



Collection technique

Cahier technique n° 128

Conception et utilisation
de fusibles limiteurs MT

O. Bouilliez

J.C. Perez Quesada



Les Cahiers Techniques constituent une collection d'une centaine de titres édités à l'intention des ingénieurs et techniciens qui recherchent une information plus approfondie, complémentaire à celle des guides, catalogues et notices techniques.

Les Cahiers Techniques apportent des connaissances sur les nouvelles techniques et technologies électrotechniques et électroniques. Ils permettent également de mieux comprendre les phénomènes rencontrés dans les installations, les systèmes et les équipements.

Chaque Cahier Technique traite en profondeur un thème précis dans les domaines des réseaux électriques, protections, contrôle-commande et des automatismes industriels.

Les derniers ouvrages parus peuvent être téléchargés sur Internet à partir du site Schneider Electric.

Code : <http://www.schneider-electric.com>

Rubrique : **Le rendez-vous des experts**

Pour obtenir un Cahier Technique ou la liste des titres disponibles contactez votre agent Schneider Electric.

La collection des Cahiers Techniques s'insère dans la « Collection Technique » de Schneider Electric.

Avertissement

L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas reproduits dans le présent ouvrage, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni de conséquences liées à la mise en œuvre des informations et schémas contenus dans cet ouvrage.

La reproduction de tout ou partie d'un Cahier Technique est autorisée après accord de la Direction Scientifique et Technique, avec la mention obligatoire : « Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (à préciser) ».

n° 128

Conception et utilisation de fusibles limiteurs MT

Olivier BOUILLIEZ



Diplômé ingénieur de l'Ecole Centrale de Lyon en 1976, il entre en 1977 chez Merlin Gerin. Il a successivement occupé plusieurs postes de responsabilités dans le service technique du département Appareillage et, notamment en tant qu'ingénieur d'études, puis chef de groupe et ensuite responsable du développement des produits nouveaux. Il a ainsi été conduit à participer puis à superviser le développement de la gamme Fusarc, des fusibles moyenne tension de la marque Merlin Gerin. Actuellement il poursuit sa carrière comme Directeur du marketing Bâtiment et Infrastructure du pays France au sein de Schneider Electric après avoir été directeur de programme de la technologie de coupure dans le vide, puis directeur d'activité stratégique Moyenne Tension et chef du département Equipements.



Juan Carlos PEREZ QUESADA

Diplômé de l'Ecole Universitaire d'Ingénierie Technique Industrielle en 1993. Dès 1994 il rejoint les services de Recherches et Développement de MESA - Manufacturas Eléctricas, S.A.- filiale espagnole de Schneider Electric. Il a participé à plusieurs projets de développement de produits et de recherches dans le domaine des fusibles moyenne tension ; domaine dont il est maintenant le responsable technique, de la recherche et du Développement pour Schneider Electric.

Lexique

I1	Pouvoir de coupure maximal
I2	Courant donnant l'énergie d'arc maximale
I3	Courant minimal de coupure
I_{eff}	Valeur efficace du courant présumé
I_N	Courant assigné
I_p	Courant coupé limité
U_N	Tension de service entre phases
U_p	Tension de coupure
U_{Res}	Tension du réseau

Conception et utilisation de fusibles limiteurs MT

Le fusible limiteur MT est largement utilisé pour la protection de transformateurs, de moteurs ou d'autres récepteurs.

Point n'est besoin d'énoncer ici tous les avantages de cet organe qui lui confèrent son succès. Son bas coût, et ses caractéristiques de limitation qui réduisent considérablement l'amplitude du courant et l'énergie libérée en cas de court-circuit, sont parmi ses caractéristiques les plus appréciées. À ce jour, en moyenne tension (3,6 à 36 kV), aucun autre dispositif ne peut prétendre égaler le fusible sur ce point, ni même prétendre l'approcher.

Il est tout aussi certain que cet organe a des limites qu'il convient de ne pas dépasser. Si certains utilisateurs refusent d'utiliser les fusibles, c'est à cause d'expériences malheureuses liées à un non-respect de certaines règles élémentaires de construction ou d'utilisation ayant entraîné des défauts en exploitation. Ce n'est qu'après avoir passé en revue les différents points délicats de la conception d'un élément de remplacement, qu'il sera possible de dégager naturellement les règles d'utilisation qui permettent, si elles sont respectées, d'assurer un service optimal et sans faille du fusible.

Sommaire

1 Les caractéristiques assignées	1.1 Rappel	p. 4
	1.2 U_N tension assignée	p. 4
	1.3 I_N courant assigné	p. 5
	1.4 I_3 courant minimal de coupure	p. 5
	1.5 I_2 courant donnant des conditions voisines de l'énergie d'arc maximale	p. 5
	1.6 I_1 ou pouvoir de coupure maximal	p. 6
	1.7 Caractéristique temps-courant	p. 6
	1.8 Le courant coupé limité	p. 7
	1.9 L'énergie dissipée	p. 8
	1.10 La puissance dissipée	p. 8
2 Constitution d'un élément de remplacement	2.1 Les calottes d'extrémités	p. 9
	2.2 Le tube enveloppe	p. 10
	2.3 Le noyau	p. 11
	2.4 L'élément fusible	p. 11
	2.5 La poudre d'extinction	p. 13
	2.6 Le percuteur	p. 13
3 Utilisation	3.1 Généralités	p. 14
	3.2 Protection des transformateurs	p. 14
	3.3 Protection des moteurs	p. 16
	3.4 Protection des batteries de condensateurs	p. 18
	3.5 Synthèse	p. 21
4 Annexes	4.1 Annexe 1 : Résistance à froid des fusibles Fusarc-CF	p. 22
	4.2 Annexe 2 : Caractéristiques temps-courant de la gamme de fusibles Fusarc-CF	p. 24
	4.3 Annexe 3 : Utilisation de fusibles en parallèle	p. 26

1 Les caractéristiques assignées

1.1 Rappel

La norme CEI 60282-1 définit trois classes de fusibles limiteurs de courant selon la zone dans laquelle ils peuvent être utilisés :

Fusible associé

Pour les applications dans lesquelles on peut montrer par le calcul ou par expérience en service que de faibles valeurs de courant de défaut sont improbables. Mais, il faut s'assurer que le courant minimal de coupure assigné de l'élément de remplacement est inférieur au plus petit courant de court-circuit susceptible d'apparaître en amont du dispositif de protection à basse tension.

Fusible d'usage général

Lorsque l'expérience ou le calcul indiquent qu'il peut y avoir de très faibles surintensités sur le

réseau (c'est-à-dire inférieure à environ quatre fois le courant assigné du fusible).

Fusible à coupure intégrale

Particulièrement recommandé pour les applications où les surintensités de courant peuvent être aussi faibles que le courant minimal de fusion du fusible et lorsque l'élément doit être déclassé pour être utilisé dans une enveloppe.

Ce Cahier Technique, principalement applicable aux fusibles associés, traite de concepts qui sont applicables à toutes les classes de fusibles. Les quelques définitions de base qui suivent peuvent constituer les bases d'un dictionnaire du fusible et faciliter les échanges sur ce sujet entre les fabricants de fusibles, les concepteurs d'installation et les exploitants.

1.2 U_N tension assignée

C'est la tension de service entre phases (exprimée en kV) la plus élevée du réseau sur lequel pourra être installé le fusible.

Les normalisateurs ont fixé une liste de valeurs préférentielles pour les tensions assignées. Les essais normalisés garantissent le bon fonctionnement d'un fusible de tension assignée U_N sur un réseau de tension U_{Res} si sa valeur de U_N , sélectionnée dans cette liste (cf. **fig. 1**), est immédiatement supérieure à U_{Res} .

$$U_N = 3,6 - 7,2 - 12 - 17,5 - 24 - 36$$

Fig. 1 : liste de valeurs préférentielles (kV) fixée par les normalisateurs.

Il est, pour des raisons de coupure, impossible d'utiliser un fusible de tension U_N sur un réseau dont U_{Res} est supérieure à U_N . Le contraire, obligatoire, est parfois possible jusqu'à des valeurs de U_N bien supérieures à celle du réseau. Cela est possible grâce à certaines particularités de conception qui limitent le niveau

de surtension de coupure U_p et permettent au constructeur (et à lui seul) de garantir un comportement sain du fusible.

Par exemple, dans le cas d'un réseau dont U_{Res} est de 10 kV, il convient de sélectionner un fusible de tension $U_N = 12$ kV.

Dans le cas de la gamme Fusarc-CF, il est tout à fait possible, pour d'éventuelles raisons de standardisation, d'installer un fusible de $U_N = 17,5$ kV ou même 24 kV.

Cas d'utilisation en monophasé

Les fusibles sont normalement conçus pour être utilisés sur un réseau triphasé. Dans ce cas, la tension de rétablissement qui leur est appliquée après coupure sur court-circuit est égale à :

$$\frac{U_{Res}}{\sqrt{3}} \times 1,5$$

Le coefficient 1,5 est dû au déphasage des zéros de courant, dans un réseau triphasé, qui induit un glissement du point neutre lors de la coupure du premier fusible.

Un fusible de tension assignée U_N est donc, en monophasé (cf. **fig. 2**), essayé à :

$$U_N \times \frac{1,5}{\sqrt{3}} = 0,87 U_N$$

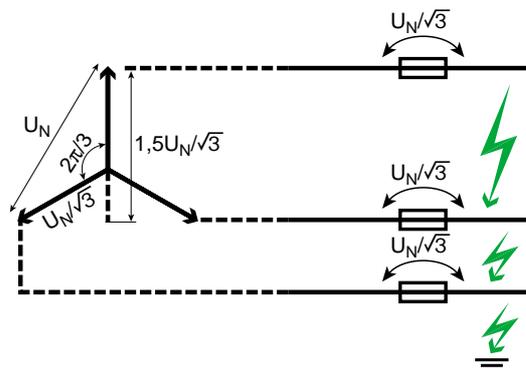


Fig. 2 : tension aux bornes d'un coupe-circuit en cas de défaut triphasé sur un réseau à neutre isolé.

Dans le cas d'utilisation sur un réseau monophasé de tension U_{Res} , il convient donc de sélectionner un fusible tel que :

$$U_N \geq \frac{U_{Res}}{0,87}$$

1.3 I_N courant assigné

Le courant assigné, lui aussi choisi dans une liste préférentielle, est celui qui, parcourant l'élément de remplacement installé sur un socle donné, provoque des échauffements n'excédant pas des valeurs normalisées (variable selon la nature des matériaux, environ 65 K pour les contacts). Il faut également que l'ensemble du coupe-circuit soit capable de supporter sans dommage ce courant en permanence. Cette seconde contrainte est très généralement moins sévère que la première.

Il convient de noter que cette considération purement thermique est modifiée dès que

l'élément de remplacement est installé différemment. C'est le cas des fusibles placés dans des enveloppes et, dans une moindre mesure, lorsque l'élément de remplacement est monté sur un socle différent de celui utilisé pour l'essai. Selon le montage et l'environnement de l'élément de remplacement, le courant assigné, caractéristique vérifiée par les constructeurs de fusibles, doit être affecté d'un coefficient correcteur et cela dès que la température de son environnement dépasse 40 °C.

1.4 I_3 courant minimal de coupure

Le courant I_3 est une valeur limite à respecter pour que la fusion d'un fusible provoque assurément la coupure d'un circuit électrique.

Contrairement à une opinion très répandue, il ne suffit pas, pour un court-circuit MT, qu'un fusible fonde pour qu'il interrompe le courant. Pour des valeurs de courant inférieures à I_3 , le fusible

fond, mais peut ne pas couper : l'arc reste maintenu jusqu'à ce qu'une intervention extérieure interrompe le courant. Il faut donc absolument éviter de solliciter un coupe-circuit dans la zone comprise entre I_N et I_3 . Les valeurs usuelles de I_3 sont comprises entre 2 et 6 I_N .

1.5 I_2 courant donnant des conditions voisines de l'énergie d'arc maximale

Déterminée à partir des caractéristiques de fusion du coupe-circuit, cette valeur de courant donne un temps de préarc d'environ 5 ms. Elle permet aux essayeurs et aux constructeurs de garantir la coupure pour toute la zone de courant comprise entre I_3 et I_1 .

La valeur de I_2 , dépendant de la conception des éléments fusibles, se situe environ entre 50 et 100 I_N .

1.6 I1 ou pouvoir de coupure maximal

■ Il s'agit du courant présumé de défaut le plus élevé que le fusible peut interrompre. Cette valeur est la valeur maximale à laquelle l'élément de remplacement a été essayé. Il est donc nécessaire de s'assurer que le courant de court-circuit du réseau est au plus égal au courant I1 du fusible sélectionné. Le courant I1 est très élevé : de 20 kA à 50 kA, voire plus.

■ Lorsqu'un courant de court-circuit apparaît, l'élément fusible fond en quelques millisecondes. Immédiatement, une tension d'arc apparaît qui, opposée à celle du générateur et supérieure à cette dernière, tend à réduire la valeur du courant. Le fusible se comporte comme une résistance variable qui, de quasi nulle avant la fusion, augmenterait jusqu'au zéro du courant, provoquant une modification simultanée de la valeur du courant et du déphasage entre ce dernier et la tension du générateur (cf. **fig. 3**).

Deux notions découlent de ce processus :

- la tension d'arc maximale U_p ou tension de coupure, qu'il importe de minimiser,
- le courant I_p qui est la valeur instantanée du courant de court-circuit qui traverse réellement le coupe-circuit.

I_p , appelé courant coupé limité, est souvent plus faible que I_1 , qui est appelé courant présumé car n'étant jamais observé à l'aval du fusible. U_p et I_p sont deux paramètres associés, car un I_p petit sera facilement obtenu avec un U_p grand.

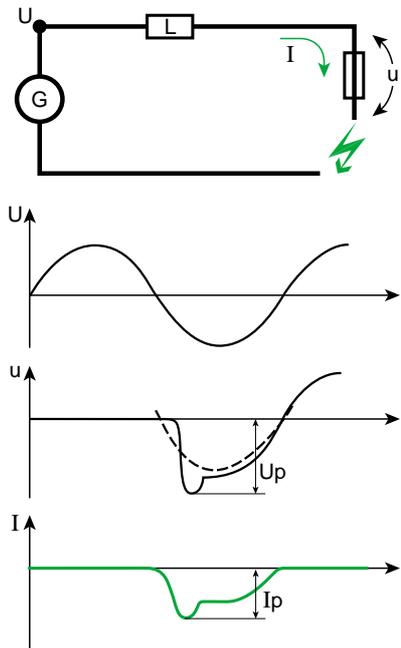


Fig. 3 : diagrammes d'une coupure à I1

La coexistence d'un I_p petit (limitation des contraintes à l'aval des fusibles) et d'un U_p bas (gage d'utilisation à une tension U_{Res} faible devant U_N) sont donc des signes d'une maîtrise dans la conception des fusibles MT.

1.7 Caractéristique temps-courant

A une valeur efficace de courant correspond, pour chaque type d'élément de remplacement, une durée de fusion ou de préarc.

Une courbe tracée sur une échelle logarithmique normalisée, permet de retrouver la durée de préarc pour chaque valeur du courant (cf. **fig. 4**).

Cette courbe ne concerne que le préarc. Il convient donc de rajouter le temps d'arc (5 à 50 ms typiquement) pour obtenir un fonctionnement total. Par ailleurs, les durées de préarc pour des courants inférieurs à I_3 peuvent être mentionnées. Dans ce cas, la courbe est tracée en pointillés. Il est ainsi possible de retrouver la valeur de I_3 (limite du trait plein) sur ce diagramme.

Cette courbe, qui se prolonge jusqu'à atteindre une durée de préarc de 600 s, est donnée avec une tolérance de $\pm 10\%$ sur la valeur du courant.

De façon conventionnelle, cette courbe représente une durée virtuelle de préarc, donnée

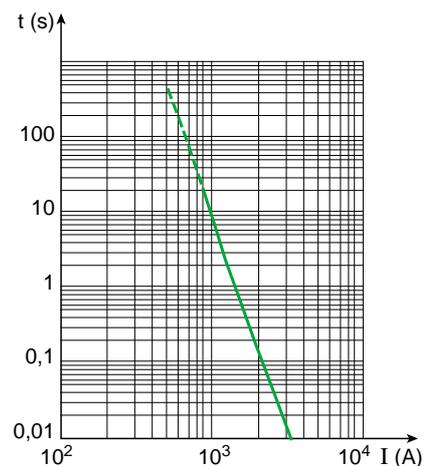


Fig. 4 : durée de préarc fonction de la valeur efficace du courant.

par la valeur de l'intégrale de joule divisée par le carré de la valeur efficace du courant présumé I_{eff} .

$$t_v = \frac{\int I^2 dt}{\int I_{\text{eff présumé}}^2}$$

Cette durée est proche de la durée de préarc qui serait obtenue avec un courant continu de valeur I_{eff} (cf. **fig. 5**).

En courant alternatif, ces courbes sont à utiliser avec précautions. Dans une zone comprise entre 0 et 0,1 s, pour un courant donné, les durées de préarc peuvent varier d'un rapport 1 à 3 selon la fréquence, le $\cos \phi$ du circuit et l'instant d'établissement du court-circuit.

À titre d'exemple, la **figure 6** représente les durées réelle (a) et virtuelle (b) de préarc d'un Fusarc-CF - 25 A sur un circuit de $\cos \phi = 0,1$ pour divers angles d'établissement d'un court-circuit de 500 A.

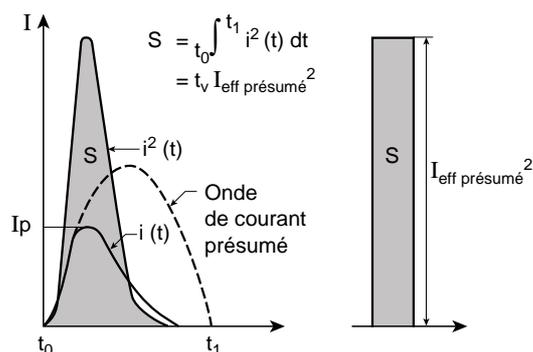


Fig. 5 : courbe représentant la durée virtuelle de préarc

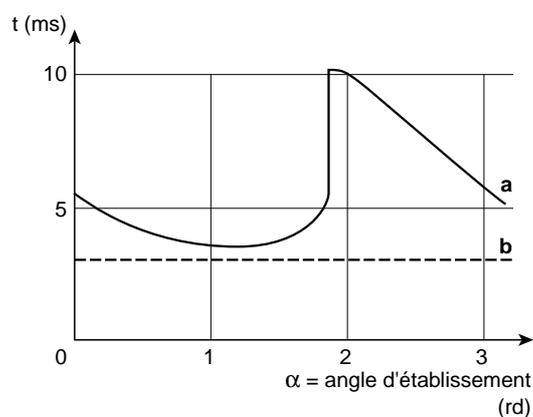


Fig. 6 : durées réelle (a) et virtuelle (b) de préarc d'un Fusarc-CF - 25 A (Merlin Gerin).

1.8 Le courant coupé limité

Complément indispensable à la caractéristique temps-courant, cette courbe permet, pour les valeurs de courant proches de I_1 où le courant

de court-circuit est limité, de déterminer la valeur I_p du courant limité en fonction du courant présumé (cf. **fig. 7**).

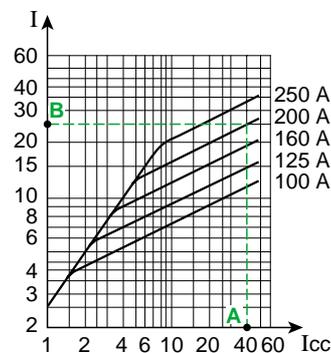
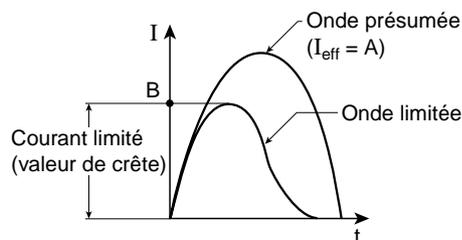


Fig. 7 : valeur I_p du courant limité en fonction du courant présumé.

1.9 L'énergie dissipée

Dans le cas d'un court-circuit, l'amplitude du courant limité dépend des caractéristiques constructives du coupe-circuit, et la valeur de

l'intégrale $\int I^2 dt$ permet de déterminer l'énergie dissipée dans le circuit aval, et ainsi de calculer son dimensionnement.

1.10 La puissance dissipée

Lorsqu'il est parcouru par son courant assigné, un élément de remplacement dissipe une certaine puissance.

Cette donnée est souvent utile pour le dimensionnement des enveloppes destinées à contenir l'appareillage. Elle est, hélas, très dépendante de l'enveloppe elle-même, ainsi que de sa ventilation. En effet, la puissance dissipée par le fusible est fonction de la résistance des éléments fusibles qui est elle-même dépendante de leur température qui dépend des conditions de refroidissement dans l'enveloppe.

Ainsi que son courant assigné I_N , la puissance dissipée par un coupe-circuit est donnée dans une certaine configuration thermique.

À titre d'exemple, la puissance dissipée dans les conditions normalisées (élément de remplacement vertical à l'air libre) par les Fusarc-CF est de l'ordre de $1,7 \times R \times I_N^2$ avec :

R = résistance à froid (voir annexe 1).

1,7 = coefficient lié au refroidissement, il peut atteindre 2 ou 3, voire plus pour un fusible installé dans une enceinte fermée.

2 Constitution d'un élément de remplacement

À partir de l'exemple d'un élément Fusarc-CF, un examen des différentes pièces constitutives (cf. **fig. 8**) et des contraintes, qui leur sont appliquées, permettra de mettre en évidence les divers choix qui s'offrent au constructeur.

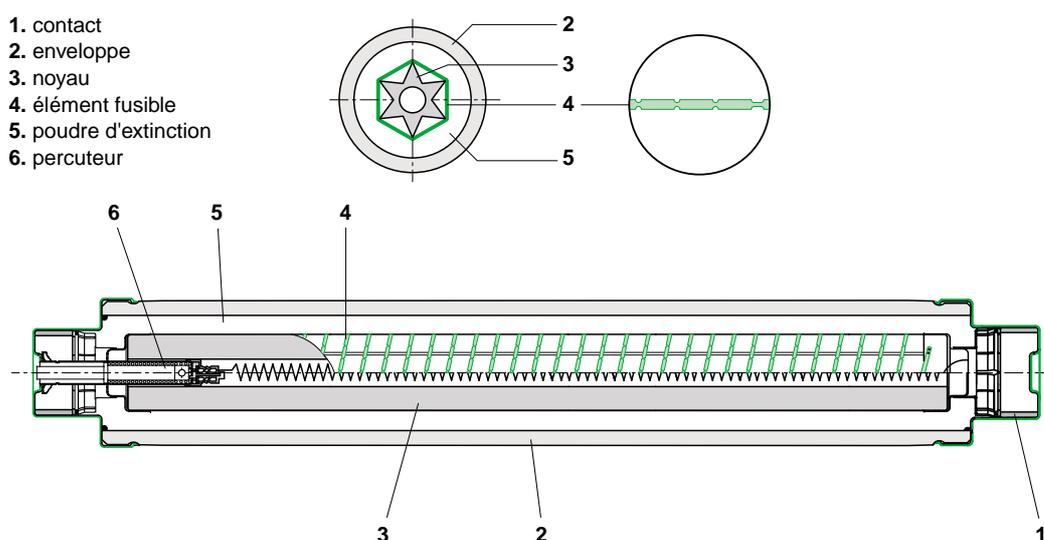


Fig. 8 : coupes schématiques d'un élément de remplacement.

2.1 Les calottes d'extrémités

Elles remplissent deux fonctions :

- d'obturateur,
- de contact électrique avec le support.

Obturateur

Associées à l'enveloppe, elles forment un ensemble qui doit contenir les éléments fusibles du coupe-circuit avant, pendant et après la coupure.

Cela se traduit par une double contrainte mécanique et d'étanchéité, qui est appliquée sur l'enveloppe, les calottes, et le scellement qui les joint :

- mécanique lors des coupures à I1 et I2, où l'énergie considérable alors développée par l'arc, engendre des surpressions pouvant se chiffrer en dizaines de bars,
- d'étanchéité, étant donné l'importance qu'ont la pureté du sable et son absence d'humidité.

Contact

Elles assurent également le passage du courant, que ce soit le courant assigné en service continu, ou le courant de défaut, entre l'élément de remplacement et son socle.

Traditionnellement, dans la construction électrique, les traitements de surface appliqués aux pièces conductrices, telles les calottes, sont choisis en vue de minimiser les résistances de contact, principales sources d'échauffement.

C'est ainsi que l'usage de l'étain ou de l'argent s'est généralisé. Le nickel est également parfois utilisé, mais, compte tenu de sa résistance de contact, de nombreux constructeurs l'ont abandonné.

Le cas du coupe-circuit est d'un particularisme extrême dans ce domaine. En effet, l'élément générateur d'échauffement n'est pas le contact, mais l'élément fusible lui-même. Le réseau de

courbes de la **figure 9**) indique la part des deux résistances de contact dans la résistance totale. Il apparaît clairement que, pour les bas calibres, la part de ces résistances est extrêmement faible. Cette dernière pourrait doubler voire décupler, sans que le comportement thermique de l'ensemble ne soit modifié.

Il apparaît dans ce cas judicieux de recouvrir les calottes de nickel, car alors on peut bénéficier des caractéristiques remarquables de ce métal (stabilité chimique anticorrosion) sans en subir les désagréments électriques.

Pour les forts calibres, qui sont appelés à être utilisés sur des installations plus sophistiquées, donc mieux abritées des agents extérieurs, un revêtement d'argent reste le bon compromis.

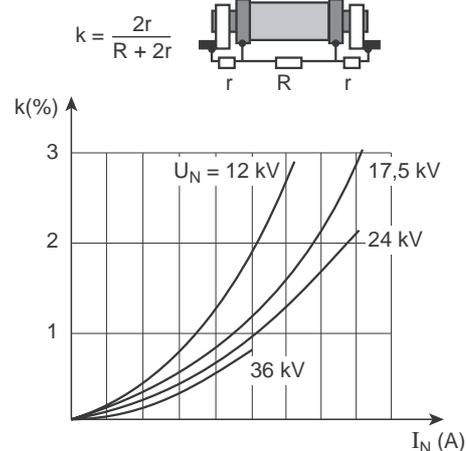


Fig. 9 : résistances de contact.

2.2 Le tube enveloppe

Le tube enveloppe doit supporter outre les contraintes de tenue à la pression et d'étanchéité déjà mentionnées, trois contraintes spécifiques d'ordre thermique, diélectrique et mécanique.

Contraintes thermiques

En plus de la tenue en régime continu sous I_N , il faut que l'enveloppe supporte des échauffements très rapides lors d'une coupure à I2, ou très lents, lors d'une fusion vers I3.

Contraintes diélectriques

Le fusible ayant coupé, le tube doit supporter la tension de rétablissement. Cette contrainte, peu sévère en raison des dimensions des fusibles et du laps de temps pendant lequel la tension est appliquée, est aisément supportée par tous les matériaux utilisés.

Ce laps de temps généralement très court, de quelques dizaines de millisecondes lorsque l'ouverture d'un appareil de coupure est commandée par le percuteur du fusible, excède rarement quelques heures dans certaines configurations. C'est par exemple le cas lorsqu'un fusible placé sur un réseau de distribution publique n'est pas combiné à un appareil de coupure, alors une intervention extérieure est nécessaire pour interrompre l'alimentation des deux phases restées en service.

Contraintes mécaniques

Un élément de remplacement doit résister mécaniquement tout à la fois :

- à la pression interne brutale provoquée par les gaz dégagés lors de la coupure à I2,

- à la montée lente de pression provoquée par la dilatation du sable, lors de la coupure à I3,
- et aux chocs éventuels appliqués à son enveloppe lors du transport et de sa manutention.

À ce jour, deux types d'enveloppes sont utilisées par les constructeurs : les enveloppes en porcelaine, et, plus récemment en résine chargée de fibre de verre.

- La porcelaine possède d'excellentes tenues thermique et diélectrique. C'est ce qui la fit choisir par tous les constructeurs initialement. Les problèmes liés à la sensibilité de ce matériau aux chocs, ou à sa fragmentation lors de durées de fusion à I3 longues ont poussé certains constructeurs à rechercher d'autres matériaux.

- La résine chargée en fibre de verre est un autre compromis entre les différentes contraintes. Sa tenue aux chocs ainsi qu'aux ondes de pression est, grâce à son élasticité, remarquable. Ses caractéristiques thermiques, différentes de celles de la porcelaine, peuvent aussi être exploitées et optimisées. Sa tenue diélectrique est plus que suffisante.

- à I_N , sa faible épaisseur et sa conductibilité thermique permettent de mieux refroidir le fusible, assurant par là un fonctionnement des éléments fusibles à relativement basse température, gage de longévité.

- au-delà de I_N , une sollicitation trop importante du coupe-circuit se traduit par un assombrissement du corps, par oxydation superficielle de la résine au contact de l'air.

Ce phénomène, qui n'altère en rien les caractéristiques mécaniques ou électriques du corps, est à considérer comme une qualité. C'est

en effet un révélateur de défaillance à venir dans l'installation (transformateur trop chargé, ou calibre de coupe-circuit mal adapté) qui évite parfois de graves incidents.

La critique qui a été la plus répandue sur ce type d'enveloppe fut son inflammabilité. En partie justifiée aux débuts de l'évolution de ce

matériau, des essais ont ensuite prouvé son excellent comportement, tant lors d'application d'éléments chauffés à 960 °C que lors d'essais à la flamme (CEI 60695 et ASTM D 635-68).

2.3 Le noyau

Servant de mandrin sur lequel est bobiné l'élément fusible, il n'a d'autre utilité que d'être son support. Il existe d'ailleurs des modèles de fusibles sans noyau.

En céramique ou matériau similaire, le noyau doit être d'une nature aussi proche que possible de la poudre d'extinction. Sa forme est généralement celle d'un cylindre entouré d'ailettes (cf. **fig. 10**).

Souvent placé dans son centre, le percuteur avec son fil de commande est ainsi isolé des éléments fusibles.

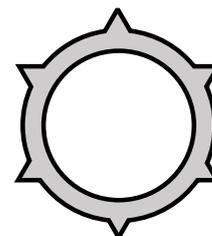


Fig. 10 : coupe typique d'un noyau.

2.4 L'élément fusible

C'est le cœur du coupe-circuit.

Les éléments fusibles peuvent être constitués de fils ou de rubans crantés mis en parallèle, ou encore d'une seule lame large crantée.

- Les fils, utilisés à l'origine, ont deux "défauts" :
 - ils engendrent des surtensions de coupure U_p extrêmement élevées,
 - leurs courants minimaux de coupure I_3 sont très importants.

De fait, ils ne sont plus employés que dans les produits de très basse qualité (aucun

ne peut être conforme aux normes internationales).

- Pour résoudre le problème de surtension, il a fallu introduire par endroits des rétrécissements de section, provoquant ainsi une fusion progressive de l'élément fusible. Technologiquement, cela est réalisé par crantage d'un ruban plat.

Deux courbes $I(t)$ présentées sur la **figure 11** montrent l'influence du pas et de la profondeur de crantage. Cette courbe peut être

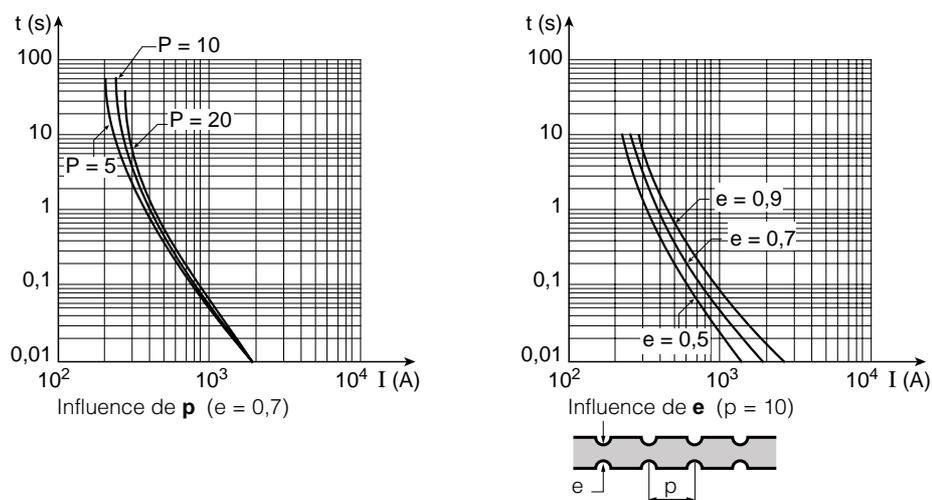


Fig. 11 : Influences du crantage d'un élément fusible.

prédéterminée par le calcul en fonction des caractéristiques du ruban et du crantage. Certains constructeurs réalisent également des fils à section variable (cf. **fig. 12**). Cette solution est assimilée à un ruban cranté tant les phénomènes qui régissent leurs fonctionnements sont semblables. Il en est de même des lames larges (cf. **fig. 12c**), qui sont assimilées à plusieurs rubans accolés.

Le matériau

Pour la constitution de ces éléments, l'argent pur est le matériau de prédilection.

- Pour un certain nombre de raisons physico-chimiques, c'est celui qui assure la coupure la plus franche.

- Sa faible résistivité associée à sa relative stabilité chimique en fait le matériau idéal pour transiter un courant élevé sans risque de vieillissement (température de fonctionnement d'un ruban : 180 à 250 °C).

De nombreuses études ont été faites pour remplacer l'argent trop coûteux. Peu ont débouché industriellement, et il semble difficile de pouvoir se passer totalement de l'argent.

Les crans

Ils sont d'une importance capitale pour les caractéristiques du fusible. En supposant la section et la longueur du ruban choisis :

- U_N sera dépendant du nombre de crans et de la profondeur du crantage ; plus ces derniers seront importants, plus U_N sera élevé, jusqu'à une certaine limite ;

- pour I_N , l'effet est rigoureusement inverse car alors la résistance croît ;

- à I_1 et I_2 , la profondeur et le pas du crantage ont des effets divers :

- Un crantage profond permettra une fusion plus rapide, donc un effet de limitation plus prononcé. En conséquence, l'enveloppe aura à supporter une contrainte de pression moindre.

- Une diminution du pas de crantage, qui permet une augmentation de U_N , augmentera aussi la surtension U_s de coupure. Par contre, cela tend à diminuer la durée d'arc.

- à I_3 , différents types de crantage peuvent être retenus (cf. **fig. 13**) :

- Des crans régulièrement espacés permettent une fusion simultanée de tous les crans, d'où une coupure plus rapide. Dans ce cas, si une longueur totale L de ruban cranté convient pour interrompre un courant I_3 sous une tension U , une longueur totale $2L$ de ce même ruban fera fondre simultanément deux fois plus de crans (d'où doublement de la tension d'arc) et permettra d'interrompre ce même I_3 sous $2U$. Une gamme où seule la longueur du ruban différencie les éléments de remplacement de

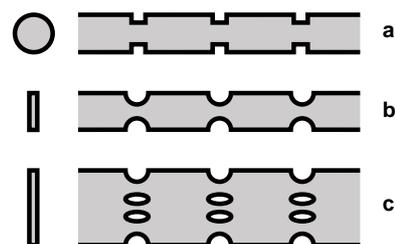


Fig. 12 : éléments fusibles à section variable.

a. fil

b. ruban

c. lame.

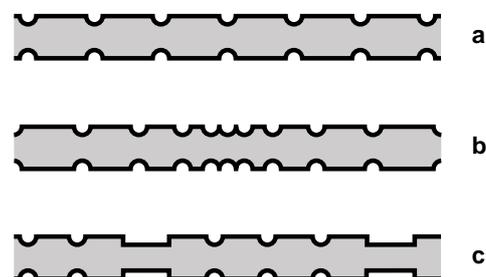


Fig. 13 : différents types de crantage.

a. régulier

b. progressif

c. mixte.

même I_N et de U_N différent aura donc un courant I_3 identique pour tous les fusibles.

Le respect de ce principe de base permet donc de faire des coupe-circuits de U_N élevé (36, voire 72 kV) en conservant un I_3 bas.

- Une zone centrale beaucoup plus crantée que le reste de l'élément. La fusion est ainsi localisée, et la longueur (donc la tension) d'arc augmente progressivement jusqu'à la coupure. Quand la durée d'arc devient trop longue, l'augmentation de tension d'arc par allongement d'arc est compensée par la diminution de tension d'arc au milieu du ruban (zone où l'arc est établi depuis son origine) de par le grossissement du canal d'arc. Alors, la limite de ce type de coupure est atteinte.

Avec ce principe, il est aisé d'obtenir un I_3 très bas pour des U_N de 3,6 et 7,2 kV, mais ce dernier devient très important dès que U_N dépasse 12 kV, et le U_N maxi d'une telle gamme n'excède jamais 24 kV.

- Un système mixte avec lequel certains constructeurs ont rencontré un optimum.

Schneider Electric a retenu la technologie à ruban cranté dont le refroidissement, meilleur que celui du fil, permet d'obtenir un courant minimal de coupure I_3 inférieur.

2.5 La poudre d'extinction

Généralement du sable (quartzite) qui, par sa vitrification, absorbe l'énergie considérable développée par l'arc et forme avec l'argent un composé isolant, appelé "fulgurite". Pour obtenir de bonnes coupures dans tous les domaines, sa pureté est indispensable, de même que l'absence de composés métalliques et d'humidité.

Par ailleurs, son tassage initial est garant d'un maintien de la pression (donc de la tension) du canal d'arc.

Sa granulométrie est choisie en fonction des données suivantes dictées par l'expérience :

- une poussière trop fine ($< 20 \mu$) est très néfaste, car les interstices très réduits en

freinant la diffusion du métal fusible entre les grains de sable rendent difficiles l'allongement progressif puis l'extinction de l'arc ;

- un grain fin facilite la coupure à I1 et I2, par contre, il favorise l'apparition des surtensions ;

- un gros grain permet d'abaisser I3.

En modifiant la granulométrie, il est également possible de creuser la caractéristique temps-courant dans la zone 10 ms, 500 ms.

2.6 Le percuteur

Il s'agit d'un organe mécanique signalant la fusion du coupe-circuit, et capable de délivrer une certaine énergie emmagasinée dans un ressort pour actionner un appareil de coupure. Les fusibles ainsi équipés sont donc destinés aux équipements combinés-fusibles.

L'organe de commande du percuteur est toujours un fil résistant (tungstène, Ni-Cr, etc...) mis en parallèle avec les éléments fusibles. Sous I_N , il est parcouru par un courant négligeable. Par contre, dès qu'une surintensité traverse le coupe-circuit, ce courant augmente fortement jusqu'à faire fondre le fil et libérer le percuteur qui est poussé par un ressort. Un soin tout particulier doit être accordé à la conception des fils qui ne doivent pas provoquer de déclenchement précoce tout en assurant ce

dernier sans interférer avec le processus de coupure.

Les types de percuteurs sont classés, en fonction de l'énergie qu'ils peuvent délivrer, en plusieurs catégories normalisées (léger, moyen et fort).

Des températures dangereuses ($> 100 \text{ }^\circ\text{C}$ sur les contacts) pour un appareil de coupure combiné à des fusibles et/ou aux fusibles eux-mêmes peuvent être provoquées par des surintensités prolongées. Pour supprimer ce risque, des développements récents ont permis d'incorporer dans le système d'un percuteur traditionnel (par ressort de type moyen) un déclencheur thermique (cf. **fig. 14**). Ce déclencheur agit aussi sur le percuteur qui provoque l'ouverture de l'appareil.

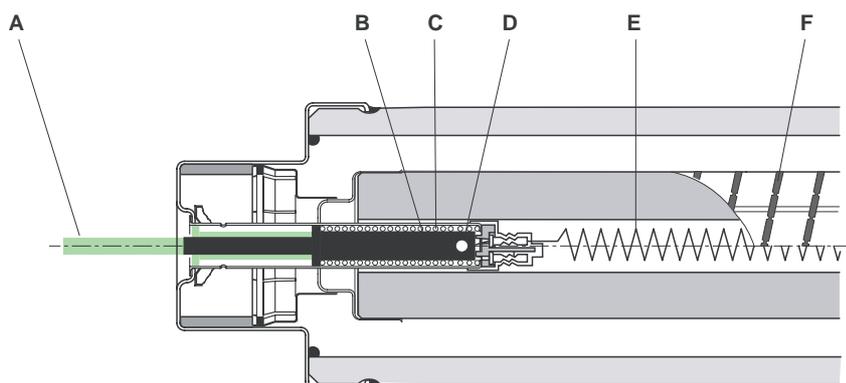


Fig. 14 : exemple d'un déclencheur thermique incorporé au système de percuteur de tous les fusibles de la marque Merlin Gerin.

- A. percuteur sorti
- B. percuteur au repos
- C. ressort

- D. déclencheur thermique du percuteur
- E. déclencheur électrique du percuteur
- F. élément fusible principal.

3 Utilisation

Dans ce chapitre sont abordées les règles qui fixent le choix du calibre de l'élément de remplacement pour un fusible utilisé dans de bonnes conditions de ventilation. Règles qui permettent d'établir des tables d'utilisation d'une gamme de fusibles.

Le fusible peut être aussi utilisé, associé ou combiné avec un appareil de connexion, pour la protection de divers récepteurs, notamment des

transformateurs, des moteurs et des condensateurs. Dans ces ensembles, le fusible et l'appareillage doivent être adaptés l'un à l'autre. Pour le choix du calibre de l'élément de remplacement il faut aussi tenir compte, outre des conditions de ventilations, des recommandations du fabricant de l'appareil combiné ou associé.

3.1 Généralités

Les règles à respecter, en ce qui concerne U_N et I_1 , ont déjà été mentionnées dans le premier chapitre. Ces caractéristiques, propres au fusible, doivent être respectivement supérieures ou égales à la tension U_{Res} du réseau et à son courant de court-circuit I_{cc} . Ces considérations élémentaires dictent d'elles-mêmes les caractéristiques de l'installation et écartent parfois certains types de fusibles.

Mais d'autres règles liées aux caractéristiques propres du récepteur protégé sont aussi à

retenir. C'est l'objet des sous-chapitres suivants dans lesquels les règles sont données pour des fusibles normalement aérés. Si les fusibles sont enfermés dans des enveloppes très faiblement ventilées, il convient de s'assurer, en sus des règles ci-dessous, que les échauffements en régime permanent ne dépassent pas les valeurs normalisées, et sinon de déclasser les éléments de remplacement.

3.2 Protection des transformateurs

La norme CEI 60787 traite spécialement des fusibles destinés à cet usage. Ce type de récepteur impose trois contraintes principales à l'élément de remplacement :

- supporter sans fusion intempestive la crête de courant qui accompagne la mise sous tension de ce récepteur,
- supporter le courant en service continu et les surcharges éventuelles,
- couper les courants de défaut aux bornes du secondaire du transformateur.

Crête d'établissement

La mise sous tension d'un transformateur se traduit toujours par un régime transitoire plus ou moins important suivant l'instant d'application de la tension et l'induction rémanente du circuit magnétique.

L'asymétrie et la valeur du courant sont maximales lorsque l'établissement a lieu à un zéro de tension et lorsque l'induction rémanente sur la même phase est maximale.

L'enregistrement de la **figure 15** montre l'allure de ce courant établi.

Pour le choix du coupe-circuit, il faut connaître la valeur efficace du courant d'appel et sa durée. La valeur efficace du courant du régime transitoire est donnée par l'équation :

$$I_{\text{eff}}^2 = 0,125 I_C^2 \frac{\tau_a}{t} (1 - e^{-\frac{2t}{\tau_a}})$$

avec :

I_C = courant de crête maximal.

τ_a = constante de temps de l'amortissement du courant en secondes (durée au bout de laquelle le courant tombe à 37 % de sa valeur initiale).

t = durée (en secondes) au bout de laquelle on estime que le courant a atteint sa valeur normale d'exploitation. Généralement, on choisit $t = 3 \tau_a$.

Le tableau de la **figure 16** donne des valeurs indicatives de I_C / I_N et de τ_a en fonction de la puissance des transformateurs pour des appareils répondant aux normes UTE C 52-100, C 52-112 et C 52-113.

Une règle pratique, simple et éprouvée, qui tient compte de ces contraintes et évite le vieillissement du fusible lors de leur répétition, est de vérifier que le courant qui fait fondre le fusible en 0,1 s est toujours supérieur ou égal à 12 fois le courant I_N du transformateur.

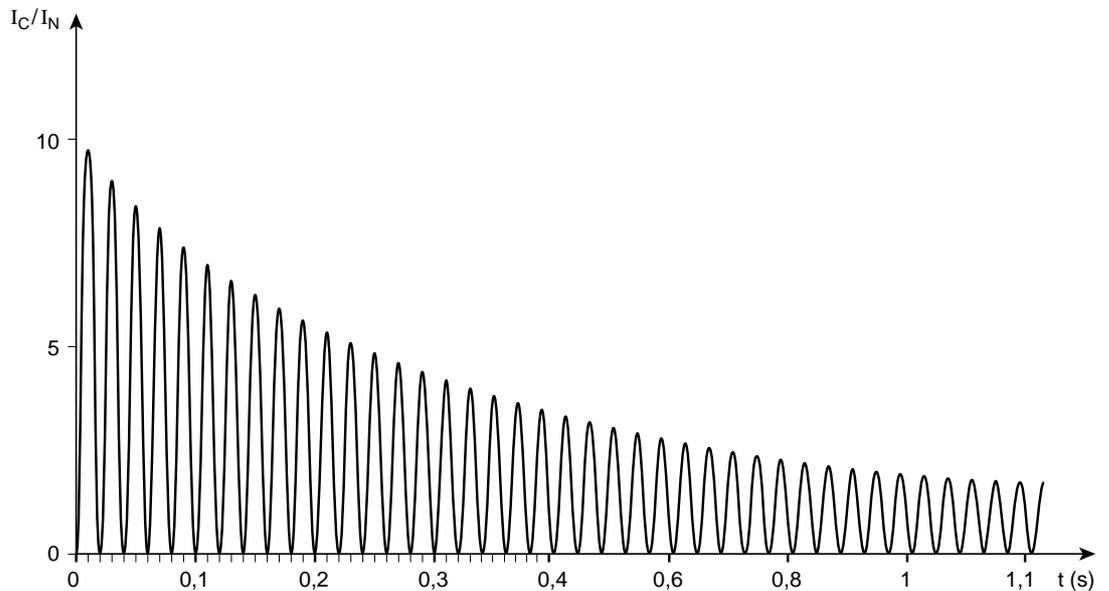


Fig. 15 : courant d'appel ou de crête maximal d'un transformateur de 1 000 kVA.

P (kVA)	I_C / I_N	τ_a (s)
50	15	0,1
100	14	0,15
160	12	0,20
400	12	0,25
630	11	0,30
800	10	0,30
1 000	10	0,35
1 250	9	0,35
1 600	9	0,40
2 000	8	0,45

Fig. 16 : rapport du courant de crête maximal sur le courant nominal d'un transformateur et valeurs de τ_a .

Régime permanent et de surcharge

Pour ne pas provoquer de vieillissement trop rapide des éléments fusibles et pour tenir compte d'une installation en cellule (température de l'air ambiant plus élevée), le calibre minimal du fusible doit être supérieur ou égal à $1,4 I_N$ du transformateur.

Ceci est valable dans des conditions normales de température définies par les recommandations CEI, soit avec une température de l'air ambiant n'excédant pas $+ 40 \text{ }^\circ\text{C}$ et une moyenne

mesurée sur une période de 24 heures de $+ 35 \text{ }^\circ\text{C}$ maximum.

Si le transformateur est prévu pour pouvoir fonctionner avec une surcharge permanente, le choix du calibre du coupe-circuit doit aussi en tenir compte ; d'où la règle à suivre :

$$1,4 I_{\text{surcharge}} \leq \text{calibre du coupe-circuit.}$$

Courant de défaut au secondaire du transformateur

Dans tous les cas il convient alors de s'assurer que le courant à interrompre est supérieur ou égal à I_3 , courant minimal de coupure du fusible. Lorsque aucun relais de protection n'est prévu côté MT pour détecter un court-circuit au secondaire (côté BT) du transformateur protégé, cette fonction doit être remplie par le fusible.

Le courant de court-circuit secondaire rapporté au primaire ayant pour valeur :

$$I_N \text{ du transformateur} / U_{cc} \%,$$

avec $U_{cc} \% = \text{tension de court-circuit (en \%)} ,$ la règle est :

$$I_N / U_{cc} \% \geq I_3$$

Ces trois règles :

- $I_{\text{fusion}} (0,1 \text{ s}) > 12 I_N$ du transformateur,
 - $1,4 I_{\text{surcharge}} < \text{calibre du coupe-circuit,}$
 - $I_N / U_{cc} \% > I_3,$
- permettent de définir, pour un fusible donné, la fourchette des I_N des transformateurs qu'il peut protéger.

Le tableau de la **figure 17** met nettement en évidence l'absence de relation directe entre le courant assigné et le courant d'utilisation. Ce phénomène est méconnu de nombreux utilisateurs qui ne connaissent du fusible que le

courant assigné. En pratique, ce dernier pourrait être ignoré et l'élément de remplacement caractérisé par ses seuls IA et IB, tout en sachant que la limite IA peut être franchie en présence d'un relais de protection adapté.

Calibre (A)	I_{\min} fusion (A) 0,1 s	$I_{N \max}$ = $I_{\min(0,1)} / 12$	$I_{N \max}$ = $I_{N \text{ fusion}} / 1,4$	I3	$I_{N \min}$ = $I3 \times 5\%$	I_N du transformateur doit être comprise entre IA et IB	
4	14,3	1,1	2,8	20	1	1	1,1
6,3	29,9	2,4	4,5	36	1,8	1,8	2,4
10	59,2	4,9	7,1	34	1,7	1,7	4,9
16	84,7	7	11,4	46	2,3	2,3	7
20	103,8	8,6	14,2	55	2,7	2,7	8,6
25	155,5	12,9	17,8	79	3,9	3,9	12,9
31,5	207,5	17,2	22,5	101	5	5	17,2
40	278,5	23,2	28,5	135	6,7	6,7	23,2
50	401,7	33,4	35,7	180	9	9	33,4
50 (36kV)	385	32	35,7	200	10	10	32
63	499,8	41,6	45	215	10,7	10,7	41,6
63 (36kV)	489,6	40,8	45	250	12,5	12,5	40,8
80 (7,2-12kV)	680	56,6	57,1	280	14	14	56,6
80 (17,5-24kV)	694,6	57,8	57,1	330	16,5	16,5	57,1
100 (7,2-12kV)	862	71,8	71,4	380	19	19	71,4
100 (17,5-24kV)	862	71,8	71,4	450	22,5	22,5	71,4
125	1 666,1	138,8	89,2	650	32,5	32,5	89,2
160	2 453,4	204,4	114,2	1 000	50	50	114,8
200	3 256,3	271,3	142,8	1 400	70	70	142,8
250 (3,6kV)	4 942,4	411,8	178,5	2 000	100	100	178,5
250 (7,2kV)	4 942,4	411,8	178,5	2 200	110	110	178,5

Fig. 17 : tableau résumant les possibilités de la gamme Fusarc-CF (Merlin Gerin), avec une tension de court-circuit de 5 %.

3.3 Protection des moteurs

Combiné à un contacteur, le fusible permet de réaliser un dispositif de protection particulièrement efficace pour un moteur MT.

Les contraintes spécifiques que doivent supporter les fusibles de protection de moteurs sont imposées par le moteur lui-même ou par la spécificité du réseau sur lequel il se trouve. Un additif particulier à cette utilisation (CEI 60644) complète d'ailleurs la norme générale des fusibles limiteurs MT (CEI 60282-1).

Contraintes dues au moteur

■ Au démarrage

Le diagramme de charge d'un moteur MT est représenté par la **figure 18**. Cette courbe indique que, lors de sa mise sous tension et pendant toute la période de démarrage, l'impédance d'un moteur est telle qu'il consomme un courant I_D nettement supérieur au courant nominal en charge I_N .

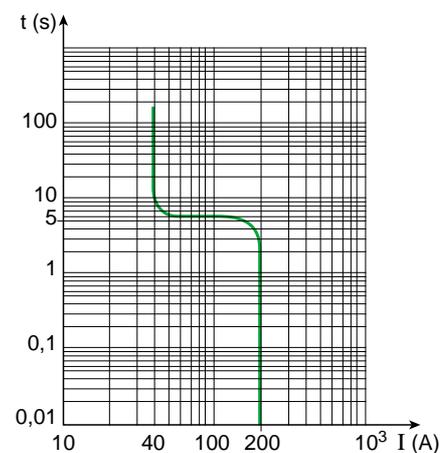


Fig. 18 : diagramme de charge d'un moteur MT.

Ce courant I_D , appelé courant de démarrage ou courant à rotor bloqué est quantifié par le rapport I_D / I_N qui est typiquement égal à 6 dans les cas de démarrage direct.

La durée t_D de démarrage, de l'ordre de la dizaine de secondes, dépend du type de charge entraîné par le moteur.

Outre le courant nominal permanent du moteur qui est assez élevé, le fusible doit être capable de supporter cette pointe de courant sans fusion intempestive, et ce de façon répétitive. Il faut également tenir compte de la possibilité de plusieurs démarrages successifs.

■ En cas de surcharge

Un moteur doit toujours être protégé par un relais qui donne, en cas de surcharge trop importante, un ordre d'ouverture à l'appareil de coupure associé. Le fusible n'est donc jamais appelé à interrompre des courants faibles et la valeur de son courant I_3 a peu d'importance.

Contraintes liées au réseau

■ Tension assignée

Les moteurs MT ont généralement une tension nominale au plus égale à 11 kV. Seuls les fusibles de $U_N \leq 12$ kV sont donc concernés.

■ Courant coupé limité

Les réseaux comportant des moteurs MT sont généralement des réseaux industriels à forte puissance installée. Le courant de court-circuit est donc également très élevé (50 kA par exemple).

D'autre part, les moteurs sont très souvent alimentés par des câbles de grande longueur. Leur dimensionnement n'est pas seulement fixé par le courant assigné, mais aussi par le courant de court-circuit susceptible de les traverser. Une forte limitation (faible I_p) est donc appréciée, mieux recherchée.

Détermination de l'élément de remplacement

Ici également, c'est à partir de la caractéristique temps-courant que se détermine le fusible à sélectionner. L'utilisation d'abaques permet de choisir directement l'élément de remplacement le mieux adapté.

■ Utilisation des abaques

L'abaque présenté par la **figure 19**, permettant de choisir directement un élément Fusarc-CF comporte trois réseaux de courbes.

□ Le réseau **I** indique le courant assigné du moteur en fonction de sa puissance exprimée en kW (1 CV = 0,7 kW) et de sa tension nominale.

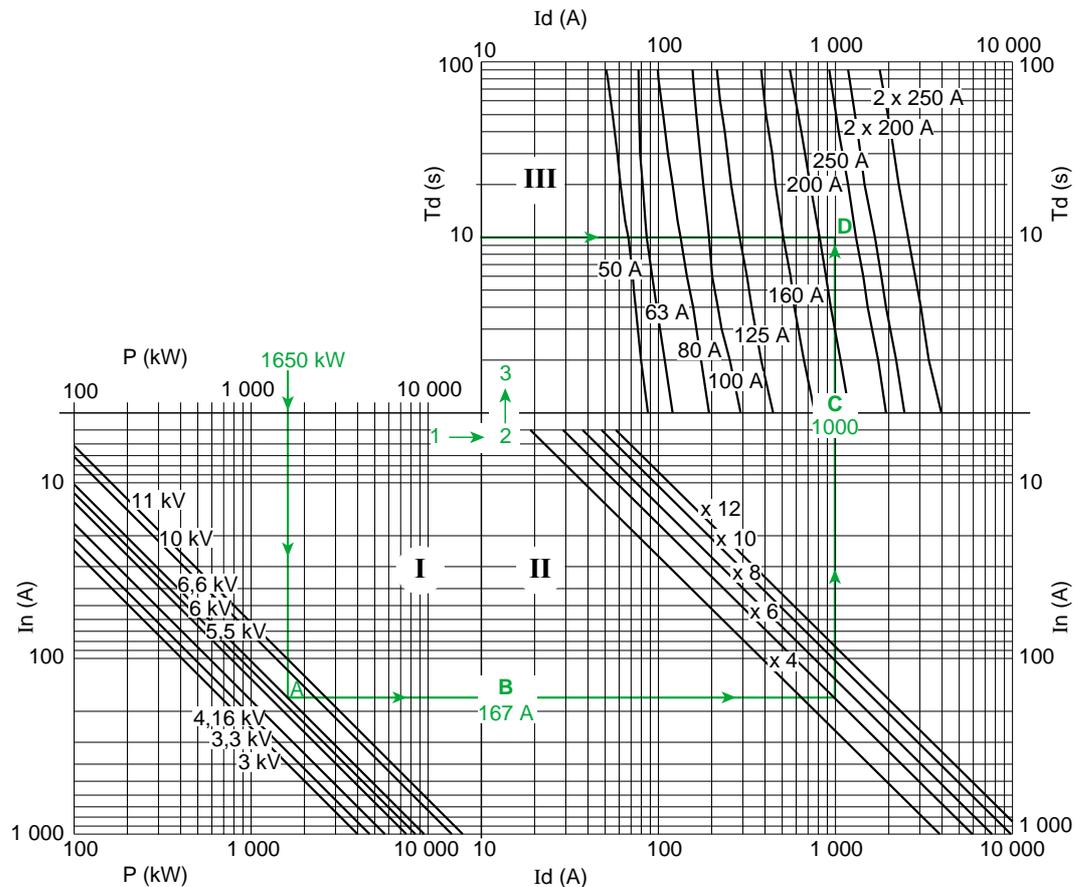


Fig. 19 : abaque des caractéristiques temps-courant des fusibles de la gamme Fusarc-CF (source Merlin Gerin).

Le rendement η et le $\cos \varphi$ en charge du moteur sont supposés tels que :

$$\eta \times \cos \varphi = 0,86.$$

Lorsque les valeurs exactes sont connues, il est possible de calculer I_N à l'aide de la formule suivante :

$$I_N = \frac{P(\text{kW})}{U_N(\text{kV}) \times \sqrt{3} \times \eta \times \cos \varphi}$$

□ Le réseau **II** donne le courant de démarrage à partir du courant nominal et selon le rapport I_D / I_N .

Sans information prendre $I_D / I_N = 6$.

□ Le réseau **III** permet la détermination directe du calibre de l'élément de remplacement à partir de la durée de démarrage du moteur (t_D) et du courant de démarrage (I_D) dans le cas de 6 démarrages répartis dans l'heure ou de 2 démarrages successifs.

Sans information prendre $t_D = 10$ s.

■ Exemple pratique (cf. **fig. 19**)

Un moteur de 1650 kW, 16,6 kV (point **A**) a un I_N de 167 A (point **B**).

Avec $I_D / I_N = 6$,

I_D a pour valeur 1000 A (point **C**).

Avec $t_D = 10$ s, le résultat (point **D**) est entre les courbes des calibres 200 A et 250 A. L'élément de remplacement doit donc avoir un calibre de 250 A.

La durée de démarrage doit être pondérée dans les trois cas suivants :

□ pour **n** démarrages répartis dans une heure, si $n \geq 6$: multiplier t_D par $n / 6$;

□ pour **p** démarrages successifs, si $p \geq 2$: multiplier t_D par $p / 2$;

□ pour **n** démarrages répartis (avec $n \geq 6$) et **p** démarrages successifs (avec $p \geq 2$) : multiplier t_D par $n / 6$ et par $p / 2$.

Dans le cas de démarrage moteur autre que direct, il est possible que le calibre déterminé par ces abaques soit inférieur au courant de pleine charge du moteur. Il est alors nécessaire de choisir un calibre supérieur à ce courant.

Dans tous les cas, il faut tenir compte de l'emplacement du fusible et prévoir un déclassement en fonction de l'aération de la cellule (exemple : prendre un coefficient de 1,2 pour un emplacement normalement aéré).

Le respect de l'utilisation de ces abaques assure la conformité aux essais de vieillissement des fusibles selon la norme CEI 60644.

■ Sans abaque

Il est toujours possible de vérifier l'adéquation d'un fusible à un moteur. Pour cela, il convient de déterminer les valeurs du courant et du temps de démarrage du moteur. En appliquant au courant de démarrage un facteur multiplicateur K qui varie de 1,8 à 2 selon les constructeurs, on obtient un point ($t_D, K I_D$) qui, reporté sur la caractéristique temps-courant, doit être situé à gauche de la courbe de l'élément de remplacement à sélectionner.

Le facteur K couvre un certain nombre de contraintes, dont les démarrages multiples y compris ceux avec des fusibles encore chauds du cycle précédent.

3.4 Protection des batteries de condensateurs

Les contraintes particulières à la protection de condensateurs par des fusibles, prises en compte dans la CEI 60549, sont de deux natures différentes :

■ à la mise sous tension d'une batterie, le courant d'appel très important peut entraîner le vieillissement ou la fusion des fusibles,

■ en service, la présence d'harmoniques peut provoquer des échauffements excessifs.

De plus ces contraintes varient selon le type de configuration : batterie unique ou batterie fractionnée en gradins.

Échauffement

En présence de condensateurs, en raison des harmoniques qui introduisent un échauffement supplémentaire, le déclassement par une réduction de 30 à 40 % du courant assigné est une règle commune à tout l'appareillage.

Les fusibles n'échappent pas à cette règle qui, cumulée avec le déclassement nécessaire pour

tenir compte de leur installation, porte à 1,7 le coefficient à appliquer au courant capacitif pour obtenir le calibre approprié de l'élément de remplacement.

Crête du courant d'appel

■ Batterie de condensateurs unique

Un tel circuit peut être représenté par le schéma de la **figure 20**, dans lequel :

L = self du générateur,

R_1 = résistance du fusible (voir annexe 1)

R_2 = résistance du circuit amont, calculée en fonction de U_N, I_{cc} , et $\cos \varphi$.

Au moment de la fermeture du démarreur D , le courant transitoire I_T de la charge de C s'établit, avec $R = R_1 + R_2$, selon l'expression :

$$I_T = \frac{V}{L \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} e^{-\frac{R}{2L} t} \times \sin \left(\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} t \right)$$

V étant la tension en A à l'instant de la fermeture.
Les ordres de grandeur de L, R et C permettent

de négliger les termes $\frac{R^2}{4L^2}$

$$d'où I_T = V \sqrt{\frac{C}{L}} \times e^{-\left(\frac{Rt}{2L}\right)} \times \sin \frac{t}{\sqrt{L}}$$

Ce courant transitoire se superpose à l'onde 50 Hz, ce qui donne la forme de l'onde de courant de la **figure 21**.

Le courant est maximal lorsque V est égal à la crête de tension soit :

$$V = U \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

Comme avec les transformateurs, le choix des fusibles peut être validé en considérant les rapports entre le courant de crête et le nominal I_T / I_N ainsi que la constante de temps de décroissance.

Ainsi, avec

$$U_N = \frac{U \times C \omega}{\sqrt{3}}, \text{ le rapport } I_T / I_N \text{ peut s'écrire :}$$

$$I_T / I_N = U \times \sqrt{\frac{2C}{3L}} \times \frac{\sqrt{3}}{UC\omega} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2}{LC}}$$

$$\text{et } \tau_T = \frac{2L}{R}$$

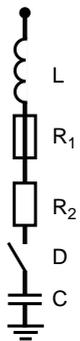


Fig. 20 : schéma d'une batterie de condensateurs unique.

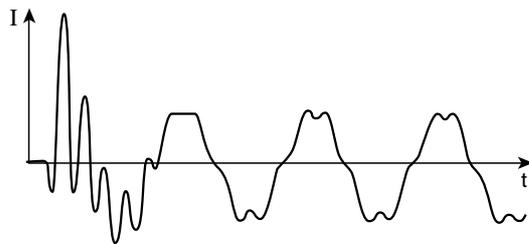


Fig. 21 : onde du courant transitoire à la mise sous tension d'une batterie de condensateurs.

L'expérience a prouvé qu'il fallait s'imposer la non-fusion du fusible pour un courant I_T pendant τ_T .

Si ce n'est pas le cas, il faut prendre le calibre supérieur, et calculer à nouveau I_T et τ_T pour refaire la vérification.

■ Exemple pratique pour une batterie de condensateurs unique

$U_N = 10 \text{ kV}$

$I_N \text{ batterie} = 35 \text{ A}$

$I_{cc} = 40 \text{ kA}$ ($\cos \varphi = 0,1$)

$C = 19,3 \times 10^{-6} \text{ F}$

Par le calcul :

$L = 0,46 \times 10^{-3} \text{ H}$

$R_2 = 14,5 \times 10^{-3} \Omega$.

Le calibre calculé selon les critères thermiques est de :

$35 \times 1,7 = 60 \text{ A}$

d'où le calibre standard sélectionné :

$I_N \text{ fusible} = 63 \text{ A}$.

Dans l'annexe 1,

$R_1 = 13 \times 10^{-3} \Omega$ pour un fusible 63 A / 12 kV

soit $R = 27,5 \times 10^{-3} \Omega$

d'où $I_T = 1\,670 \text{ A}$ et $\tau_T = 33,5 \times 10^{-3} \text{ s}$

Une comparaison avec les caractéristiques temps-courant (annexe 2, point A) indique qu'il faudrait sélectionner un calibre de 125 A.

Alors $R_1 = 5 \times 10^{-3} \Omega$ et $R = 19,5 \times 10^{-3} \Omega$,

d'où $I_T = 1\,670 \text{ A}$ et $\tau_T = 47,2 \times 10^{-3} \text{ s}$.

Reporté sur les courbes, ce point (B) confirme la nécessité du calibre 125 A.

■ Batterie de condensateurs fractionnée en gradins (schéma de la **figure 22**).

À l'enclenchement de la batterie de rang n, en supposant les (n-1) autres batteries déjà

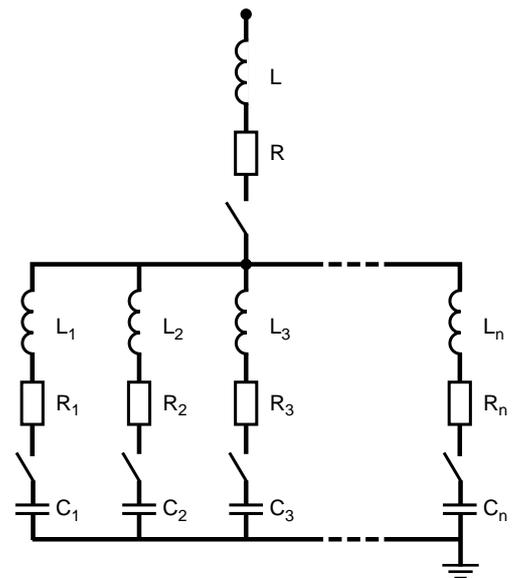


Fig. 22 : schéma d'une batterie de condensateurs fractionnée en gradins.

raccordées, le phénomène de charge oscillatoire se produit également. Mais, dans ce cas, les autres batteries connectées en parallèle se comportent comme des sources supplémentaires d'impédance interne très faible. Ces impédances internes (inductance L_i sur la fig. 22) sont constituées des selfs parasites des barres et des câbles (ordre de grandeur $0,4 \mu\text{H/mètre}$) et d'une éventuelle self de choc, destinée à la limitation du courant d'appel. En effet, ce dernier n'est pas seulement dangereux pour les éléments fusibles, il compromet également l'endurance électrique de l'appareillage de commande, voire la durée de vie des condensateurs eux-mêmes.

L'appel de courant venant par L pouvant être négligé, le courant d'appel est donné par la formule suivante :

$$I = U \sqrt{\frac{2}{3} \times \frac{C_E}{L_E}} \times e^{-\frac{R_E t}{2L_E}} \times \sin \frac{t}{\sqrt{C_E \times L_E}}$$

où

$$C_E = \frac{C_n C_s}{C_n + C_s} \text{ avec } C_s = \sum_{i=1}^{n-1} C_i$$

$$L_E = L_n + L_s \text{ avec } L_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{L_i}}$$

$$R_E = R + R_s \text{ avec } R_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{R_i}}$$

Bien que semblable au cas de la batterie unique, le calcul est, ici, légèrement plus compliqué.

Il convient de :

□ sélectionner un élément de remplacement selon les critères thermiques

□ calculer $I_T = U \sqrt{\frac{2}{3} \times \frac{C_E}{L_E}}$

□ calculer $\tau_T = 2 \times \frac{L_E}{C_E}$

□ reporter le point (I_T , τ_T) sur les caractéristiques temps-courant,

□ au besoin, sélectionner un autre calibre, calculer le nouveau R_E et recommencer la vérification.

Dans le cas où les gradins sont identiques, un seul calcul suffit. Dans le cas contraire, il convient d'examiner plusieurs cas de figure, en fonction du mode d'exploitation de la batterie.

■ Exemple pratique pour une batterie de condensateurs en gradins

3 batteries :

$$U_N = 10 \text{ kV}$$

$$I_N \text{ batterie} = 35 \text{ A}$$

$$I_{cc} = 40 \text{ kA (cos } \varphi = 0,1)$$

$$\text{Câbles} = 5 \text{ m soit } L_i = 2 \mu\text{H}$$

À la fermeture du troisième gradin :

$$C_i = 19,3 \times 10^{-6} \text{ F et } L_s = 1 \mu\text{H}$$

$$R_i = 5 \times 10^{-3} \Omega \text{ et } R_s = 2,5 \times 10^{-3} \Omega$$

D'où :

$$C_E = 12,9 \mu\text{F}$$

$$L_E = 3 \times 10^{-6} \text{ H}$$

$$R_E = 7,5 \times 10^{-3} \Omega.$$

$$I_T = 16900 \text{ A}$$

$$\tau_T = 0,8 \times 10^{-3} \text{ s}$$

Les caractéristiques temps-courant ne précisent rien pour des durées de préarc inférieures à la milliseconde. On peut raisonner, dans cette zone, à $I^2 t$ constant. Ce qui donne en prenant pour valeur minimale du coupe-circuit 125 A (définie dans l'exemple précédent) :

I_N fusible	$I^2 t$ fusion
125 A	$64 \times 10^3 \text{ A}^2 \text{ s}$
160 A	$76 \times 10^3 \text{ A}^2 \text{ s}$
200 A	$140 \times 10^3 \text{ A}^2 \text{ s}$

La contrainte appliquée au coupe-circuit de calibre 125 A est de :

$$0,8 \times 10^{-3} \times (16900)^2 = 228 \times 10^3 \text{ A}^2 \text{ s}$$

et même le 200 A ne convient pas.

Une telle batterie ne peut pas être protégée de cette façon par des Fusarc-CF.

Dans certains cas d'impossibilité, une solution existe qui consiste à protéger l'ensemble des trois batteries par un fusible unique commun (cf. fig. 23).

Avec un tel schéma, deux cas sont à examiner :

□ il est impossible de mettre sous tension les trois batteries simultanément.

Dans ce cas, pour le fusible, chaque enclenchement est vu comme l'enclenchement d'une batterie unique. Un fusible de calibre 125 A

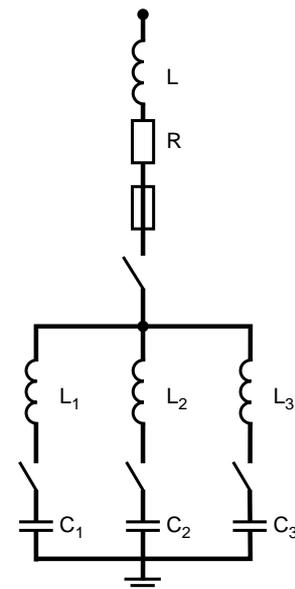


Fig. 23 : schéma d'une batterie de trois gradins de condensateurs protégée par un seul fusible.

peut supporter le courant d'appel (voir exemple du cas précédent).

La contrainte principale est alors la contrainte thermique qui impose un courant assigné de $3 \times 35 \times 1,7 = 179 \text{ A}$ soit $I_N \text{ fusible} = 200 \text{ A}$.

□ il est possible de mettre sous tension les trois batteries simultanément.

Le réseau devient équivalent à une batterie unique de puissance triple, d'où :

$$L = 0,46 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$C = 57,9 \times 10^{-6} \text{ F}$$

$$I_T = 2 \text{ 900 A}$$

En prenant un fusible de calibre 200 A, ($R_1 = 2,5 \times 10^{-3} \Omega$) avec $R_2 = 14,5 \times 10^{-3} \Omega$ (cas précédent) $\tau_T = 54 \times 10^{-3} \text{ s}$

Le point **C**, annexe 2, indique que le 200 A convient largement.

Dans ce cas, il est paradoxalement possible de protéger globalement les trois batteries par un fusible alors qu'une protection individuelle s'avère impossible.

3.5 Synthèse

Le tableau de la **figure 24**, présente une synthèse des besoins des différents types de fusibles en fonction des récepteurs.

Ces spécifications permettent de tracer la caractéristique temps-courant idéale d'un

fusible en fonction de son utilisation (cf. **fig. 25**).

Dans cette figure, apparaissent clairement des exigences contradictoires selon le type de récepteur protégé. Il montre également, de façon

Type de récepteur	Transformateur	Moteur	Condensateurs	
			Batterie unique	Batteries en gradins
Ordre de grandeur du calibre des fusibles	4 à 100 A	100 à 250 A	100 à 250 A	
Règles de sélection	$I_A < I_N \text{ transfo} < I_B$	Fixé par I_p et t_D $I_N \text{ moteur} \times 1,2$	$I_N \text{ batterie} \times 1,7 < I_N \text{ fusible}$ I_{ncc} fixé par \hat{i} , t	
I_p	Aucune spécification	Bas		Elevé $\tau \approx 1 \text{ ms}$
I fusion 0,1 s	Elevé	Aucune spécification	Elevé ($\tau \approx 0,1 \text{ s}$)	Aucune spécification
I fusion 10 s	Bas pour une protection rapprochée	Elevé	Bas pour une protection rapprochée	
I_3		Aucune spécification		
U_N	0 à 36 kV	0 à 12 kV	0 à 36 kV	

Fig. 24 : types de fusibles en fonction des récepteurs à protéger.

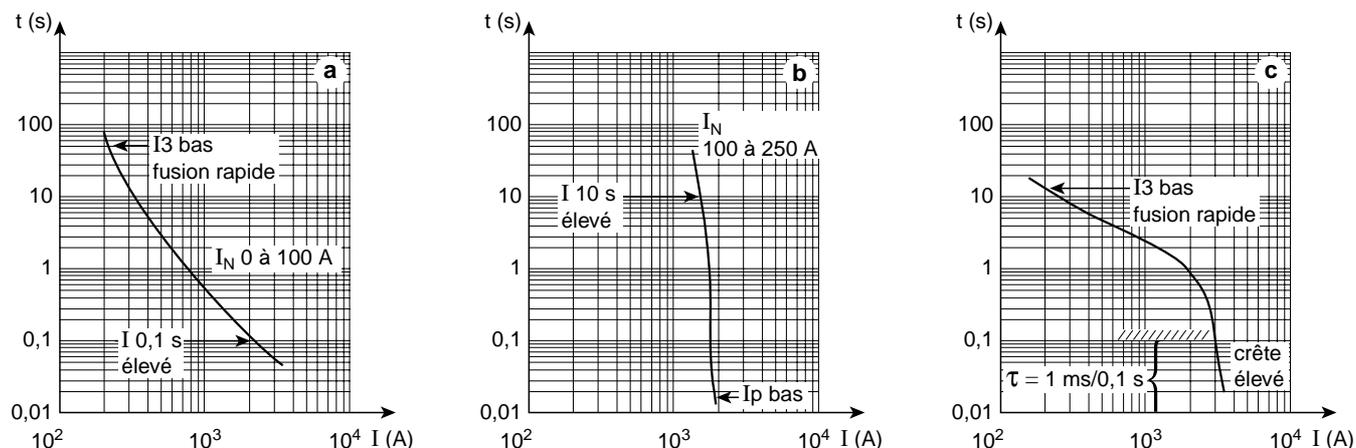


Fig. 25 : caractéristiques temps-courant idéales pour protéger :

a/ un transformateur,

b/ un moteur,

c/ un condensateur.

évidente, le peu de signification de la valeur I_N d'un fusible, lorsqu'elle est seule prise en compte comme critère de sélection. Comme c'est hélas trop souvent le cas.

■ Pour les transformateurs

L'évolution des normes, qui tendent à normaliser l'aspect des caractéristiques temps-courant, permettra probablement dans le futur à l'utilisateur d'oublier les règles de sélection dans le cas de transformateurs, pour ne retenir comme critère que le courant assigné du transformateur.

La publication, par chaque constructeur, des limites IA et IB d'utilisation de chacun des éléments de remplacement de sa gamme de fusibles serait dès maintenant un progrès notable.

■ Pour les moteurs

Le cas est hélas différent, la puissance du récepteur n'étant pas la seule caractéristique nécessaire à la détermination de l'élément de remplacement adéquat.

Si les normes indiquent les critères à respecter et demandent aux constructeurs des indications précises (facteur K, caractéristique temps-courant), l'utilisateur doit encore faire, lui-même, la sélection des fusibles en fonction du moteur à protéger aidé en cela par les éléments (abaques, tableaux) fournis par les constructeurs de fusibles.

■ Pour les condensateurs

Il a été montré que le choix des fusibles est encore plus délicat, car la géométrie du réseau et les caractéristiques du fusible doivent être associées. Sans la résistance du fusible, il est très difficile de faire un choix techniquement correct.

En conclusion

L'utilisation de fusibles limiteurs MT nécessite une connaissance approfondie des produits. C'est pourquoi les utilisateurs doivent consulter les indications nécessaires qui sont fournies par les constructeurs, tels Schneider Electric.

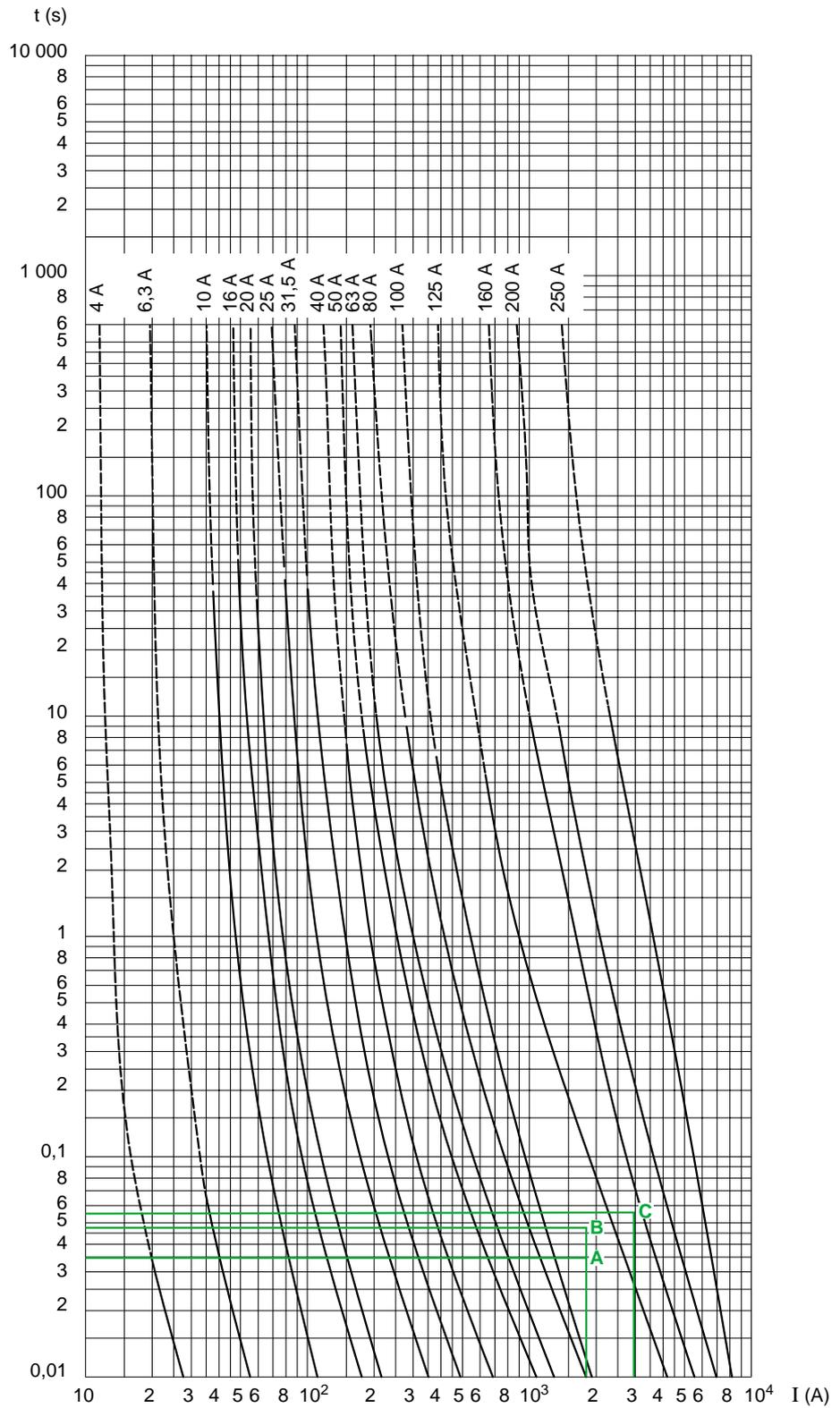
De même, lors de la conception d'une gamme de fusibles, il est important que le constructeur prenne en compte les contraintes que devront subir chacun des différents éléments de remplacement. C'est, par exemple, ce qui a été fait lors de la définition des différents éléments de la gamme Fusarc-CF : les contraintes schématisées sur la **figure 25** ont conduit au regroupement des calibres ; jusqu'à 125 A les fusibles sont de type "transformateur" ou "condensateur", les fusibles de calibres supérieurs sont plus orientés vers la protection de moteurs. Ainsi une seule gamme couvre la quasi-totalité des besoins avec une protection toujours optimale du récepteur.

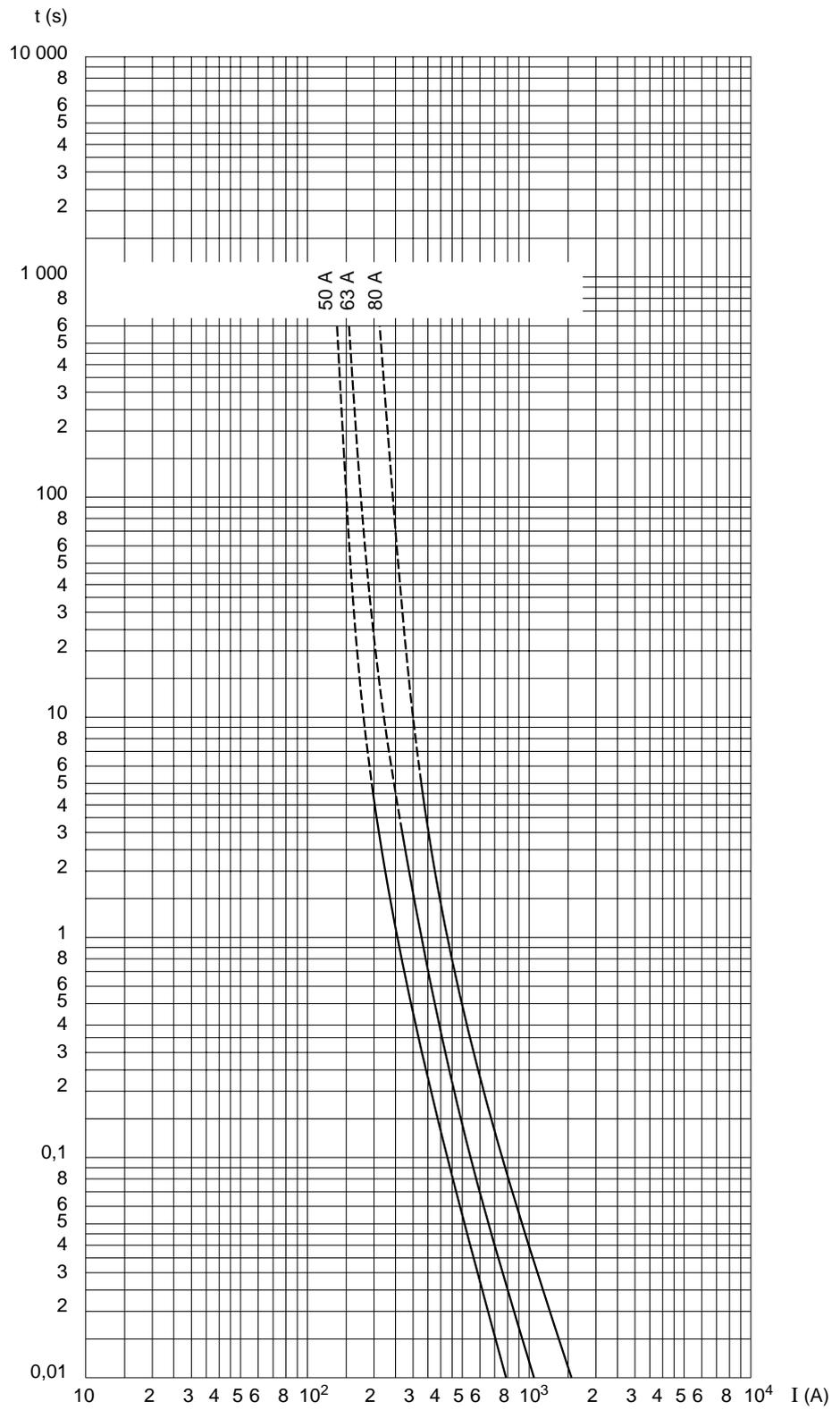
4 Annexes

4.1 Annexe 1 : Résistance à froid des fusibles Fusarc-CF

Calibre	3,6 kV	7,2 kV	12 kV	17,5 kV	24 kV	36 kV
4 A		762	1 143	1 436	1 436	2 109
6,3 A		205	319	402	485	750
10 A		102	158	203	248	380
16 A		68,5	106	132	158	252
20 A		53,5	82	103	123	197
25 A		36,4	56	71	85	133
31,5 A		26	40	51	61	103
40 A		18	28	35	42	70
50 A		11,7	17,4	22	31,5	47
63 A		8,4	13,8	19,4	23,6	35
80 A		6,4	10	13,5	18	
100 A		5,5	8	11	13,5	
125 A		3,4	5,3			
160 A		2,2	3,5			
200 A		1,8	2,7			
250 A	0,6	0,9				

4.2 Annexe 2 : Caractéristiques temps-courant de la gamme de fusibles Fusarc-CF





4.3 Annexe 3 : Utilisation de fusibles en parallèle

■ Le problème

Dans certains cas extrêmes, il est nécessaire de mettre deux ou plusieurs éléments de remplacement en parallèle.

Il est alors impératif de veiller à une symétrie la plus parfaite possible, afin qu'aucun effet secondaire ne compromette l'égalité de la répartition du courant entre les deux éléments.

Lorsque cela est possible, afin de s'affranchir des disparités entre éléments, il est recommandé de mettre en série, avec chacun des fusibles, une impédance (câble par exemple) de valeur calibrée et supérieure à celle du coupe-circuit.

Une autre technique consiste à utiliser deux transformateurs de courant (dont la précision est peu importante puisqu'ils ne sont pas utilisés pour des mesures) dont les secondaires sont connectés en série selon le schéma de la **figure 26**.

L'équilibrage du courant est ainsi assuré à I_N . Au-delà, cela n'est plus le cas à cause de la saturation des transformateurs.

Dans tous les cas un tel montage ne peut se faire qu'avec des éléments de remplacement de même calibre et avec l'accord du constructeur.

■ Les caractéristiques électriques d'un ensemble de n éléments de remplacement identiques mis en parallèle.

□ U_N : la tension assignée U_N de l'ensemble est celle de chacun des éléments.

□ I_N : en théorie, le courant nominal I_N de l'ensemble est celui des composants multiplié par n. En pratique, compte tenu de la proximité des éléments et de l'imperfection de la répartition du courant, un déclassement de 20 % est appliqué au courant assigné de l'ensemble.

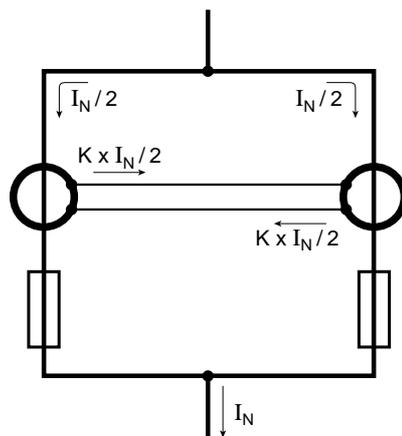


Fig. 26 : équilibrage par transformateurs de courant.

Par exemple, un montage de deux éléments de 200 A mis en parallèle aura un I_N de : $2 \times 200 \times 0,8 = 320$ A.

□ I_1 : si en théorie la mise en parallèle de n éléments devrait permettre de multiplier par n le I_1 de l'ensemble (chaque élément n'étant parcouru que par I_N / n), en réalité un tel calcul est extrêmement dangereux car la moindre faiblesse d'un seul élément met en cause le fonctionnement de l'ensemble.

La sécurité impose donc de conserver, pour l'ensemble, le I_1 des éléments le constituant.

□ I_3 : pour les durées de fusion correspondant à I_3 , la simultanéité de fusion des éléments est virtuellement impossible à obtenir : chaque élément coupe à son tour !

Cela tend à dire que le I_3 de l'ensemble est celui des éléments pris individuellement. Dans ce cas, il ne faut pas perdre de vue que les durées de préarc sont bien plus longues que celles des éléments pris séparément. Les conditions thermiques de début d'arc sont donc nettement différentes. Seuls des essais permettent de vérifier que la coupure sera encore effective.

■ En pratique

En résumé, le I_3 d'un ensemble composé de n éléments de remplacement en parallèle, dont le I_3 individuel est de I_{30} , peut valoir I_{30} .

En l'absence d'essai ou d'engagement du constructeur, il faut prendre n I_{30} .

□ Caractéristiques temps-courant : si un élément fond en 1 seconde pour un courant I, n éléments fondront en 1 seconde pour le courant n I. La caractéristique temps-courant de l'ensemble sera donc parallèle à celle des éléments de base, décalée d'un facteur multiplicateur sur l'échelle des courants.

La tolérance sur I de la caractéristique $I(t)$ d'un fusible est de ± 10 %. Dans le cas de mise en parallèle, toute dissymétrie tendra à diminuer la durée de préarc par rapport à la courbe théorique.

En effet, chaque élément n'est plus parcouru exactement par I / n , mais l'un d'entre eux parcouru par $I / n + \epsilon$, fondra plus rapidement. Par voie de conséquence, les autres éléments de remplacement fondront très peu de temps après.

Il est donc sage d'ajouter une tolérance (+ 10 %, - 20 %), sur la caractéristique temps-courant d'un tel ensemble.

□ Amplitude du courant coupé limité (cf. **fig. 27**).

Il faut considérer que chaque élément est parcouru par I_{cc} / n .

Si un élément limite alors à I_{po} , l'ensemble limite à n I_{po} .

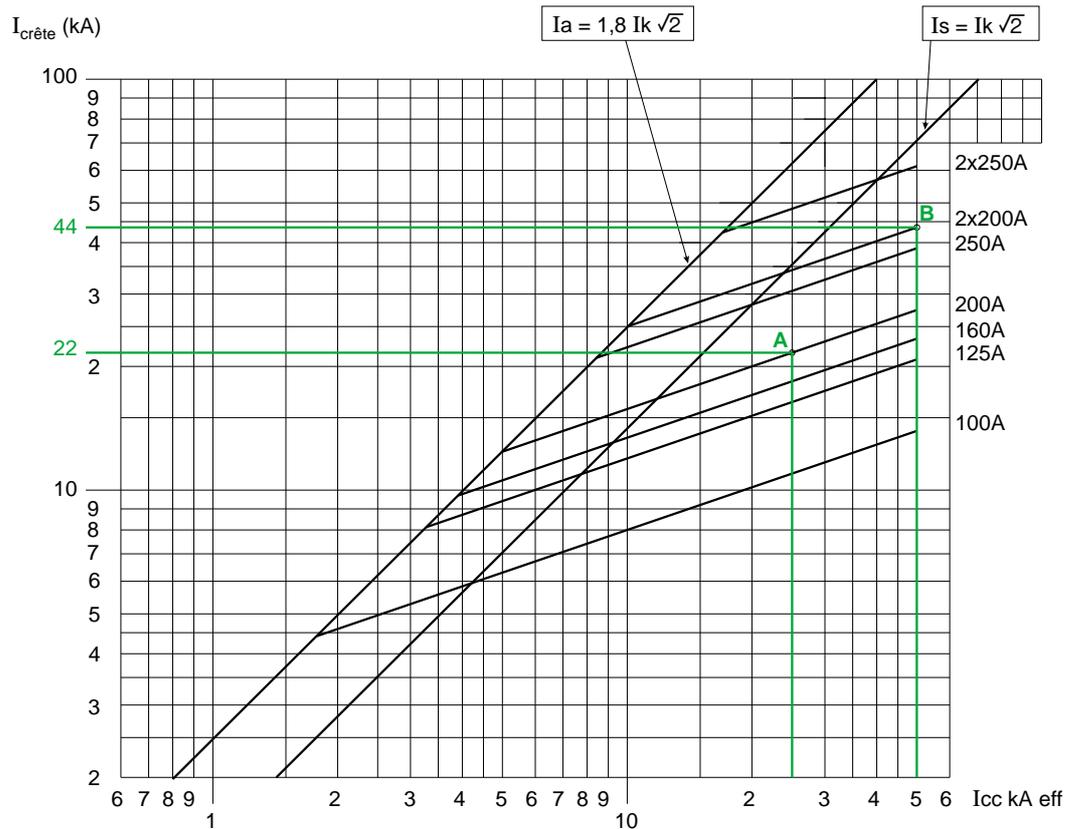


Fig. 27 : courbes de limitation de courant selon les calibres (Fusarc-CF, marque Merlin Gerin).

■ Exemple

Soient 2 éléments de calibre 200 A, avec un courant de court-circuit I_{cc} de 50 kA
 $I_{po} = I$ limité si $I_{cc} = 25$ kA soit 22 kA crête (point A).
 L'ensemble limite donc à $2 \times 22 = 44$ kA (point B).

■ Utilisation

Les règles d'utilisation sont les mêmes que pour les coupe-circuits individuels, en partant des caractéristiques temps-courant.

Il convient de plus :

- de ne pas oublier le déclassement en I_N de 20 %.
- de ne pas trop utiliser l'ensemble à ses limites supérieures, surtout si la symétrie n'est pas parfaite (respect de la tolérance - 20 % sur les caractéristiques temps-courant).

Schneider Electric

Direction Scientifique et Technique,
Service Communication Technique
F-38050 Grenoble cedex 9
Télécopie : 33 (0)4 76 57 98 60

Réalisation : HeadLines - Meylan
Edition : Schneider Electric
Impression :
- 20 € -