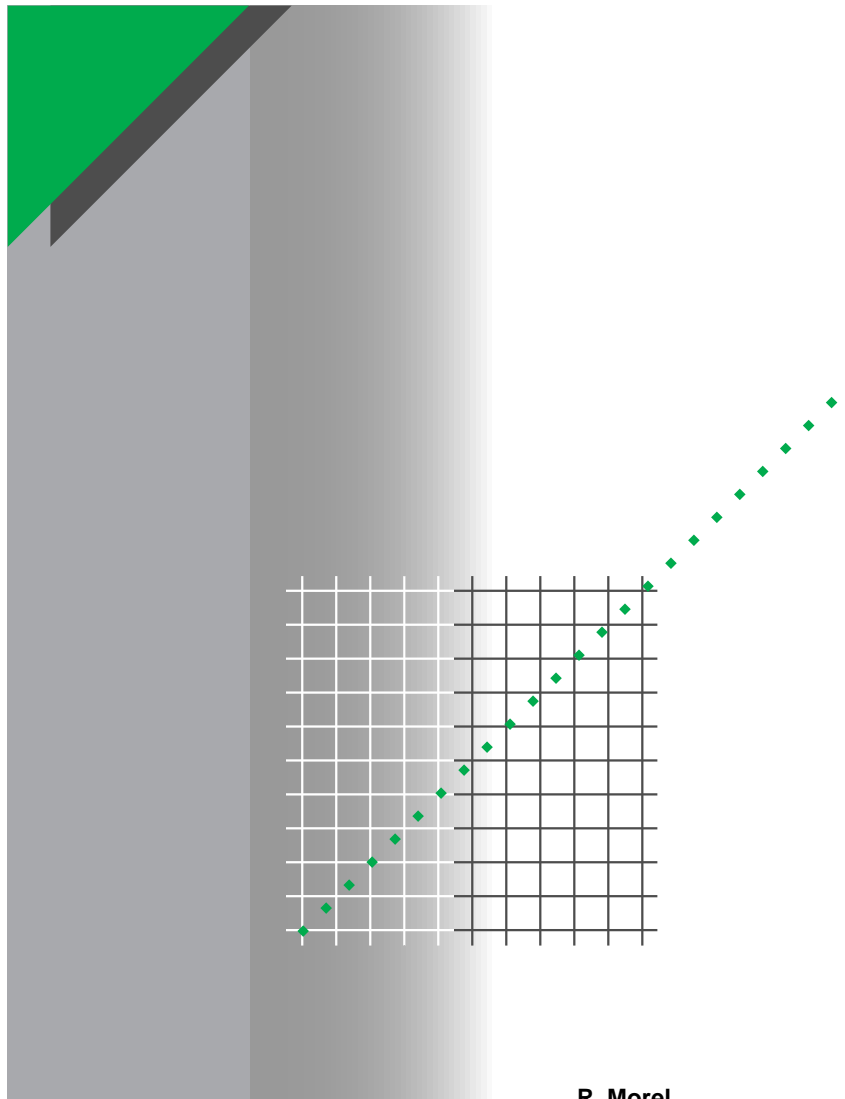


Cahier technique n° 154

Techniques de coupure des disjoncteurs BT



Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

R. Morel

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

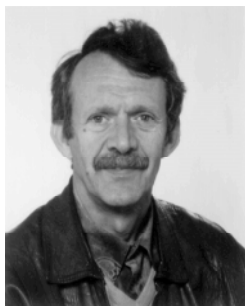
L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas reproduits dans le présent ouvrage, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni de conséquences liées à la mise en œuvre des informations et schémas contenus dans 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° 154

Techniques de coupure des disjoncteurs BT

Robert Morel



«...à mes amis de travail.»

Ingénieur ENSMM Besançon, entre chez Merlin Gerin en 1971 et se spécialise dans la conception de l'appareillage électrique Basse Tension.

Il contribue à l'étude du système Sellim.

En 1980 il a en charge le développement de disjoncteurs Compact et d'interrupteurs Interpact.

En 1985, il devient responsable du bureau d'étude « coupure Basse Tension » de la division Basse Tension de Puissance.

Lexique

a : Angle d'enclenchement en tension.

Calibre (d'un disjoncteur) : C'est la valeur du courant nominal du disjoncteur, elle est fixée par le réglage maximal du déclencheur (protection contre les surcharges, électronique ou thermique).

Catégorie (d'un disjoncteur) : Définie par la norme CEI 60947.2

A = Disjoncteur non retardé sur ouverture en conditions de court-circuit ;

B = Disjoncteur retardé sur ouverture en conditions de court-circuit $\leq I_{cw}$.

E : Tension nominale en continu, tension crête en alternatif.

φ : Angle de déphasage tension /courant.

i, (**i₀**) : Courant à un instant **t**, (à un instant **t₀**).

i_a : Courant d'arc à un instant **t**.

i_c : Courant crête coupé.

I_{cc} : Courant de court-circuit.

I_{cs} : Pouvoir assigné de coupure de service (exprimé en kA ou en % de **I_{cu}**).

I_{cu} : Pouvoir assigné de coupure ultime en court-circuit.

I_{cw} : Courant assigné de courte durée admissible.

I_n : Courant nominal en régime permanent, **A_{eff}**.

I_p : Courant présumé.

I_s : Courant de surcharge.

r : Impédance du générateur.

R, L, C : Composantes totales du circuit coupé.

t, (t₀) : Temps, (instant initial).

t_a : Durée de l'arc.

taille (d'un disjoncteur) : C'est le calibre le plus élevé que peut accepter un boîtier de disjoncteur, il correspond au courant assigné de l'appareil.

τ : Constante de temps du circuit ($\tau = L / R$).

u : Tension à un instant **t**.

u_a : Tension d'arc à un instant **t**.

U_a : Tension d'arc stabilisée.

U_{AC} : tension Anode-Cathode de chaque arc élémentaire.

U_{d+}, U_{d-} : Caractéristiques de régénération.

U_n : Tension nominale en alternatif, **V_{eff}**.

U_r : Tension de rétablissement.

W_a : Energie d'arc.

W_{L0} : Energie selfique initiale pour $i = i_0$.

ω : pulsation en alternatif,
($\omega = 2\pi f = 2\pi/T$).

Techniques de coupure des disjoncteurs BT

Ce Cahier Technique a pour objectif de :

- définir les courants à couper dans une installation BT ;
- faire connaissance avec un phénomène qui apparaît inéluctablement à l'ouverture d'un circuit : **l'arc électrique** ;
- analyser sous un angle théorique la coupure de différents courants grâce à l'arc mis en condition d'extinction ;
- aborder l'aspect technologique des dispositifs de coupure, tout particulièrement des disjoncteurs.

Sommaire

1 Introduction	1.1 Définition des courants à couper	p. 4
2 L'arc électrique	2.1 Ses conditions de formation	p. 6
	2.2 Ses propriétés physiques	p. 6
	2.3 Ses propriétés électriques	p. 6
	2.4 Ses conditions d'extinction	p. 7
3 Couper grâce à l'arc		p. 10
4 Couper des courants établis	4.1 Sous une tension continue	p. 11
	4.2 Sous une tension alternative monophasée	p. 12
	4.3 Sous une tension alternative triphasée	p. 13
5 Couper des courants présumés (avec limitation)	5.1 Définition	p. 14
	5.2 Coupure avec limitation	p. 16
	5.3 Sous une tension continue	p. 16
	5.4 Sous une tension alternative monophasée	p. 17
	5.5 Sous une tension alternative triphasée	p. 18
	5.6 Les paramètres de coupure	p. 18
	5.7 Coupure par la technique fusible	p. 19
6 Le disjoncteur basse tension	6.1 Ses fonctions	p. 20
	6.2 Ses technologies	p. 21
	6.3 Ses performances	p. 25
7 Conclusion		p. 28
Bibliographie		p. 28

1 Introduction

Les sources d'énergie des installations électriques sont des alternateurs et des transformateurs. Ces générateurs aussi parfaits soient-ils ont une impédance interne. Cette impédance a deux effets très importants (cf. fig. 1) :

- en régime normal, cette impédance fait chuter la tension à vide pour l'amener à U_n lorsque le générateur débite I_n ;
- en cas de court-circuit, cette impédance limite le courant à une valeur, exprimée en multiple de I_n .

Si l'on prend le cas des transformateurs, leur tension de court-circuit U_{cc} (en %) correspond à

la limite supérieure de leur chute de tension relative sous I_n .

A titre d'exemple à une tension de court-circuit de 5 % correspond un I_{cc} de : $I_n/5\% = 20 I_n$, soit pour un transformateur de 1000 kVA/400 V, un courant de 29 kA. Il est facile d'imaginer les dégâts pouvant être occasionnés dans une installation par un tel courant (échauffements et efforts électrodynamiques étant proportionnels au carré du courant!).

Aussi, même si toutes les précautions sont prises pour le rendre peu probable, il est nécessaire de prévoir des dispositifs de protection capables de couper les courants de court-circuit.

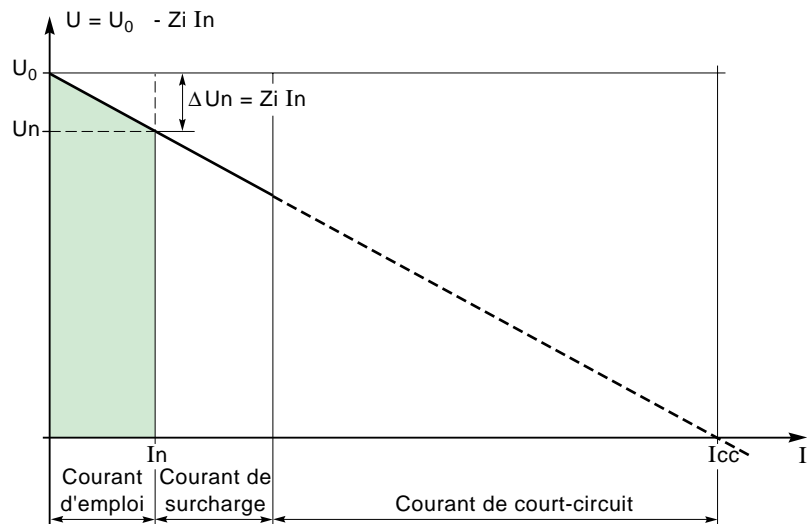


Fig. 1 : incidence de l'impédance Z_i interne des sources d'énergie sur la tension délivrée et leur courant de court-circuit maximum.

1.1 Définition des courants à couper

La seule connaissance de la valeur du courant à interrompre ne suffit pas pour concevoir un dispositif de coupure approprié !

La coupure de tous courants est fonction de plusieurs paramètres liés aux générateurs (alternateur ou transformateurs), aux lignes et aux récepteurs :

- un circuit électrique est toujours selfique, aussi les variations mêmes du courant à couper

gènèrent, dès l'ouverture du circuit, des «contre-réactions» en tension qui contribuent à son maintien. Cette f.c.e.m. du type $L di/dt$, peut avoir une valeur importante quelle que soit la valeur du courant i , jusqu'à l'annulation de ce courant ;

- la valeur résistive du circuit à couper, contribue à la coupure tant que le courant a une valeur significative, mais n'est plus d'aucun secours pour $i \approx 0$, car la chute de tension ohmique devient négligeable ;

- les capacités entre conducteurs actifs, qu'elles soient réparties (capacités «parasites» des générateurs et des câbles) ou additionnelles (batterie de condensateurs en compensation d'énergie réactive ou en filtre), modifient les conditions de coupure ;
- la fréquence du courant à couper, car il est à priori plus facile de couper un courant alternatif qui a des zéros périodiques, qu'un courant continu ;
- enfin, la tension délivrée par le générateur : l'appareil de coupure doit, après annulation du courant, résister diélectriquement à la tension du réseau toujours présente.

Dans la pratique, trois types de courants à couper sont définis :

1. Courant de court-circuit

Celui-ci, en un point donné d'une installation, n'est pas systématiquement égal à " $20 I_n$ " du générateur :

- il dépend des caractéristiques du générateur, $3 \% < U_{cc} < 7 \%$ par exemple ;

- il peut être plus petit :
 - selon que le défaut est plus ou moins franc,
 - selon la longueur et la section des lignes en amont ;
- il peut être plus grand si plusieurs générateurs sont couplés en parallèle.

2. Courant de surcharge

Le courant peut dépasser la valeur nominale et devenir inacceptable après une certaine durée :

- pendant la période transitoire de démarrage ou de fonctionnement d'un récepteur ;
- si la somme des puissances des récepteurs en fonctionnement dépasse les prévisions du concepteur pour tout ou partie de l'installation (coefficient de foisonnement).

3. Courant nominal (ou plus faible)

Un disjoncteur étant destiné à interrompre les forts courants de court-circuit et les surcharges, qui peut le plus, peut le moins : un tel appareil de coupure pourra aussi assurer la commande des circuits et des récepteurs.

2 L'arc électrique

L'arc électrique n'a pas été inventé ; il s'est manifesté au premier physicien qui tenta d'interrompre un circuit parcouru par un courant. En effet, le circuit toujours selfique fournit suffisamment d'énergie aux électrons pour franchir la distance qui apparaît dans la zone de séparation des conducteurs.

Le gaz présent, généralement de l'air, est ionisé par ces électrons « pionniers » et la création de

ce plasma va dès lors faciliter le passage du courant !

La coupure semble ainsi bien compromise... à moins qu'une meilleure connaissance de ce phénomène ne révèle des propriétés remarquables, voire irremplaçables. Heureusement oui !

2.1 Ses conditions de formation

L'arc apparaît dans un milieu gazeux :

- par claquage diélectrique entre deux électrodes :
- au-delà d'une valeur de champ électrique E/d , fonction de la forme des électrodes, de la nature et de la densité du gaz (d = distance entre les électrodes - cf. **fig. 2**) ;
- suite à un cheminement sur un matériau isolant dégénéralant dans le gaz ambiant ;
- dès l'ouverture d'un circuit électrique parcouru par un courant : même si le circuit est purement résistif, une certaine distance d'ouverture est nécessaire pour éviter le claquage diélectrique.

Or les circuits sont souvent selfiques, ce qui augmente encore les risques de claquage et



Fig. 2 : l'arc électrique et l'influence du champ E/d .

nécessite ainsi une distance plus grande entre les électrodes.

De plus, toute tentative de décroissance rapide du courant est significative d'un $L \cdot di/dt$ important, favorisant le claquage quelle que soit la valeur du courant.

2.2 Ses propriétés physiques (cf. **fig. 3a**)

Dès la séparation de deux contacts, l'un (cathode) émet des électrons, l'autre (anode) les reçoit. Le phénomène d'émission des électrons étant par nature énergétique, la cathode sera chaude. Le pied d'arc devenant ainsi thermoémissif, les électrons sont majoritairement émis au point chaud, d'où un phénomène de stagnation de l'arc pouvant créer des vapeurs métalliques. Ces vapeurs et le gaz ambiant vont dès lors être ionisés, d'où :

- d'avantage d'électrons libres ;
- création d'ions positifs qui retombent sur la cathode et entretiennent son échauffement ;
- création d'ions négatifs qui bombardent l'anode provoquant son échauffement .

L'ensemble de toute cette agitation se fait dans une colonne de plasma à haute température, 4 000 à 20 000 K, suivant le courant et le confinement de celle-ci.

2.3 Ses propriétés électriques (cf. **fig. 3b**)

- La plus notable est de faire apparaître une tension d'arc dont la valeur a :
- une partie fixe, $U_{AC} \approx 20$ à 40 V, qui apparaît dès la moindre séparation des contacts (fonction des matériaux utilisés),
- une partie variable, $U_L = 50$ à 100 V/cm, quand l'arc est stabilisé en allongement dans son contexte d'équilibre pression-température.

Soit une valeur totale $U_a = U_{AC} + U_L$.

A noter que :

- le signe de U_a change en même temps que le signe du courant d'arc,
- la valeur du courant d'arc n'influe pas fondamentalement sur la tension d'arc, cela tient au fait que l'arc « travaille » à densité de courant ($j = i/s$) presque constante (les sections des

a : composition de la colonne d'arc

b1 : tension de l'arc U_{AC}

b2 : tension de l'arc U_L

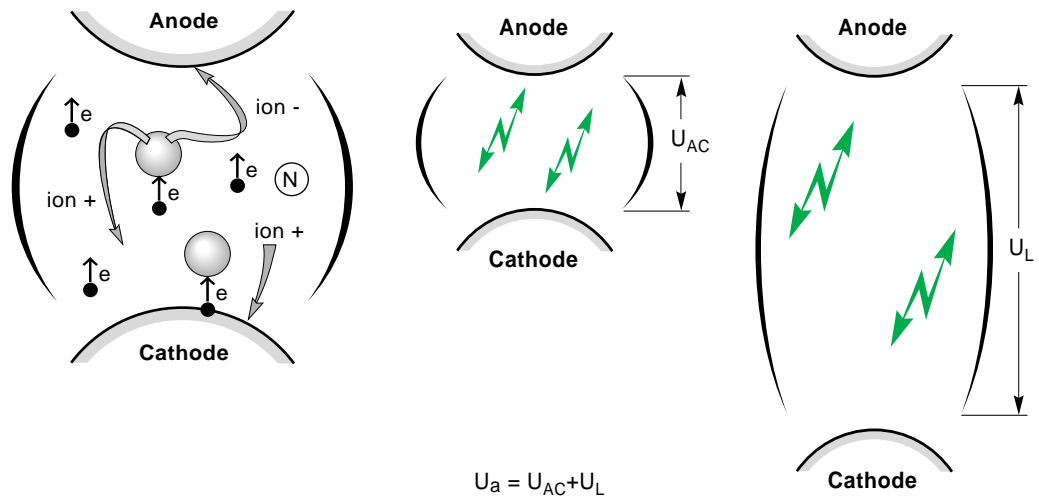


Fig. 3 : l'arc électrique, son phénomène physique (a) et sa tension caractéristique ou tension d'arc U_a (b).

taches anodiques et cathodiques, ainsi que celle de la colonne d'arc sont proportionnelles au courant, d'où par analogie avec une résistance :

$$U = R i = \rho \frac{l}{s} i = \rho l j = \text{« constante »};$$

■ Une énergie d'arc est produite,

$$W_a = \int u_a i_a dt;$$

■ Si l'arc est placé dans un champ magnétique, il est soumis aux forces de Laplace, $F = B i l \sin \alpha$; ce qui a pour effet de le cintrer si \vec{B} est perpendiculaire à \vec{i} , puis de le déplacer transversalement.

2.4 Ses conditions d'extinction

Il y a extinction quand le courant d'arc devient et reste nul.

Aspect thermique

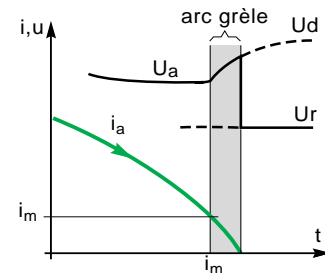
Quand le courant d'arc est petit ou devient petit, inférieur à 10 A par exemple, les échanges d'énergie thermique peuvent devenir supérieurs à l'énergie interne de l'arc et celui-ci "meurt" de froid (arc grêle), dès lors ceci se traduit par une tension d'arc qui augmente (cf. fig. 4a).

Pendant cette augmentation de tension, une brutale extinction peut même apparaître si les capacités parasites "court-circuitent" l'arc, ce qui se produit quand la tension d'arc devient et reste plus grande que la tension de charge des capacités réparties (cf. fig. 4b). Ce phénomène est appelé «arrachement».

Il n'en est pas toujours ainsi :

■ si le courant d'arc vient se stabiliser contre une paroi isolante, sa surface d'échange thermique diminue et les composants de l'isolant, localement très chauds, peuvent favoriser la conduction et l'entretien de l'arc ;

a : extinction de l'arc



b : les capacités parasites «court-circuitent» l'arc

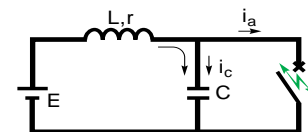


Fig. 4 : extinction d'un arc électrique par «arrachement»

■ si le courant d'arc est important, la colonne d'arc est très exothermique et seule les évolutions conjointes de la tension d'arc et de la tension réseau permettent de réduire ce courant puis de l'annuler.

Aspect diélectrique

Il ne suffit pas que le courant d'arc devienne nul pour assurer son extinction : il faut que le milieu jusque là ionisé se régénère diélectriquement pour « résister » à la tension réseau encore présente !

Ces phénomènes de régénération par recombinaison des ions + ou - et des électrons sont heureusement très rapides ! Aussi dans la pratique, pour que le courant d'arc reste nul, la tension du réseau doit donc être inférieure à la caractéristique de régénération (U_d).

Si la tension d'arc devient et reste supérieure à la tension réseau (en valeur absolue s'il s'agit de tension alternative), le phénomène de régénération sera amorcé pendant l'approche du zéro de courant : le nombre de charges électriques du plasma s'ajuste au strict minimum et devient nul en même temps que le courant.

Mais l'arc et les capacités parasites ont la même tension jusqu'à l'extinction du courant d'arc. Une fois le courant d'arc annulé, cette tension rejoint la tension réseau par un phénomène d'oscillation libre entre ces capacités réparties et les constantes L et R du circuit (cf. fig. 5). Ce « raccordement » en tension est appelé Tension Transitoire de Rétablissement « TTR ». Ces capacités étant faibles, ces oscillations ont une fréquence très élevée et sont très amorties.

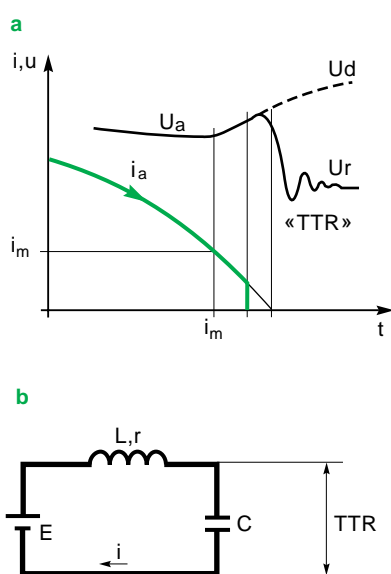


Fig. 5 : la tension transitoire de rétablissement, TTR.

Ces conditions ont lieu :

■ sous tension continue : (cf. fig. 6a) ;
La tension d'arc U_a est supérieure à la tension de réseau U_r au moment où le courant s'annule et la caractéristique de régénération U_d reste supérieure à U_r avec TTR,

■ sous tension alternative :

□ quand la valeur instantanée de la tension du réseau est encore de même signe que la tension d'arc au moment du zéro de courant (cf. fig. 6b). La condition de coupure définitive sera que l'évolution ultérieure de la tension réseau ne recoupe plus les caractéristiques de régénération, tant en valeurs positives que négatives,

□ quand la valeur instantanée de la tension du réseau est de signe opposé à la tension d'arc, mais de valeur absolue inférieure (cf. fig. 6c).

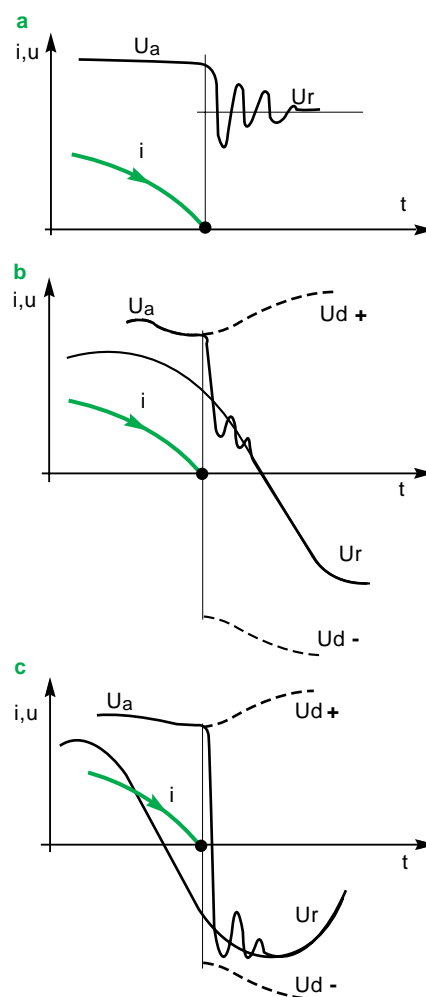


Fig. 6 : l'arc en condition d'extinction.

a- sous tension continue

b- sous tension alternative avec U_r de même signe que U_a à l'instant du zéro de courant,

c- sous tension alternative avec U_r de signe opposé à U_a .

L'extinction de l'arc est définitive si la TTR ne dépasse pas la caractéristique de régénération.

Dans le cas contraire, la TTR coupant la «courbe» de régénération, il peut s'en suivre l'apparition de courant postarc de type électroluminescent. Et alors :

- si le courant postarc reste de type grêle, des conditions d'extinction subsistent ;
- si le courant postarc dépasse une valeur critique sous une tension également critique, il s'en suivra un redémarrage du courant d'arc et il faudra attendre un prochain «zéro» pour couper.

3 Couper grâce à l'arc

Le courant établi à la fermeture peut être calculé par la loi d'Ohm généralisée :
$$e - R i - L \frac{di}{dt} = 0.$$

Après un régime transitoire de fermeture le courant devient stable, dit en régime établi, il a

pour valeur $I = \frac{e}{R}$.

Sur la base d'une telle loi, le courant ne pourrait être annulé définitivement que si la tension «e» devient nulle, ou si R devient infini.

A ces deux extrêmes, qui seraient trop contraignants en exploitation, il s'est avéré préférable d'introduire un arc dans le circuit pour utiliser ses propriétés de tension U_a et ses

conditions d'extinction. Dès l'ouverture du circuit l'équation devient :
$$e - R i - L \frac{di}{dt} - u_a = 0.$$

Ainsi, le courant sera forcé vers zéro ou passera par zéro ; et ce sont les conditions d'extinction de l'arc qui permettront la coupure du courant.

Une approche progressive de la théorie de la coupure se fait en distinguant les deux cas suivants selon que la tension d'arc U_a est introduite dans le circuit :

- alors que le courant était en régime établi (cf. chapitre 4) ;
- avant que le courant n'ait atteint la valeur stabilisée du courant de court-circuit présumé (cf. chapitre 5).

4 Couper des courants établis

Par courants établis, il faut entendre courants nominaux, courants de surcharge et courants de court-circuit qui ont atteint une valeur stable quelconque au moment de l'ouverture du circuit.

L'ouverture du circuit peut être :

- soit volontaire, commandée par l'utilisateur, indépendamment de la valeur du courant ;

- soit «réflexe», par l'action d'un dispositif, sensible à la valeur même du courant, qui commande directement ou indirectement l'ouverture du circuit.

Pour des raisons de simplicité, les conditions de coupure sont étudiées :

- sous tension continue ;
- puis sous tension alternative.

4.1 Sous une tension continue (cf. fig. 7)

$u = E$

avant ouverture : $i_0 = E/R$

après ouverture : $E - R i - L di/dt - u_a = 0$

Dès l'ouverture des contacts, u_a évolue vers une valeur maximale U_a .

La loi d'Ohm généralisée montre que le courant ne pourra être forcé vers «0» que si u_a devient

supérieur à E . Sinon, celui-ci évoluera vers : $i'_0 = (E - U_a)/R$, non nulle.

Dans le but de couper le courant, il est dès lors plus simple et suffisamment démonstratif de considérer cette tension d'arc comme une fonction échelon, $u_a = U_a$ pour $t > t_0$, ($t_0 =$ instant où $u_a = E$).

Le calcul complet donne alors :

$$i_a = \frac{E}{R} - \frac{U_a}{R} \left(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \right) \text{ et } t_a = \tau \text{Log} \frac{U_a}{U_a - E}$$

en considérant qu'il y a coupure dès l'instant où le courant passe par zéro (un courant «négatif» qui serait dû à la prépondérance de U_a par rapport à U_r n'ayant aucun sens physique).

Le calcul de l'intégrale :

$$W_a = \int_{t_0}^{t_a} u_a i_a dt \text{ donne}$$

$$W_a = \left(\frac{1}{2} L i_0^2 \right) 2 \frac{U_a}{E} \left[1 + \left(1 - \frac{U_a}{E} \right) \text{Log} \frac{U_a}{U_a - E} \right]$$

L'interprétation de cette expression est plus aisée en posant $W_{L0} = (1/2 L i_0^2)$, et en observant les courbes (W_a/W_{L0}) , et (t_a/τ) en fonction de (U_a/E) , (cf. fig. 8).

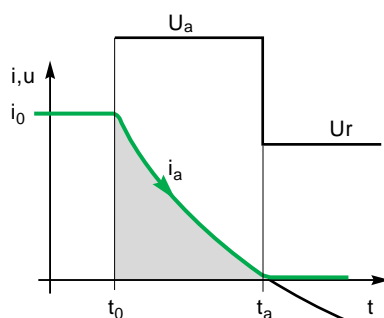
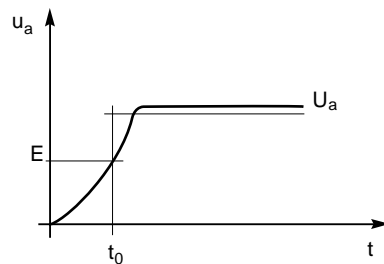
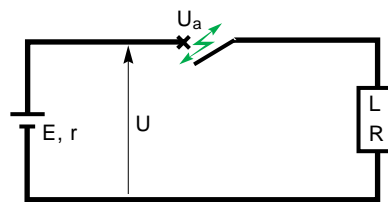


Fig. 7 : coupure sous tension continue.

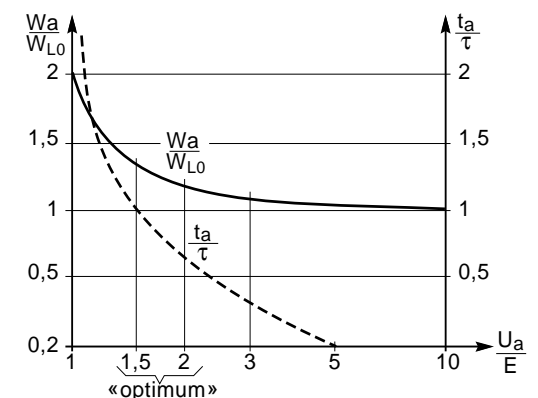


Fig. 8 : courbes W_a/W_{L0} et t_a/τ .

Ces courbes montrent :

■ si $U_a = E$ alors $W_a/W_{L0} = 2$ seulement ! Mais le temps de coupure est infini !

■ si U_a est très grand, voire infini alors : $W_a/W_{L0} = 1$.

L'énergie d'arc est égale à l'énergie selfique initiale, et le temps de coupure est quasiment nul : la puissance de l'arc W_a/t_a très élevée !

■ que le coude de la courbe W_a/W_{L0} est un optimum pratique, et donc que

$$1,5 < \frac{U_a}{E} < 2,5 \text{ est un bon compromis ;}$$

alors $W_a \approx 1,2 W_{L0}$ et $t_a \approx \tau$.

Le coefficient 1,2 (relevé sur la courbe) est très satisfaisant parce que proche du minimum minimorum « 1 » difficile à atteindre.

4.2 Sous une tension alternative monophasée

$$u = E \sin \omega t$$

$$i = I_0 \cos (\omega t + \varphi), \text{ avec}$$

$$\cos \varphi = \frac{L \omega}{\sqrt{(L \omega)^2 + R^2}}$$

$$\text{et } I_0 = \frac{E}{\sqrt{(L \omega)^2 + R^2}}$$

Dès la séparation des contacts, l'arc apparaît, et l'évolution de sa tension dans le temps peut paraître complexe. Néanmoins, u_a est toujours du signe de « i » et sa valeur absolue moyenne tend vers U_a (cf. **fig. 9**).

L'étude mathématique de i_a , t_a et W_a , à partir de la loi d'Ohm généralisée $u - R i - L di/dt - u_a = 0$ est toujours possible mais moins aisée.

De plus, ces seuls calculs ne prenant pas en compte les conditions de rétablissement en tension d'une réelle coupure en alternatif, l'analyse des deux cas $U_a \geq E$ et $U_a \ll E$ s'impose :

■ si $U_a \geq E$, (cf. **fig. 10**), la tension d'arc contribue à forcer le courant vers « 0 » et à y

rester. Ceci quel que soit le déphasage « φ » de « i » par rapport à « u » ;

■ si $U_a \ll E$, la coupure reste possible et globalement plus aisée qu'en continu puisqu'il y aura des zéros « naturels » de i.

La réussite de la coupure est conditionnée par des phénomènes postarcs à chaque zéro de courant, cette condition se résumant à une course de vitesse entre la régénération diélectrique de l'arc et la tension réseau.

Examinons deux possibilités :

□ si la symétrique de U_a acquis à un zéro de courant est supérieure à la tension réseau à cet instant (cf. **fig. 11a**), TTR comprise, alors la « courbe » d'évolution de la régénération diélectrique reste plus grande que la tension réseau : il y a coupure ;

□ si la symétrique de U_a acquis à un zéro de courant est inférieure à la tension réseau à cet instant (cf. **fig. 11b**), TTR comprise, alors cette tension réseau risque de couper la courbe de régénération diélectrique si celle-ci est trop lente. Dans ce cas l'arc peut se réamorcer, il y a non coupure, du moins à ce zéro de courant !

Dans ces deux possibilités l'influence du facteur de puissance $\cos \varphi$ du circuit à couper est importante du fait du déphasage des zéros de courant par rapport à la valeur de la tension du réseau. En particulier, si $\cos \varphi \approx 1$, tension et courant sont nuls en même temps, et la coupure est très facile.

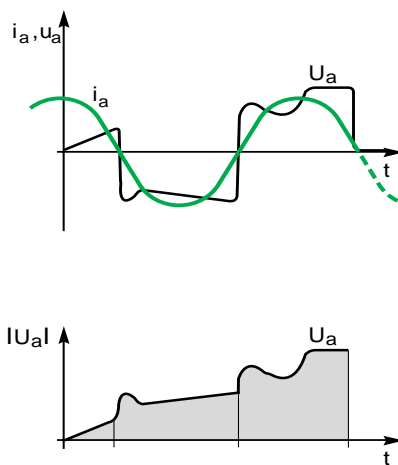


Fig. 9 : coupure sous tension alternative.

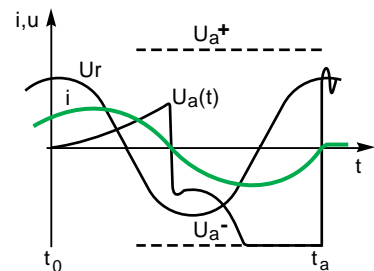


Fig 10 : $U_a \geq E$

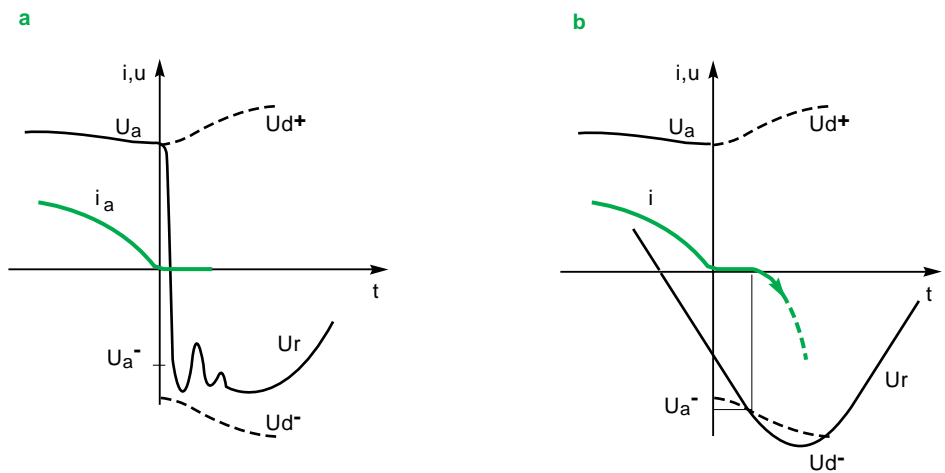


Fig. 11 : $U_a \ll E$

4.3 Sous une tension alternative triphasée

Lorsque le neutre est distribué, les conditions de coupure sous une tension triphasée sont les mêmes que sous une tension monophasée, en raisonnant en tension simple, phase par phase.

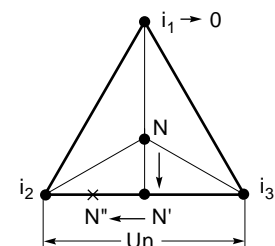
Lorsque le neutre n'est pas distribué le point de court-circuit définit un point neutre «flottant» (cf. fig. 12). Ainsi :

- le premier pôle qui coupe devra supporter une tension de rétablissement égale à une tension semi-composée du fait que le point neutre se déplace de N vers N' (en fait N' tend vers N'' au prorata des tensions d'arc sur les deux autres phases). Le rétablissement en tension se trouve ainsi pénalisé d'un facteur 1,5 (à $\sqrt{3}$) ;

- les deux pôles restants sont en série pour assurer la coupure définitive sous une tension composée. Cette fin de coupure est favorisée si chaque phase a une tension d'arc U_a .

Néanmoins ce n'est guère plus aisé que de couper le même courant sur une seule phase en

tension simple ($\sqrt{3/2} = 0,86$ au lieu de 1 et de plus la moindre faiblesse diélectrique d'un pôle amènerait l'autre à couper sous tension composée).



$i_1 = 0$
 $i_2 = i_3$
 N' et N'' = Neutre flottant

Fig. 12 : neutre non distribué.

5 Couper des courants présumés (avec limitation)

5.1 Définitions

Courant présumé

Dans une installation, c'est le courant qui circulerait dans un circuit, si chaque pôle de l'appareil de connexion, ou le fusible, était remplacé par un conducteur d'impédance négligeable (CEI 60050).

Dans un circuit d'essais d'appareillage, c'est le courant d'étalonnage.

Rappelons que :

■ **sous une tension continue**, l'évolution du courant est de la forme

$$i = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = I_p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \text{ (cf. fig. 13) ;}$$

■ **sous une tension alternative monophasée**, l'instant « d'apparition du défaut » ou de fermeture par rapport à la valeur de la tension réseau a un grand rôle dans l'évolution du courant transitoire.

En caractérisant cet instant d'apparition par son angle d'enclenchement α , la tension peut s'écrire :

$$u = E \sin (\omega t + \alpha), \text{ (cf. fig. 14a) }$$

L'évolution du courant est de la forme :

$$i = \frac{E}{R} \left[\sin (\omega t + \alpha - \varphi) - \sin (\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

avec deux composantes :

- l'une alternative, déphasée de φ par rapport à la tension,
- l'autre continue, tendant vers 0 pour t tendant vers l'infini.

Deux cas particuliers sont définis par :

- $\alpha = \varphi$, dit « régime symétrique » (cf. fig. 14b)

Le courant est de la forme :

$$i = \frac{E}{R} \sin \omega t$$

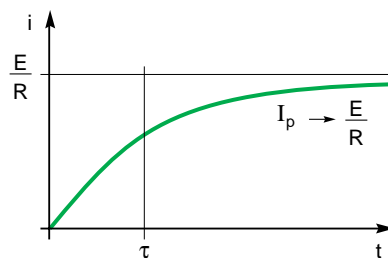


Fig. 13

Le courant a , dès le départ, la même allure qu'en régime établi et une valeur crête E/Z .

- $\alpha = 0$, dit « régime asymétrique » (cf. fig. 14c).

Le courant est de la forme :

$$i = \frac{E}{R} \left[\sin (\omega t - \varphi) + \sin \varphi e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

Ainsi la première valeur crête du courant est fonction du $\cos \varphi$ du circuit ;

■ **sous une tension alternative triphasée** (cf. fig. 15)

Le courant dans chaque phase peut donner lieu aux mêmes cas particuliers (symétrique et asymétrique) qu'en monophasé. De toute façon, quelque soit α il y a presque toujours :

- une phase en régime quasi-symétrique,
- une phase en régime quasi-asymétrique,
- la dernière phase étant dite en « petite boucle ».

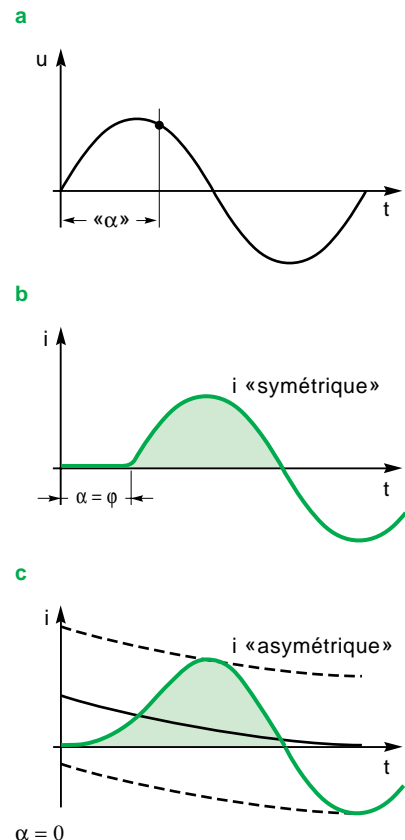


Fig. 14 : évolution du courant sous tension alternative.

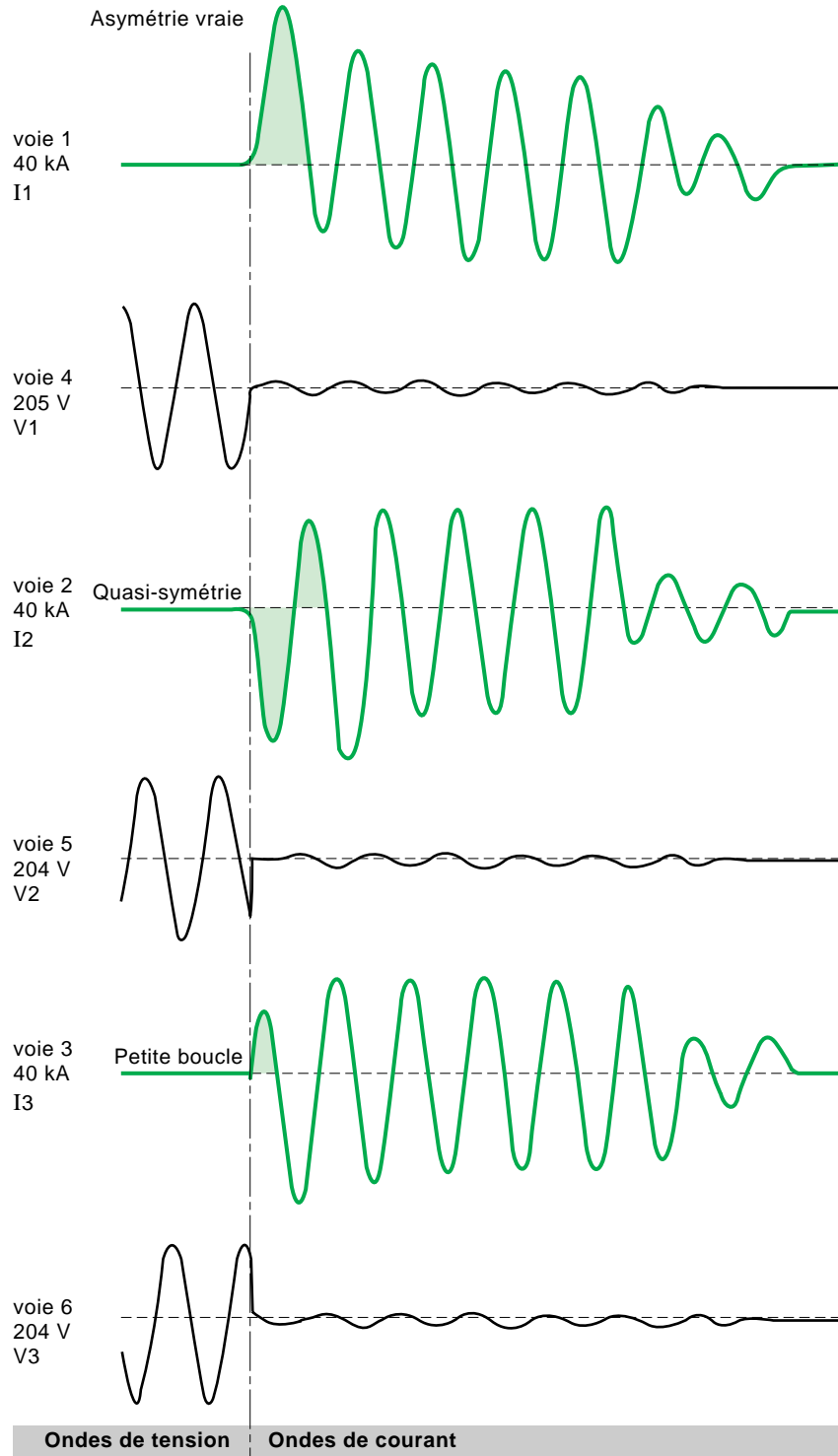
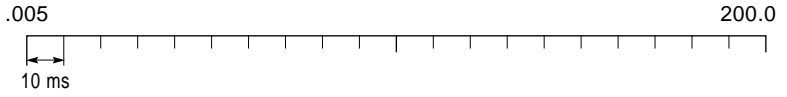


Fig. 15 : oscillogrammes d'une coupure d'un circuit d'essais sous une tension alternative triphasée, avec $\alpha = 0$ (pour la phase 1).

5.2 Coupure avec limitation

Il est entendu par cette expression, que des dispositions sont prises pour empêcher le courant de court-circuit d'atteindre la valeur crête maximale de son courant présumé (cf. fig. 16a).

L'enjeu pratique est important et souvent indispensable pour éviter des dégâts dans l'installation.

Cette limitation ne sera obtenue grâce à l'arc que si sa tension d'arc devient rapidement plus grande que la tension du réseau et s'y maintient (cf. fig. 16b).

En effet, la loi d'ohm, $e - R i - L \frac{di}{dt} - U_a = 0$, permet de définir trois conditions de limitation (cf. fig. 16c) :

- création d'une tension d'arc au plus tôt ;
- évolution de cette tension d'arc au plus vite

pour avoir $U_a = e - R i$ et ainsi $L \frac{di}{dt} = 0$, ce qui signifie que le courant atteint alors une valeur maximale \hat{i}_c ;

- maintien de cette tension d'arc U_a au plus haut, alors di/dt est négatif et le courant est forcé vers 0.

En résumé «**Tôt, Vite, Haut**», telle est la devise pour :

«**Couper grâce à l'arc...
des courants présumés,
...avec limitation**»

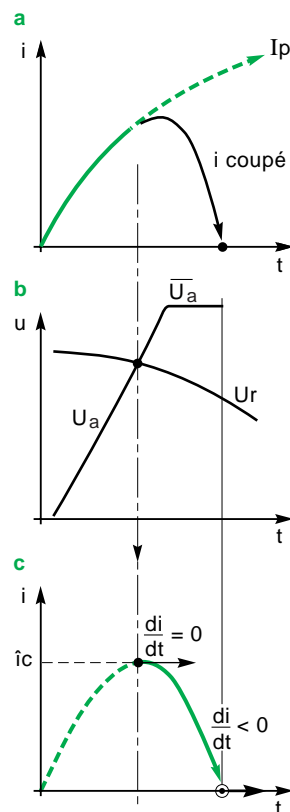


Fig. 16 : conditions de limitation.

5.3 Sous une tension continue

La tension continue est de la forme $u(t) = E$.

- Jusqu'à ouverture du circuit, le courant évolue selon la formule :

$$i = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = I_p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

- Après ouverture du circuit, une tension d'arc apparaît. Si celle-ci croît rapidement, son évolution globale peut être assimilée à une fonction échelon dont le front de montée serait défini par : $u_a = E$ à un instant t_0 (cf. fig. 17).

Le courant ayant alors atteint une valeur i_0 décroît ensuite d'une façon exponentielle et s'annule après un temps $t_a \ll \tau$.

Le calcul de l'énergie d'arc,

$$W_a \approx \int_{t_0}^{t_a} u_a i_a dt,$$

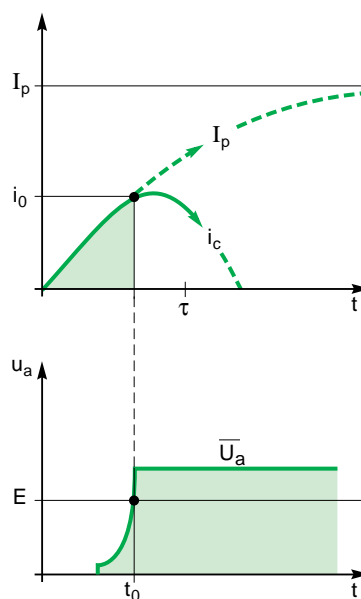


Fig. 17 : limitation sous tension continue.

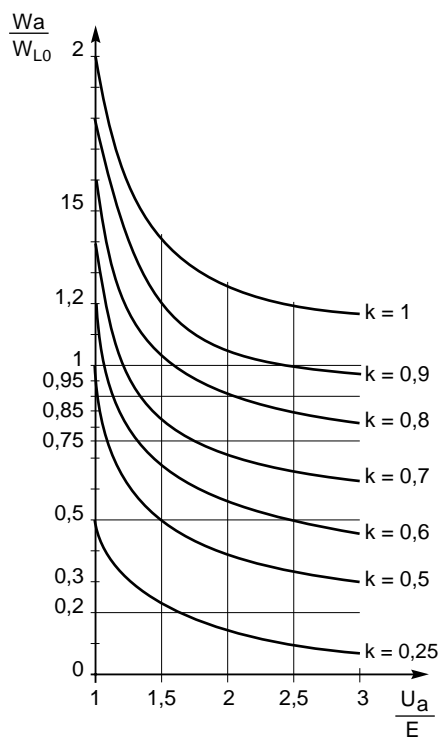


Fig. 18 : réseau de courbes selon le rapport k.

Par conséquent,

$$W_a \approx \left[\frac{1}{2} L i_0^2 \right] 2 \frac{U_a}{R i_0} \left[1 - \frac{U_a - U_n}{R i_0} \log \left(1 + \frac{R i_0}{U_a - U_n} \right) \right]$$

D'où le réseau de courbes (W_a/W_{L0}), (cf. fig 18) en introduisant le rapport de limitation $k = i_0 / i_p$.

A noter que l'énergie d'arc est d'autant plus petite que le rapport k est petit. Cette énergie est «optimale» pour $1,5 < U_a / E < 2,5$; ce qui était le cas en courant établi.

5.4 Sous une tension alternative monophasée

En condition de limitation, la coupure d'un tel courant se fait comme s'il s'agissait momentanément d'une coupure sous tension continue.

■ Dans le cas du **régime symétrique**, en particulier, il est quasiment équivalent de considérer une coupure sous courant présumé avec une tension réseau $E = U_n$ (cf. fig. 19a).

■ Dans le cas du **régime asymétrique**, la limitation est souvent meilleure car la tension

d'arc «coupe» la tension réseau avant que le courant n'ait fortement évolué (cf. fig. 19b).

■ Dans tous les cas «**intermédiaires**», avec «petite boucle», la coupure avec limitation peut n'avoir lieu que lors de la deuxième demi onde de courant, la première ayant été trop faible en intensité (cf. fig. 19c).

Remarque : Une limitation performante sur forts courants de court-circuit, ne peut être obtenue que si la tension d'arc intervient dans un temps très inférieur à T/4.

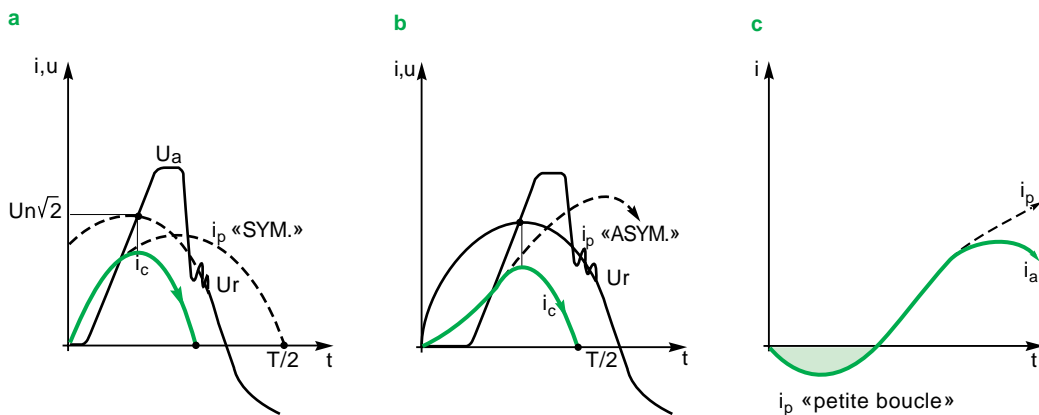


Fig. 19 : limitation sous tension alternative monophasée.

5.5 Sous une tension alternative triphasée

Deux cas sont à considérer :

1er cas : **ouverture indépendante des pôles.**

Chaque phase fait apparaître une tension d'arc en fonction du courant qui la traverse (cf. **fig. 20**).

En première approche, tout se passe comme si :

- une des phases coupe en régime symétrique monophasé mais dont le rétablissement en tension se fait sous une tension semi-composée ;
- enfin, les deux autres phases assurent une coupure en biphasé d'une «queue de courant».

2e cas : **ouverture simultanée des pôles.**

Le courant de la phase en régime symétrique réagit, le premier, sur un dispositif de déclenchement qui assure une ouverture omnipolaire très rapide.

Auquel cas les tensions d'arc se développent sur les trois phases à partir du même instant.

Tout se passe comme si la phase en régime quasi-symétrique était coupée sous sa tension composée avec une tension d'arc doublée.

Cette ouverture omnipolaire doit se faire dans un temps $< T/4$ et aura une efficacité maximale pour $< T/8$, la phase en «petite boucle» étant alors coupée bien qu'ayant vu peu de courant.

Un tel comportement en coupure :

- a lieu sur des dispositifs à faible inertie totale des pièces en mouvement ;
- est recherché sur de gros appareils à énergie de manœuvre externe ultra rapide (à effet Thomson avec décharge capacitive par exemple).

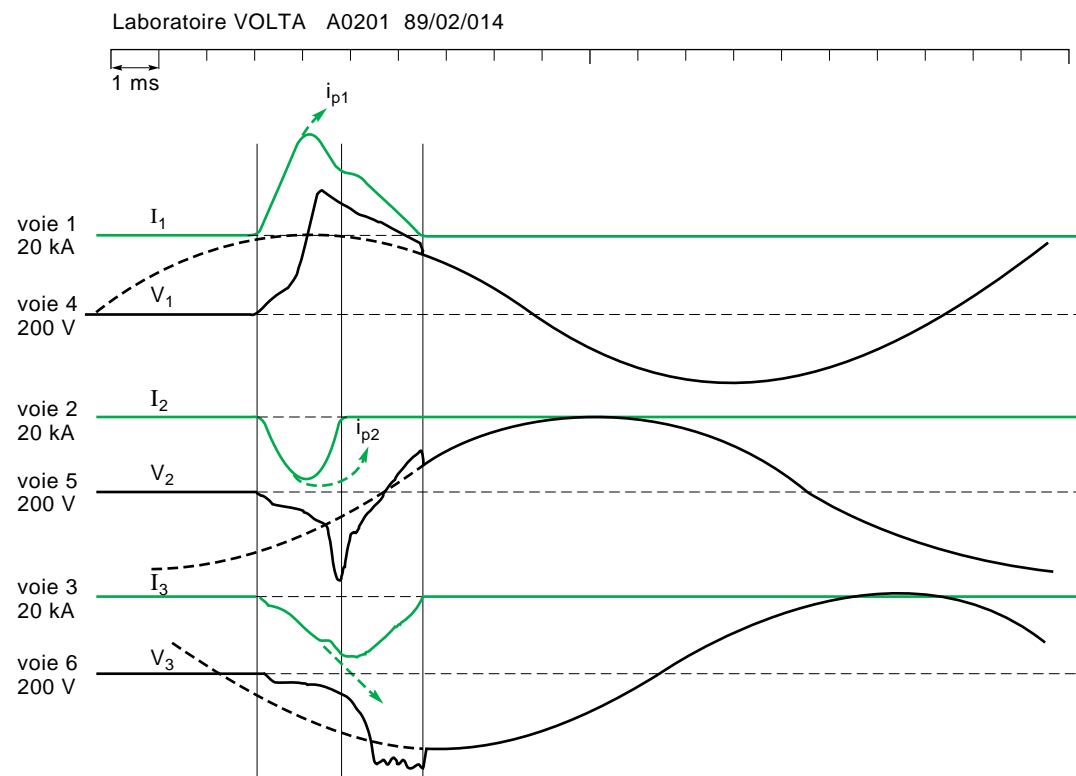


Fig. 20 : oscillogrammes d'une coupure d'un court-circuit d'essais sous une tension triphasée, avec ouverture indépendante des pôles.

5.6 Les paramètres de coupure

Afin d'apprécier l'efficacité de la coupure, les paramètres retenus sont :

- **courant crête coupé** = \hat{i}_c (valeur absolue du courant crête maximum).

Sa connaissance permet de définir les contraintes électrodynamiques maximales dans le circuit ;

- **«contrainte thermique» ou intégrale de joule** = $\int i^2 dt$

Cette dénomination est consacrée par l'usage.

La forme du courant coupé ne correspondant pas à une fonction mathématique simple, cette

intégrale est calculée pas à pas, par informatique.

Cette intégrale traduit les contraintes d'énergie thermique, mais aussi électro-dynamique, sur les éléments du circuit ;

■ **durée de coupure** = t_a
Temps total de coupure si le circuit est triphasé ;

■ **tension d'arc maximum** = U_a

Ordres de grandeur :

- 250 à 500 V pour un disjoncteur standard,
- 600 à 900 V pour un disjoncteur limiteur.

Ces «surtensions» ne sont pas dangereuses car elles sont inférieures aux tensions d'essais normalisées pour les installations BT ;

■ **énergie d'arc** = $\int u_a i_a dt$

Cette intégrale est aussi calculée, pas à pas, par ordinateur. Elle traduit l'énergie consommée dans la zone d'arc.

Ordres de grandeur : 1, 10, 100 kJ suivant les appareils et les courants coupés.

Elle conditionne l'endurance des appareils en coupure.

5.7 Coupure par la technique fusible

Un fusible coupe grâce à l'arc.

Sa relative simplicité réside dans le fait qu'un filament dûment calculé est porté à sa température de fusion par le courant qui le traverse.

Sur fort courant, l'échauffement conduisant à la fusion du filament est de type adiabatique, son énergie de préarc étant définie par la formule :

$$R \int_0^{t_{pa}} i^2 dt = m c T_f$$

avec : R = résistance du filament,
m = masse du filament,
c = capacité calorifique,
 T_f = température de fusion,
 t_{pa} = temps de préarc.

Cette énergie thermique dite de préarc est indépendante de la tension réseau.

L'arc a rapidement la longueur du filament fondu, la tension d'arc prend une valeur fonction de cette longueur et de la pression qui apparaît dans l'ampoule (cf. **fig. 21**).

Cette ampoule peut être remplie de poudre de silice pour absorber l'énergie d'arc par fusion de la silice.

Note : La «traîne» de courant s'explique par le chemin «préférentiel» que l'arc crée dans la silice fondue. L'arc devient grêle contre les parois encore chaudes.

Quelques remarques à propos des fusibles :

- ceux-ci ne peuvent intervenir que suite à des courants de forte surcharge ou de court-circuit ;
- certains types de fusibles sont à percuteur pour signaler leur fusion, mais aussi parfois pour agir indirectement sur un dispositif de coupure complémentaire afin d'assurer une ouverture de toutes les phases ;
- après défaut et fusion d'un fusible, certains «rescapés» peuvent avoir frôlé la fusion et ainsi avoir leurs caractéristiques modifiées, ils sont alors susceptibles de fondre intempestivement sous un courant inférieur à leur calibre. Aussi faut-il changer tous les fusibles à la fois.

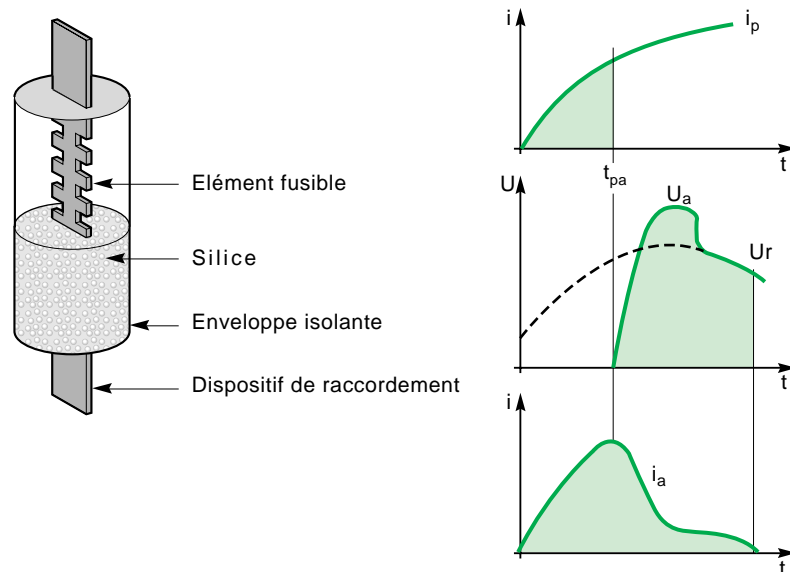


Fig. 21 : le fusible, sa constitution et les courbes caractéristiques de sa coupure.

6 Le disjoncteur basse tension

Un disjoncteur (cf. **fig. 22**) est un appareil de connexion capable de fermer et d'interrompre un circuit **quel que soit le courant jusqu'à son Pouvoir de coupure ultime : Icu** (cf. norme CEI 60947-2).

Bien que sa fonction essentielle soit la coupure des courants de court-circuit et de surcharge par action «réflexe» à propre courant, il permet aussi par une action volontaire extérieure, les coupures des courants de surcharge et des courants «normaux», (d'emploi et plus petits). De plus, après toute ouverture il assure un isolement en tension du circuit coupé.

La conception d'un disjoncteur pouvant réunir dans un même boîtier toutes ces fonctions a conduit à adopter des solutions spécifiques quant aux :

- mécanismes de fermeture/ouverture ;
- déclencheurs ;
- circuits électriques des pôles ;
- éléments de coupure (contacts, chambre de coupure,...).

Ce chapitre est une analyse de ses fonctions, ses technologies, et ses performances.

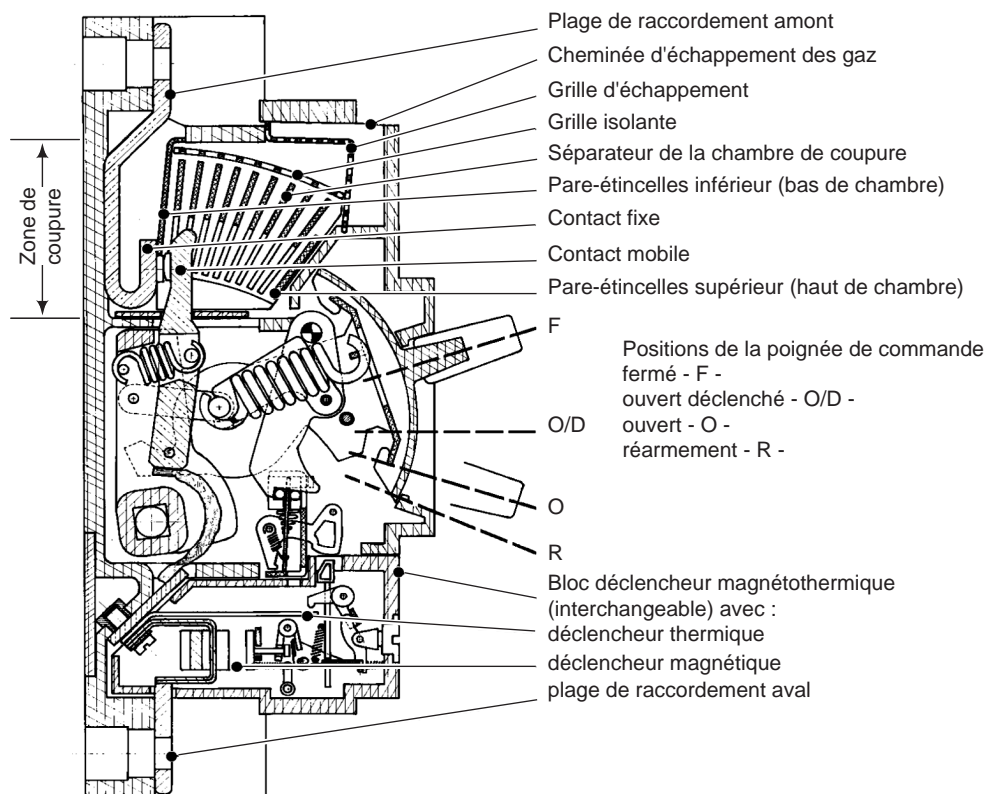


Fig. 22 : coupe d'un disjoncteur BT industriel 400 A.

6.1 Ses fonctions

Fermer le circuit

Par action sur le mécanisme, dès que le moindre contact est établi, le ou les récepteurs sont alimentés en courant ; à la mise sous tension

certaines absorbent des courants bien supérieurs à I_n (exemple : moteur 7 à 8 I_n pendant quelques secondes). Pour que ces surintensités ne donnent pas lieu à des phénomènes néfastes

pour la zone de contact (érosion due aux arcs), l'accostage à la fermeture doit être brusque, notamment à partir de 100 A .

Aussi, pour convenir à tous les cas usuels, les disjoncteurs doivent pouvoir établir des courants de 15 à 20 fois supérieurs à leur intensité nominale.

La réalisation de cette fonction requiert des spécificités, car un disjoncteur doit toujours être prêt à rouvrir en cas de défaut dans l'installation, y compris pendant ou très peu de temps après sa fermeture!

Conduire le courant

Cette fonction passive nécessite des précautions constructives, pour avoir tout à la fois un échauffement admissible et une possibilité d'ouverture rapide.

Et en plus, si le disjoncteur est sélectif il peut nécessiter une tenue électro-dynamique élevée pour accepter les courants de court-circuit pendant la durée de sélectivité, nécessaire au fonctionnement des appareils aval.

Ouvrir le circuit, couper le courant

■ Par action volontaire sur le mécanisme, manuelle ou télécommandée ; le courant à couper peut être quelconque.

■ Par l'action réflexe sur le mécanisme, provoquée par le déclencheur suite à une surintensité : il s'en suit une ouverture automatique et définitive du disjoncteur, même si l'organe de manœuvre est maintenu sur la position « fermé ».

■ Par action d'un déclencheur auxiliaire sur le mécanisme :

Dispositifs à manque de tension, à mise sous tension, à courant différentiel... L'ouverture est automatique et définitive, le courant ayant une valeur quelconque à cet instant.

Assurer le sectionnement

Quand le disjoncteur est ouvert, un niveau d'isolement est requis entre les parties « sous tension » et « hors tension ».

Ce niveau est validé par des tests diélectriques, tels ceux prescrits par la norme CEI 60947-2 :

■ un essai de courant de fuite maxi entre entrée et sortie sous U_e max ;

■ une tension de choc supérieure (par exemple à 12,3 kv au lieu des 9,8 kV exigés pour un appareil de même type n'ayant pas cette fonction) ;

■ un essai de robustesse du mécanisme, dit « du contact soudé » ; (cf. Cahier Technique Schneider Electric n° 150).

6.2 Ses technologies

Les mécanismes

Les trois principes de base sont :

■ mécanisme « à 2 positions » stables « O » et « F » (pour les disjoncteurs de calibre inférieur à 100 A) ;

■ mécanisme à 3 positions stables O, F, O/D, surtout utilisé dans les disjoncteurs industriels (cf. fig. 22) dont l'organe de manœuvre permet :

□ la fermeture brusque des contacts, indépendante de la façon de manœuvrer,

□ l'ouverture brusque des contacts, indépendante de la façon de manœuvrer,

□ l'ouverture par déclenchement, brusque et indépendante du maintien de la poignée en position « F » ; un réarmement doit alors précéder la refermeture,

□ le sectionnement apparent (l'organe de manœuvre ne peut être cadencé en position « O » que si les contacts sont réellement ouverts) ;

■ mécanisme pour disjoncteur forte intensité, plus sophistiqué, car il comporte un dispositif d'armement à accumulation d'énergie avant fermeture et ouverture, permettant ainsi un cycle « O - FO » sans réarmement intermédiaire.

Les déclencheurs

Les déclencheurs sont d'une très grande diversité, aussi seuls les principes de bases qui constituent des minimums pour aborder la

coupure des surintensités sont rappelés ci-après.

■ Les déclencheurs magnéto-thermiques :

□ en condition de surcharge, c'est l'atteinte d'un échauffement significatif d'un courant déterminé, (ou d'une température pour beaucoup d'entre-eux) qui provoque le déclenchement grâce à un élément « thermo-mécanique », généralement un bilame.

- lorsque la surcharge est faible le calibre nominal du déclencheur est défini par des conditions d'échauffement en régime asymptotique.

Le déclencheur peut être « compensé » pour éviter l'influence de la température ambiante.

- pour des surcharges importantes, les échauffements évoluent en régime adiabatique. Le temps de déclenchement est donc fonction de l'état d'échauffement préalable du disjoncteur.

□ en condition de court-circuit, à partir d'un certain seuil de courant, les déclenchements seront assurés en « instantané » par un circuit magnétique qui actionne une palette ou un noyau.

Ce seuil est défini sur impulsion de courant de 200 ms, mais son temps d'action devient très petit (3 à 5 ms) sur fort courant ;

■ Les déclencheurs «électroniques».
L'objectif premier reste une évaluation du courant qui traverse les pôles du disjoncteur pour agir en conséquence sur un dispositif de déclenchement.

Leurs intérêts :

- plus grande précision des seuils recherchés,
- courbes de déclenchement réglables selon l'emploi,
- des possibilités d'information locale ou à distance.

Les contacts

Les contacts des disjoncteurs BT sont constitués par des zones d'éléments conducteurs mis en pression dans le même sens que leur déplacement possible (cf. **fig. 23**), donc pas de contact «couteau» comme dans beaucoup d'interrupteurs.

Deux phénomènes physiques liés aux matériaux utilisés et à la force de contact doivent retenir notre attention :

■ la résistance de contact (R_c).

Celle-ci doit être la plus faible possible car elle conditionne la puissance ohmique développée au point de contact qu'il faut évacuer par conduction. Ces échauffements peuvent accentuer les phénomènes d'oxydation et de corrosion, pour s'en préserver, les contacts peuvent être en cuivre jusqu'à 100 A et doivent être à base d'argent au-delà.

Sur forts courants, au point de contact, la puissance produite peut dépasser la puissance dissipable. La zone de contact peut alors être portée à la fusion ; aussi pour éviter la soudure

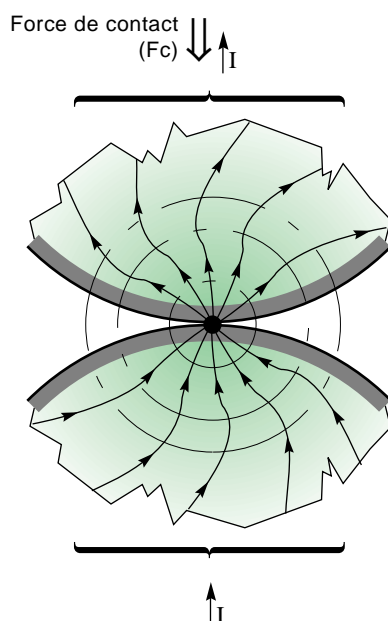


Fig. 23 : les contacts des disjoncteurs BT sont mis en pression dans le même sens que leur déplacement.

des contacts un couple de matériaux hétérogène est généralement prévu, par exemple avec l'introduction de tellure ou de carbone dans l'un des deux matériaux de contact.

La technique de «contact unique» est employée jusqu'à $I_n = 630$ A. Au-delà il s'avère préférable d'utiliser un système à plusieurs «doigts» de contact en parallèle ;

■ la répulsion de striction.

Par interaction magnétique entre les lignes de courants «rayonnantes», il apparaît une force de répulsion des contacts dite répulsion de striction. Cette répulsion de striction a des conséquences néfastes, car pendant toute sa durée il y a :

- érosion inutile des pastilles par l'énergie d'arc,
- risque de soudure ou de microsoudure si les contacts se referment,
- création de «points chauds» favorisant la stagnation de l'arc et ainsi l'émission thermoionique ; les conditions d'extinction de l'arc pendant sa phase de régénération pouvant être ainsi compromises.

Il est à noter que pour améliorer la tenue électrodynamique au-delà de $I_n = 630$ A, la répulsion de striction conduit aussi à utiliser la technique multi«doigts».

En définitive, le choix des matériaux et de la force de contact sont déterminants quant à la résistance de contact, au seuil de répulsion et, à d'autres aspects tels que érosion, microsoudures etc.

Contact mobile

Sur forts courants, au-delà de $15 I_n$, il faut :

■ pour des appareils devant rester fermés, renforcer la tenue électrodynamique par un effet de «compensation» à propre courant. Voici quelques schémas possibles :

□ par attraction mutuelle, ce schéma utilisé dans les interrupteurs empêche l'ouverture sous fort courant (cf. **fig. 24a**),

□ par répulsion équilibrée, utilisée dans les disjoncteurs à forte intensité nominale (cf. **fig. 24b**). Ces disjoncteurs étant en tête d'installation, ils sont souvent à déclenchement retardé pour obtenir une sélectivité ; leur tenue électrodynamique doit donc être élevée, proche des valeurs de court-circuit « $20 I_n$ » ;

■ pour des appareils devant s'ouvrir et couper rapidement, améliorer les conditions de répulsion du contact mobile afin d'obtenir au plus vite une tension d'arc. Quelques schémas sont possibles (cf. **fig. 25**) :

- à simple boucle de répulsion,
- à double répulsion (souvent réalisée par un «double contact»),
- à «extracteur», un noyau magnétique pousse ou tire le contact mobile.

Les effets de répulsion peuvent être renforcés par la mise en œuvre de circuits magnétiques :

□ avec des effets proportionnels au carré du courant :

- circuit avaleur en U (cf. **fig. 26a**),

- circuit expulseur en U (cf. **fig. 26b**),

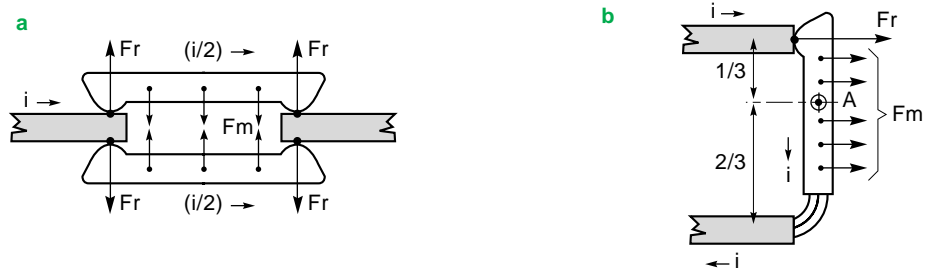


Fig. 24 : renforcement de la tenue électrodynamique des contacts.

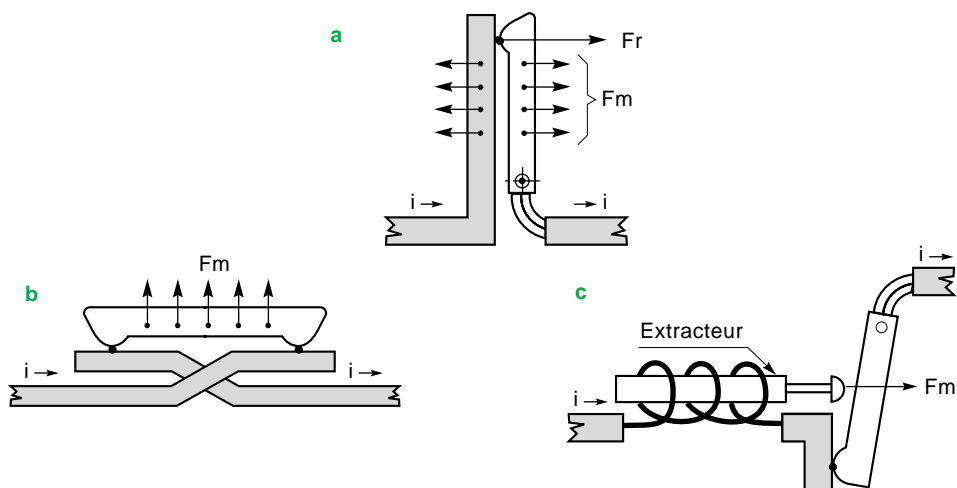


Fig. 25 : principe de répulsion des contacts :
a : à simple boucle de répulsion ;
b : à double répulsion (souvent réalisé par un double « contact ») ;
c : à « extracteur », un noyau magnétique pousse ou tire le contact mobile.

□ avec des effets proportionnels à la pente du courant (di/dt) donc particulièrement efficace sur fort courant (I_{cc}), (cf. fig. 26c).

Il est parfois recherché que les contacts mobiles se referment « tous seuls » après un laps de temps afin de ne rouvrir définitivement que si le court-circuit n'a pas été éliminé par un disjoncteur plus en aval.

Les chambres de coupure

Le rôle essentiel de cette zone est de maintenir la tension d'arc à une valeur convenable tout en absorbant l'énergie développée par l'arc (cette énergie est parfois phénoménale : si $U_a = 500$ V et $i = 10000$ A pendant 2 ms, alors $P_a = 5$ Mw et $W_a = 10$ kJ !).

Cette zone doit aussi satisfaire à des conditions de régénération diélectrique suffisantes pour assurer la coupure définitive du courant, malgré la présence de la tension réseau.

Les phénomènes physiques à prendre en compte pour assurer la coupure ne sont plus essentiellement électriques : la thermique (fusion, sublimation, évaporation), l'aérodynamique, le rayonnement, jouent également un rôle dans les bilans d'énergies de chaque instant.

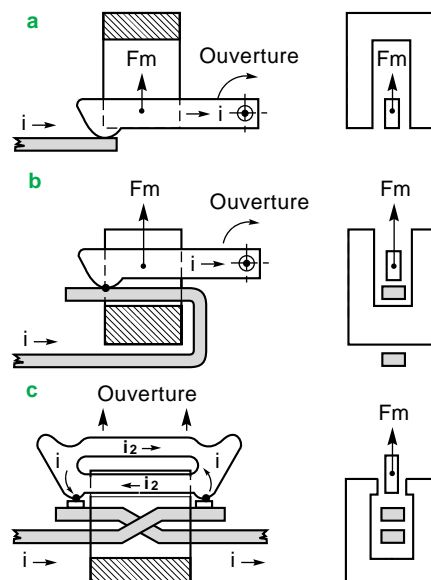


Fig. 26 : dispositifs magnétiques de répulsion des contacts :

- a** : circuit avaleur en U ;
- b** : circuit expulseur en U ;
- c** : répulsion à fort di/dt .

Le principe de base d'une chambre de coupure consiste à envoyer l'arc contre un empilage de séparateurs, ou plaquettes, disposés transversalement à la colonne d'arc principale afin de :

- fractionner l'arc en autant d'arcs élémentaires qu'il y a d'intervalles (cf. **fig. 27a**), chacun d'eux génère ainsi une tension d'arc minimale U_{AC} de 20 à 40 V, due au phénomène anode/cathode et provoque un allongement de cet arc.

La tension d'arc escomptée quand il y a fractionnement se calcule ainsi :

$$U_a \approx N U_{AC} + (L - N e) U_L$$

où :

e = espace entre 2 séparateurs,

N = nombre de séparateurs,

L = longueur de la chambre de coupure.

Par exemple : avec $N = 10$, $L = 4$ cm,

$e = 0,2$ cm, $U_{AC} \approx 30$ V et $U_L \approx 75$ V/cm,

$$U_a \approx 200 + 150 = 350 \text{ V}$$

- emmagasiner, par échauffement ou liquéfaction temporaire des séparateurs, l'énergie produite sous forts courants dans la colonne de plasma.

Mais dans un contexte donné et sous forts courants, il existe une limite supérieure en intensité au-delà de laquelle, l'arc reste en avant des séparateurs tout en ayant des échanges thermiques très importants avec ceux-ci (cf. **fig. 27b**). Bien que l'arc ne soit plus fractionné, la tension d'arc est de même ordre de grandeur ou un peu plus petite.

La préchambre

Cette zone est constituée par le volume qui sépare la zone de séparation des contacts et le début des séparateurs composant la chambre de coupure.

Son aménagement est souvent nécessaire, voire indispensable pour :

- éviter la stagnation de l'arc sur les contacts (érosion et points chauds) ; le pare-étincelles « inférieur » y contribue en assurant le déplacement du pied d'arc des contacts fixes vers le dessous des séparateurs de la chambre ;
- favoriser un allongement de l'arc plus rapide et plus grand que celui provoqué par la seule ouverture mécanique des contacts.

Les effets magnétiques déjà évoqués pour la répulsion du contact mobile contribueront à ces objectifs, en agissant sur le courant d'arc.

En plus de ce « soufflage magnétique » un réel soufflage aérodynamique apparaîtra si l'énergie de l'arc naissant vaporise ou sublime des matériaux isolants gazogènes.

Enfin une pression, inévitable lors de la coupure de forts courants en milieu confiné, favorise l'évolution de la tension d'arc, car :

- la section droite de la colonne d'arc s'en trouve réduite et sa « résistance » augmentée ;
- les différences de pressions entre cette zone (surpression due à l'arc) et l'arrière de la chambre de coupure (pression atmosphérique) favoriseront son entrée et son maintien dans la chambre.

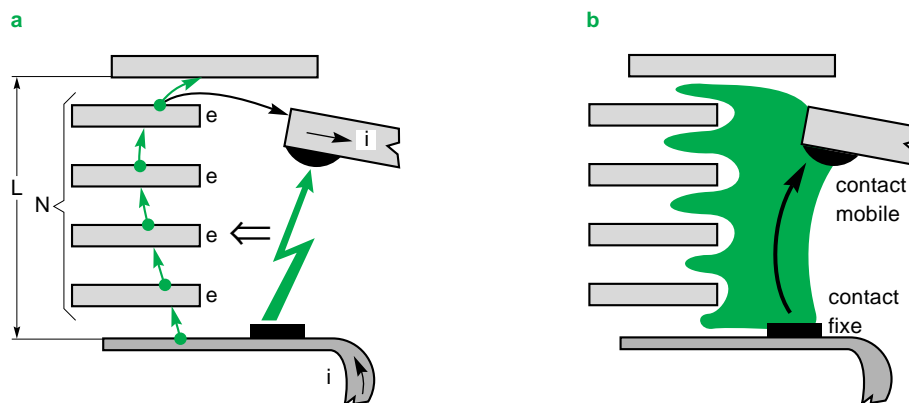


Fig. 27 : les séparateurs placés dans les chambres de coupure facilitent la coupure.

6.3 Ses performances

Les performances d'un disjoncteur permettent d'assurer son aptitude à l'emploi dans une installation électrique donnée et en un point donné de celle-ci.

Les installations électriques nécessitent l'emploi de nombreux disjoncteurs (à l'origine de l'installation, aux changements de section des lignes, près de certains récepteurs,...) dont les performances peuvent être très différentes :

- des tensions nominales de 400 à 690 volts en triphasé ;
- des intensités nominales I_n comprises entre quelques ampères et 6300 A, selon leur place dans l'installation ;
- des protections contre les surcharges de 1,3 à 10 I_n , selon les éléments protégés ;
- des pouvoirs de coupure de valeurs souvent inférieures à 35 kA, mais atteignant parfois 150 kA selon la puissance installée.

Particularités des disjoncteurs BT

Pour satisfaire l'ensemble des besoins d'une distribution électrique de caractère industriel ou tertiaire, il est donc nécessaire de disposer d'une «gamme de disjoncteurs» (cf. **fig. 28**).

Disjoncteurs dont les caractéristiques sont obtenues par des solutions techniques adaptées à leurs fonctions et à leur tailles.

C'est ainsi que la fonction coupure, adaptée à chaque niveau, contribue à la sûreté de toute une installation :

- la protection (des personnes et des matériels),
- la disponibilité de l'énergie, ou continuité de service notamment par la sélectivité au déclenchement des disjoncteurs.

En BT, deux types de sélectivité sont essentiellement utilisés : la sélectivité ampèremétrique et la sélectivité chronométrique.

■ La première, renforcée par l'emploi de la sélectivité énergétique (cf. Cahier Technique N° 167), s'obtient avec les disjoncteurs de catégorie A selon la norme CEI 60947-2. Ces disjoncteurs doivent couper très rapidement le courant de défaut, et limiter fortement les courants de court-circuit.

■ La deuxième, la sélectivité chronométrique, est réalisée avec les disjoncteurs de catégorie B. Ces disjoncteurs, généralement placés en tête d'installation, doivent supporter le passage des

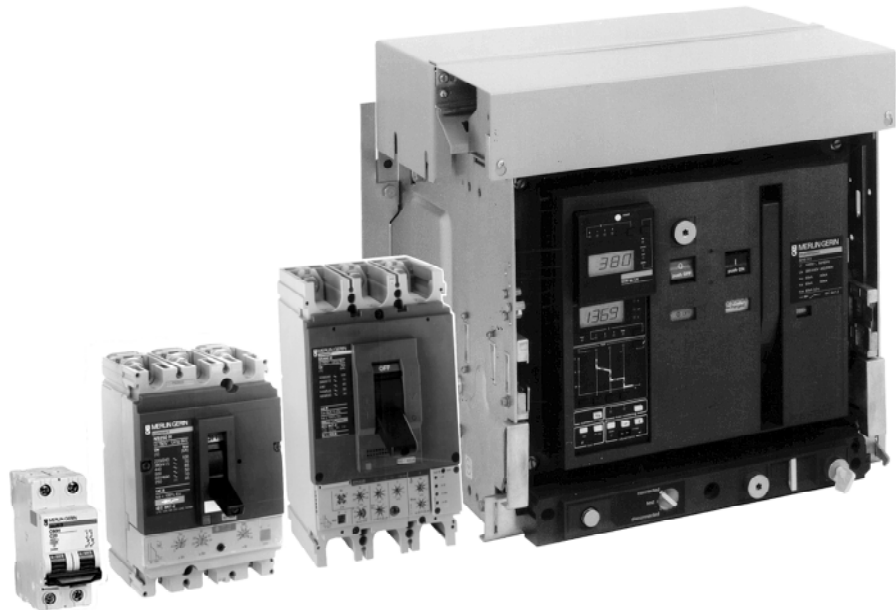


Fig. 28 : gamme de disjoncteurs Basse Tension Merlin Gerin.

courants de défaut établis et donc avoir une forte tenue électrodynamique.

Une forte limitation du courant de court-circuit

(voir aussi le Cahier Technique n° 163)

Elle est surtout recherchée pour les disjoncteurs de taille inférieure ou égale à 630 A.

Ceux-ci développent une tension d'arc de l'ordre de 600 à 900 V dans des petits volumes. Une telle tension s'obtient plus aisément avec des systèmes à double coupure (par combinaison des schémas des figures 25b et 26b), et la mise en œuvre d'un contact mobile de type rotatif qui offre l'avantage supplémentaire de faciliter la fabrication d'une enceinte par pôle (cf. **fig. 29**).

Couper "100 kA" en 2,5 ms est ainsi devenu possible avec un disjoncteur de la taille 250 A.

Une forte tenue électrodynamique

Elle est recherchée pour les disjoncteurs de taille égale ou supérieure à 800 A.

Cet objectif nécessite un principe de compensation des efforts électromagnétiques plus aisé à résoudre avec une simple coupure (schéma 24b) d'autant plus que la grande ouverture (distance entre les contacts) permet

d'obtenir également une tension d'arc élevée de 600 à 900 V.

C'est ainsi qu'un disjoncteur d'une taille de 3200 A coupe "100 kA" en 15 ms (sans retard au déclenchement), mais peut aussi supporter 75 kA pendant 3 s (cf. **fig. 30**).

Des performances confirmées

L'évaluation et la garantie des performances des disjoncteurs sont faites par la réalisation d'essais normalisés (cf. CEI 60947-2 et NF C 63-120).

Ainsi, pour ce qui a trait à la "coupure", des essais permettent de vérifier par exemple :

- les durées sous I_n ,
- les durées en surcharges (sous $6 I_n$ par exemple),
- les pouvoirs de coupure par des cycles :
 - O-FO à I_{cu} , courant de court-circuit ultime,
 - ou O-FO -FO à I_{cs} , courant de court-circuit de service avec $I_{cs} \leq I_{cu}$.

Nota :

La publication de la norme CEI 60947-2, qui traite des disjoncteurs BT industriels, a fait l'objet du Cahier Technique n° 150 dont la lecture est à même de compléter ces informations.

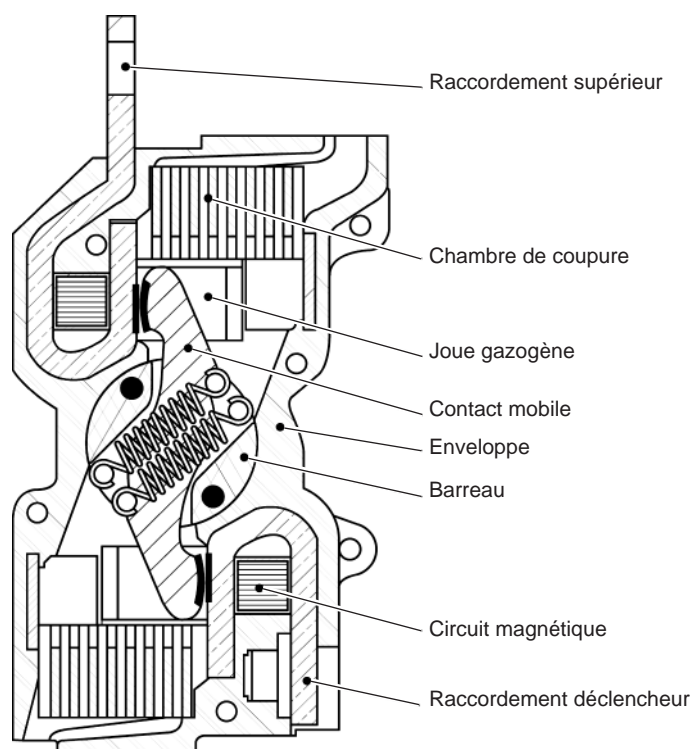


Fig. 29 : enceinte de coupure d'un disjoncteur BT à contact rotatif (Compact NS - Merlin Gerin).

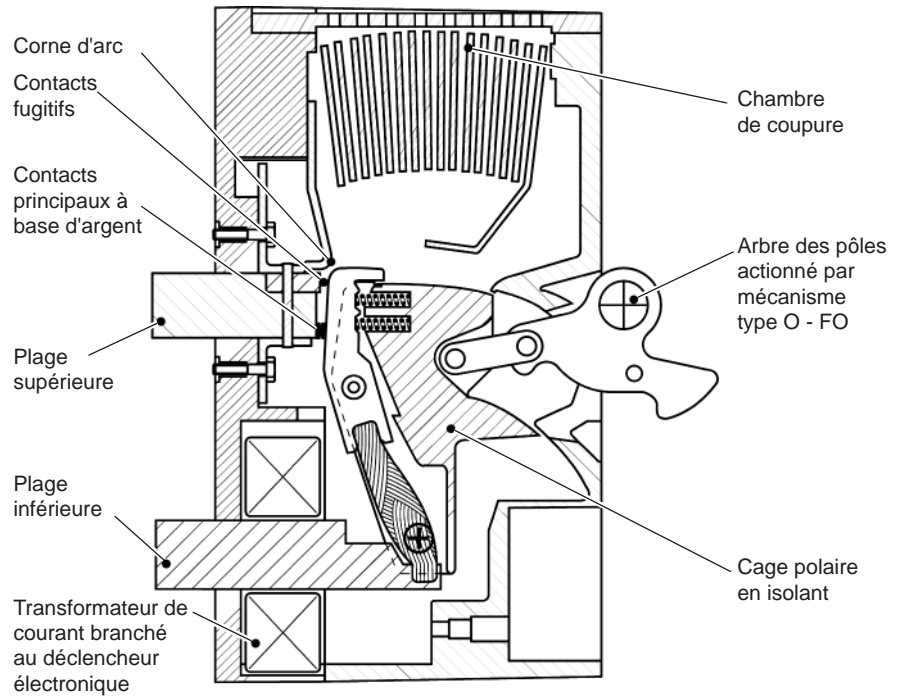


Fig. 30 : enceinte de coupure d'un disjoncteur BT de forte tenue électrodynamique (Masterpact - Merlin Gerin).

7 Conclusion

L'avenir de l'arc ?

Aujourd'hui encore, l'arc électrique reste un moyen très adapté à la coupure avec limitation des courants en basse tension.

De plus les disjoncteurs basse tension bénéficient d'importantes améliorations liées aux évolutions des connaissances, des matériaux et à l'emploi de l'électronique.

Aussi, pendant de nombreuses décennies encore, la protection des circuits électriques nécessitera des disjoncteurs avec la «maîtrise de l'arc».

Bibliographie

Normes

- CEI 60947-2 : Appareillage à basse tension - 2ème partie : disjoncteurs.
- CEI 60050 : Index général du vocabulaire électrotechnique.
- NF C 63-120 : Appareillage à basse tension - 2ème partie : disjoncteurs.

Cahiers Techniques Schneider Electric

- Evolution des disjoncteurs BT avec la norme CEI 947-2,
Cahier Technique n° 150 -
E. BLANC
- Coupure en BT par limitation du courant.
Cahier Technique n° 163 -
P. SCHUELLER
- La sélectivité énergétique en BT.
Cahier Technique n° 167 -
R. MOREL - M. SERPINET

Schneider Electric

Direction Scientifique et Technique,
Service Communication Technique
F-38050 Grenoble cedex 9
Télécopie : (33) 04 76 57 98 60

Réalisation : HeadLines Valence.
Edition : Schneider Electric
Impression : Imprimerie du Pont de Claix - Claix - 1000.
- 100 FF-