L'arc sort du fusible par les extrémités :**

lorsque le temps de préarc est long il n'y a pas eu fusion simultanée de toutes les rangées de sections réduites. Il y aura donc apparition d'un seul arc qui pourra s'allonger rapidement puisqu'il sera alimenté par toute la tension du circuit. Il faudra donc dans ce cas éteindre l'arc avant qu'il puisse percer les extrémités du fusible.

Les fusibles qui ne peuvent pas interrompre des surcharges capables de faire fondre les éléments fusibles sont également des fusibles du type « a » selon la CEI 60269.

Pour les deux raisons ci dessus un autre dispositif de protection doit être associé au fusible de type « a ». Ces fusibles ont donc un pouvoir de coupure minimal qui peut être de l'ordre de deux à plus de 6 fois le courant nominal du fusible.

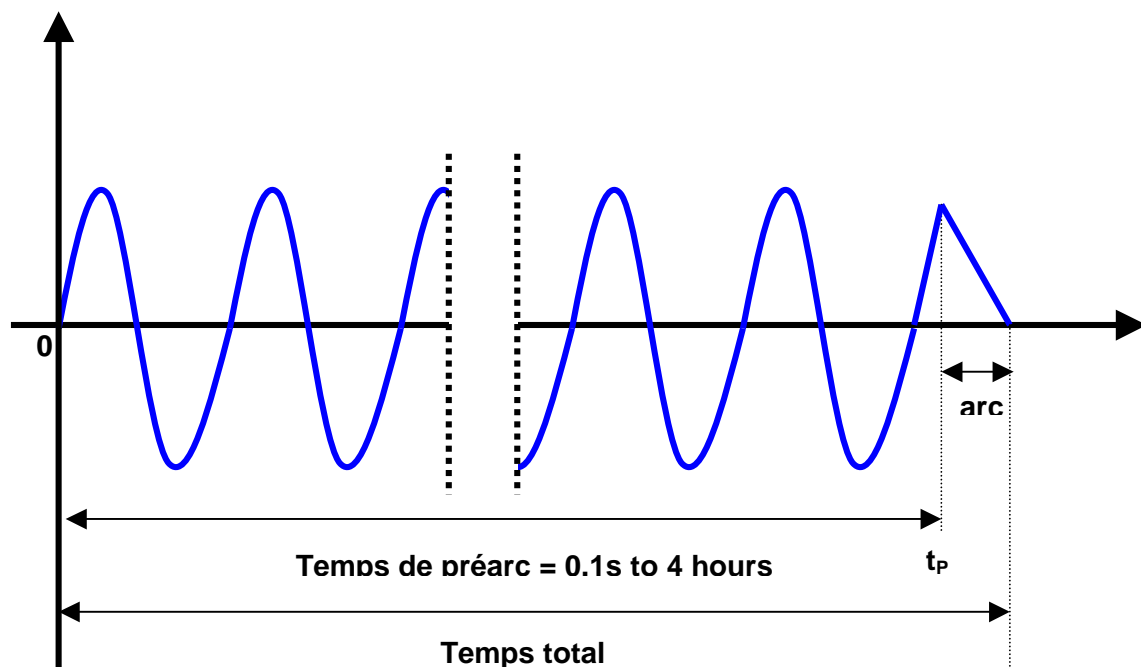


Figure 4: surcharge

La CEI mentionne: pour des durées supérieures à 0.1 s, la différence entre la durée de préarc et le temps total de fonctionnement est négligeable.

3.2. La période de préarc

Pendant cette période, il y a un échauffement des éléments fusibles (et même du fusible tout entier si le temps de préarc est suffisamment long) en conséquence directe de l'effet joules produit par le courant passant dans le fusible.

Par conséquent, la température des éléments fusibles s'élève jusqu'au point de fusion (960°C pour l'argent), puis il y a une conversion de la phase solide en phase liquide, puis un nouvel échauffement jusqu'à la température de vaporisation et finalement la conversion de la phase liquide en phase vapeur.

Pendant la phase solide, une partie de l'énergie thermique est emmagasinée dans l'élément fusible, une autre partie est transmise à l'environnement du fusible et une autre partie est transmise vers les pièces de connexion par conduction thermique dans les éléments fusibles.

Pour réduire le I^2t de préarc on introduit des "sections réduites" le long des éléments fusibles tout en maintenant une résistance électrique faible (figure 5). Cela permet d'obtenir des courbes temps / courant de formes différentes.

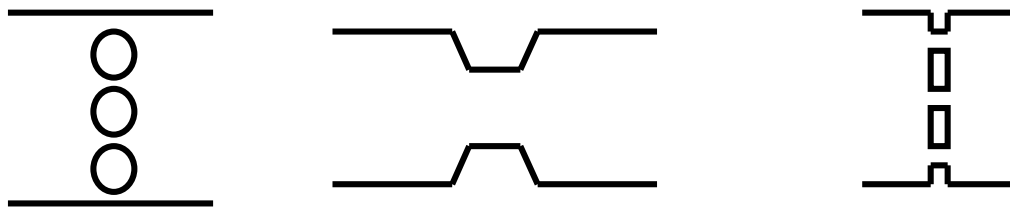


Figure 5: différentes sortes de sections réduites

3.3. La période d'arc

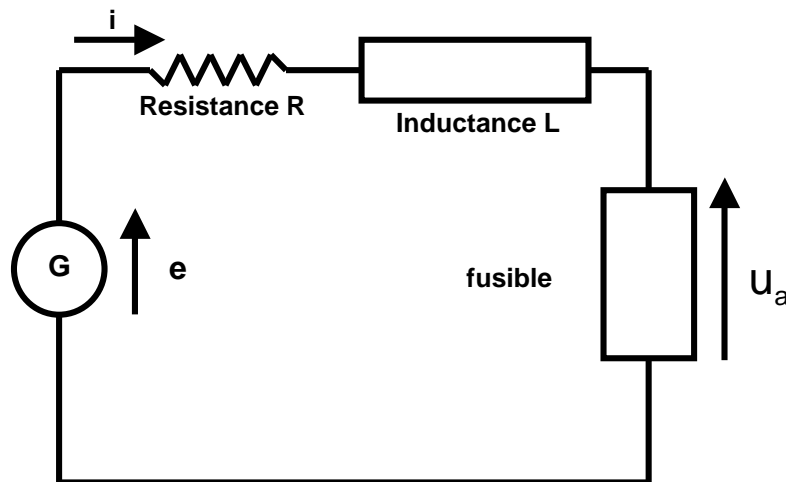


figure 6

Pendant la période d'arc, les différentes tensions mesurables représentées dans le circuit de la figure 6 permettent d'écrire l'équation suivante :

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} + u_a$$

avec:

e = tension fournie par le générateur

u_a = tension d'arc du fusible

R = résistance du circuit

L = inductance du circuit

au moment où l'arc s'amorce, la valeur crête I_c du courant passant dans le fusible est déterminée par les paramètres du circuit et par la valeur du $I^2 t$ de préarc du fusible.

A partir de cette valeur I_c , le courant redescend vers la valeur zéro dans un temps qui dépend de la tension d'arc (figure 7)

Par conséquent le $\frac{di}{dt}$ est négatif pendant le processus d'extinction de l'arc.

R_i a une valeur négligeable par rapport aux autres chutes de tension.

Ceci permet d'obtenir la relation suivante :

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L}(e - u_a)$$

Ceci montre très clairement que le $\frac{di}{dt}$ est négatif seulement quand $u_a > e$

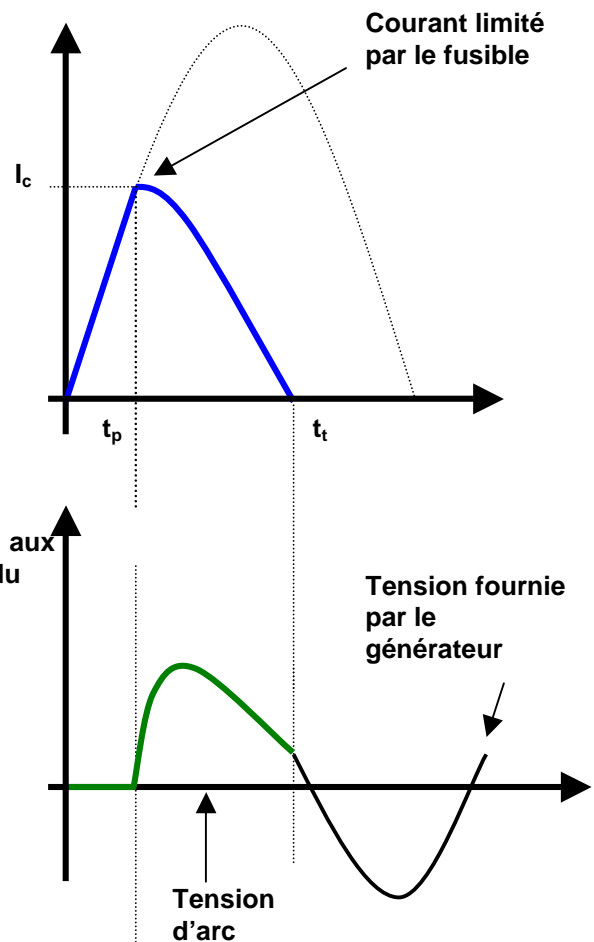


Figure 7: oscillogramme de coupure

Conclusion: il est indispensable de générer une tension d'arc supérieure à la tension de la source de puissance pour que le fusible annule le courant et ouvre définitivement le circuit.

3.4. Deux grandes familles de fusibles

Une autre technique découverte par Mr METCALF consiste à utiliser un alliage à bas point de fusion ou même de l'étain pur (figure 8) pour forcer la fusion au milieu de l'élément fusible lorsqu'une surcharge doit être interrompue par le fusible. Ce principe a permis de créer deux grandes familles de fusibles.

fusible type « a »: aM, URD, A70QS etc.)
Généralement des fusibles très rapides ou ultra rapides.



fusible type « g »: (gRB, gG, etc.) élément fusible avec thermo-protection ("M-effect")

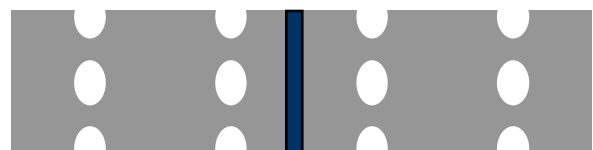


Figure 8 : deux grands types d'éléments fusibles pour deux grandes familles de fusibles.

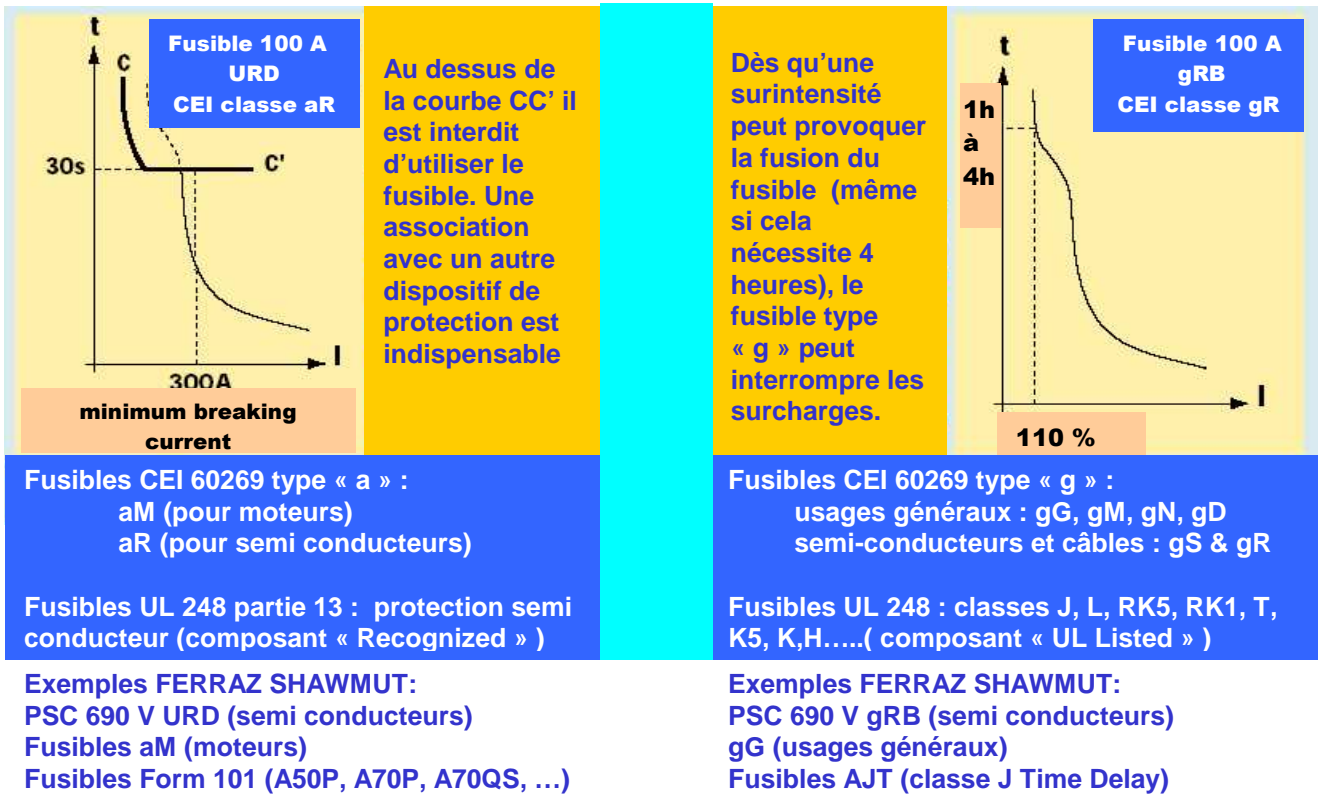


Figure 9: deux grandes familles de fusibles

• Comparaison des courbes temps-courant de 4 fusibles CEI 60269

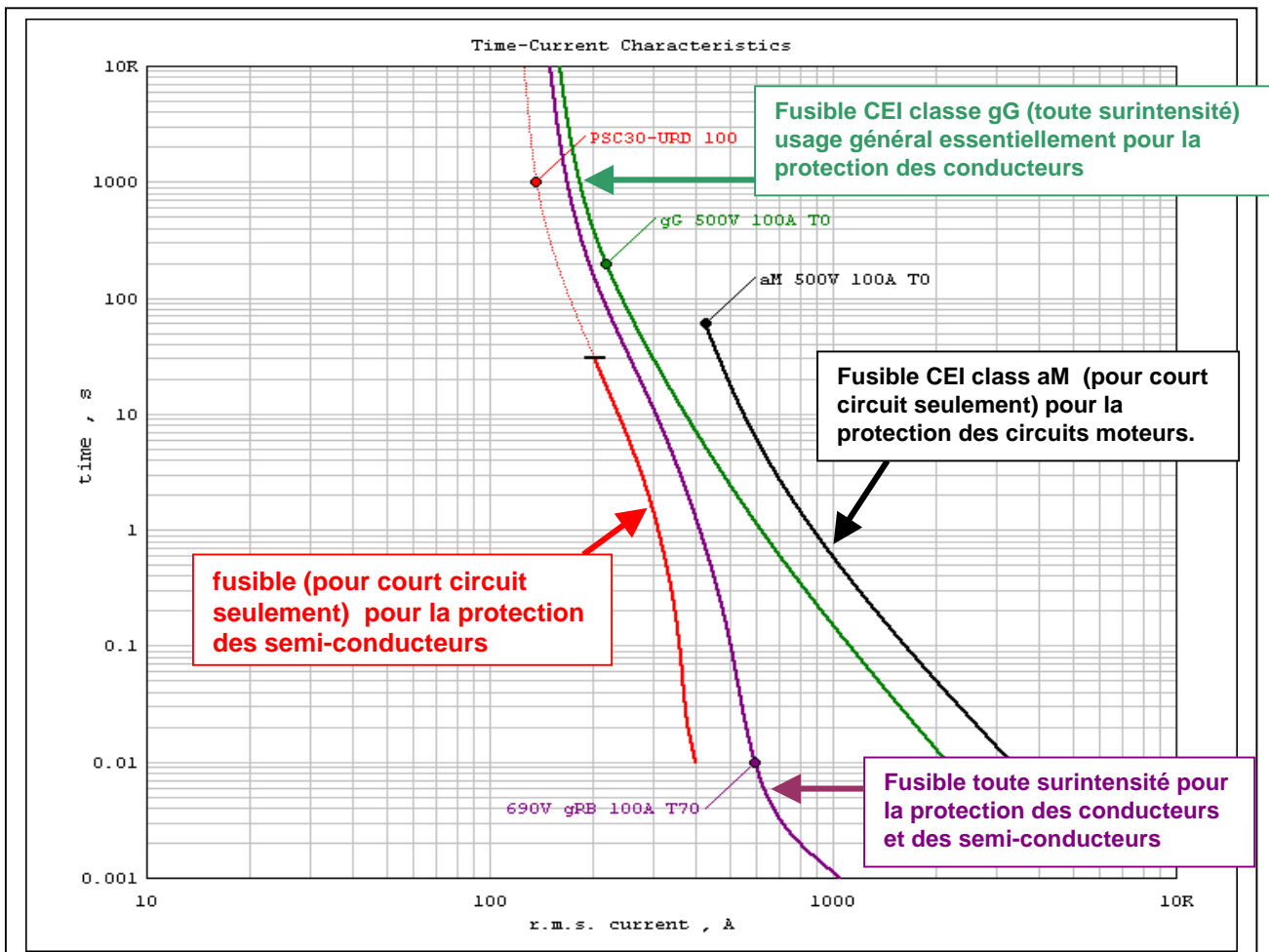


Figure 10: comparaison des courbes temps/courant de 4 fusibles CEI 269 différents

3.5. Energie de coupure, le rôle capital joué par la matière de remplissage

L'énergie de coupure dissipée dans le fusible est l'énergie produite pendant le régime d'arc:

$$W_a = W_L + W_S - W_R$$

Avec :

$$W_a = \int_{t_p}^{t_i} u_a i dt = \text{énergie d'arc}$$

$$W_L = \frac{1}{2} L i_c^2 = \text{énergie stockée dans l'inductance à la fin du régime de préarc}$$

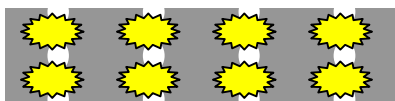
$$W_S = \int_{t_p}^{t_i} e i dt = \text{énergie fournie par la source de puissance pendant le régime d'arc}$$

$$W_R = \int_{t_p}^{t_i} R i^2 dt = \text{énergie dissipée dans la résistance du circuit}$$

Élément fusible pendant l'interruption d'un grand courant



Préarc: toutes les sections réduites de l'élément fusible fondent simultanément pour des courants de grande amplitude. L'énergie est négligeable car la chute de tension aux bornes du fusible est très petite.



Arc: des arcs multiples en série (4 dans cet exemple) apparaissent. L'énergie est très élevée car à cet instant le courant a une valeur crête élevée et au même moment la tension aux bornes du fusible est plus élevée que celle du circuit.



Les grains de sable en contact avec l'arc fondent et produisent une substance ressemblant à du verre connue sous le nom de « **fulgurite** ». La quantité de sable fondue reflète l'énergie d'arc

Figure 11

Sable fondu = fulgurite



Figure 12

- Le sable sert à confiner l'arc et à créer une pression qui aide à éteindre l'arc mais en même temps la porosité du sable évite que la pression soit trop élevée sinon le fusible peut exploser.
- La porosité du sable permet également aux vapeurs d'argent (si l'élément fusible est en argent) de s'échapper de la zone de l'arc en passant entre les grains de sable facilitant ainsi l'extinction de l'arc.
- Après l'extinction de l'arc c'est le sable qui détermine la résistance d'isolement du fusible.
- La photo (figure 12) montre l'aspect d'un élément fusible après l'interruption d'un courant de court circuit. La quantité importante de sable fondu indique que l'énergie de l'arc était importante.

4. COMPORTEMENT DU FUSIBLE SOUS LE COURANT NOMINAL DE CHARGE

Si la rapidité d'un fusible (I^2t total) est essentielle pour la protection des semi-conducteurs, il ne faut pas pour autant oublier que le comportement du fusible sous le courant de charge qu'il doit supporter dans les conditions réelles d'utilisation est également très important. Il peut en effet avoir une grande influence sur la température de fonctionnement d'un équipement et en outre il peut conditionner la durée de vie de l'équipement.

Le courant maximum d'utilisation d'un fusible dépend largement de deux groupes de paramètres qui influencent son comportement :

- Les conditions environnantes (température ambiante, ventilation, raccordements etc.). Ces conditions sont dans la plupart des cas très éloignées des conditions d'essais définies par la CEI ou les UL.
- Les variations du courant de charge et les surcharges

Contrairement au semi-conducteur pour lequel il suffit de connaître la résistance thermique entre la jonction et le boîtier, le flux de chaleur généré par les éléments fusibles va vers l'air ambiant par différents chemins (figure 13) comme:

- connexions: elles ne sont généralement pas symétriques. Très souvent on peut même voir une connexion refroidie par une plaque froide à eau et l'autre connexion chauffée par la tresse du semi-conducteur.
- Le corps du fusible: est en contact direct avec l'air ambiant dont la température n'est pas toujours uniforme.

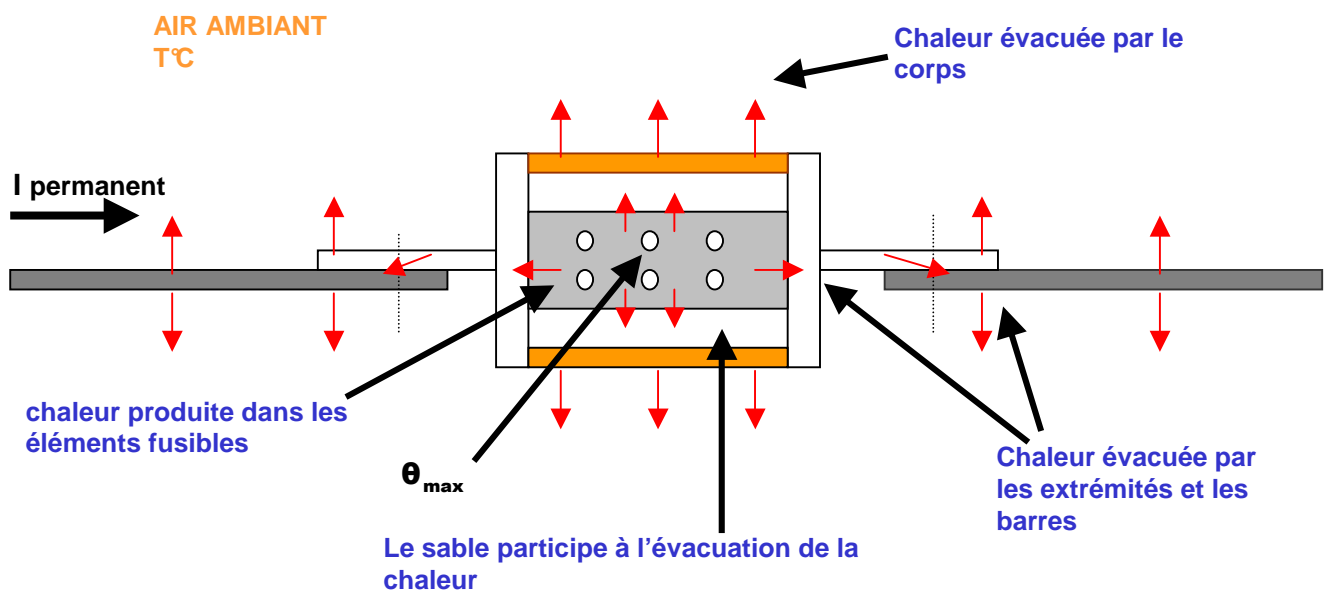


Figure 13

Il n'est pas possible de déterminer une température pour le corps ou les connexions pour contrôler les conditions de refroidissement des éléments fusibles.

Une autre différence importante entre le fusible et un semi-conducteur est la constante de temps thermique. Ce paramètre a une valeur suffisamment élevée dans le fusible pour permettre une sensibilité plus faible aux variations de courant dues aux formes des ondes telles que les ondes sinusoïdales ou celles redressées dans les convertisseurs.

D'autre part la durée de vie d'un fusible est largement affectée par les courants de charge variables et cycliques dont la période est entre quelques secondes et plusieurs heures. Malgré toutes les précautions et les améliorations technologiques, les dilatations et contractions qui se succèdent dans les éléments fusibles à cause des échauffements et refroidissements successifs dus aux variations de courant provoquent un vieillissement du métal pouvant aboutir à un fonctionnement indésirable du fusible.

5. DEFINITION DE LA CAPACITE EN COURANT I_{CCC} , AUTRE DEFINITION DU COURANT NOMINAL

Comme le montre la figure 13 la température maximum admissible θ_{max} est dans les bras (sections réduites) proches du milieu des éléments fusibles.

Dans les fusibles pour semi-conducteurs la valeur de cette température est déterminée par le fabricant du fusible en fonction de :

- des matériaux choisis pour le corps et les pièces de connexion
- la conception des éléments fusibles
- la durée de vie prévue.

Pour les fusibles à usages généraux les normes spécifient les échauffements des pièces de connexion ainsi que les puissances dissipées maximum.

Le courant I est augmenté jusqu'au moment où θ_{max} (après équilibre thermique) est atteint. Quand les conditions de fonctionnement sont différentes des conditions d'essai définies par la CEI 60269 cette valeur de I est le **I_{CCC}** du fusible

Le courant nominal (ou "calibre") du fusible est donc le **I_{CCC}**, obtenu sous les conditions définies par les normes telles que la CEI 60269 et UL 248

6. COMMENT AUGMENTER LE I_{CCC} D'UN FUSIBLE

Le fusible peut supporter un courant permanent supérieur à son courant nominal I_n avec un bon refroidissement à air ou en montant le fusible sur des connexions à basse température (refroidissement à liquide)

Le tableau ci dessous montre que l'avantage d'une des deux solutions dépend de la longueur du fusible.

		FUSIBLE		
		" fusibles courts " Un < 700v	" fusibles longs " Un = 1000 V à 2000V	fusibles très longs Un > 3000v
Evacuation de la chaleur		80% connexions 20 % corps	20% connexions 80% corps	1% connexions 99% corps
Influence sur le I_{CCC} (Capacité en Courant)	Vitesse de l'air 5m/s	Nécessaire à la fois sur le corps et les connexions I_{CCC} = 1,25 I_n	Nécessaire sur le corps I_{CCC} = 1.25 I_n	Nécessaire sur le corps I_{CCC} = 1.25 I_n
	température sur les contacts du fusible inférieure à 60°C	La température ambiante n'a pas d'influence I_{CCC} = 1,25 I_n to 1,35 I_n	I_{CCC} = 1,05 to 1.25 I_n	I_{CCC} = I_n

Ces coefficients sont particulièrement intéressants pour des courants permanents stables ou des courants ayant des petites variations.

Lorsque le courant nominal du fusible est déterminé essentiellement par la tenue à des surcharges, le refroidissement n'apporte pas de réel avantage.

Le document "**Calcul du courant nominal du fusible**" montre comment choisir le courant nominal du fusible lorsque le fusible doit supporter des surcharges ou des courants cyclés.

7. DEFINITIONS

- **Tension nominale (ou assignée):**

selon la CEI 60269 les fusibles autres que 690V sont testés sous une tension comprise entre 110% et 115% de leur tension assignée.

Les fusibles 690 V sont testés entre 105% et 110 % de leur tension nominale c' est à dire au moins sous 725 V.

En Amérique du Nord les fusibles sont testés selon la norme UL entre 100% et 105% de leur tension assignée.

- **Courant assigné ou courant nominal:**

valeur du courant que le fusible peut supporter en permanence sans détérioration dans des conditions spécifiées.

- **Courant présumé d'un circuit:**

courant qui circulerait dans le circuit si un fusible s'y trouvant inséré était remplacé par une connexion d'impédance négligeable. Sa valeur en courant alternatif est la valeur efficace de la composante alternative.

- **Pouvoir de coupure:**

valeur (en courant alternatif la valeur efficace de la composante alternative) du courant présumé qu'un fusible est capable d'interrompre sous une tension spécifiée et dans des conditions prescrites d'emploi et de comportement.

- **Courant conventionnel de non-fusion (I_{nf}):**

valeur spécifiée du courant qui peut être supportée par le fusible pendant un temps spécifié (temps conventionnel) sans fondre.

- **Courant conventionnel de fusion (I_f):**

valeur spécifiée du courant qui provoque le fonctionnement du fusible dans un temps spécifié (temps conventionnel)

- **Fusible type "g" (antérieurement: à usage général):**

fusible limiteur de courant capable d'interrompre, dans des conditions spécifiées, tous courants qui provoquent la fusion du fusible jusqu'à son pouvoir de coupure assigné.

- **Fusible type "a" (antérieurement: d'accompagnement):**

fusible limiteur de courant capable d'interrompre, dans des conditions spécifiées, tous courants compris entre la valeur minimale du courant indiquée sur sa caractéristique temps courant et son pouvoir de coupure assigné.