

Chapitre 03 : Phénomènes d'interruption du courant électrique

Naissance de l'arc (dans l'air et dans l'huile), principe de coupure de l'arc (dans l'air et dans l'huile), conditions d'extinction de l'arc, tension de rétablissement, différentes techniques de coupure de l'arc.

1 : Définition de l'arc électrique :

L'arc électrique correspond à une décharge lumineuse qui accompagne le passage de l'électricité entre deux conducteurs présentant une différence de potentiel convenable. Ce phénomène fut découvert en 1813 par le physicien et chimiste anglais Davy qui en étudia les effets à travers différents gaz.

2 : Naissance d'un arc électrique à la coupure d'un circuit :

A la coupure d'un circuit d'impédance Z_c , naît généralement un arc électrique entre les contacts de l'organe de manœuvre (interrupteur, disjoncteur). Ce fait marquant, qui intervient principalement sur forte surcharge (ou court-circuit) lorsque la séparation des pôles est dépendante des éléments de contrôle de la surintensité, se produit également sur ouverture non spontanée et -à un degré moindre- sur fermeture.

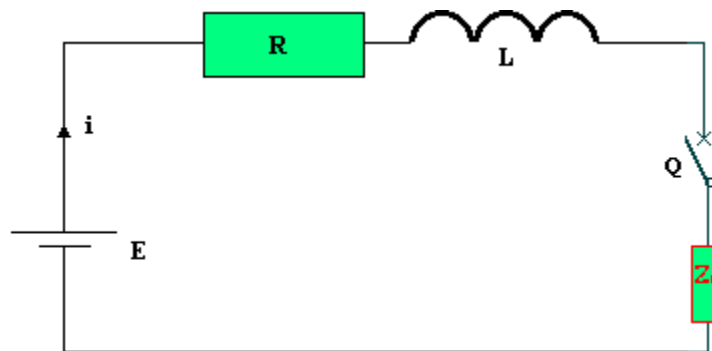
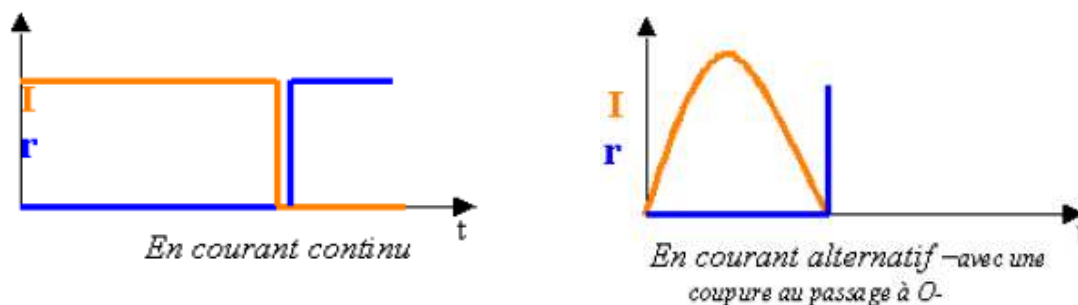


Figure 1 : Explication simplifiée relative à un fonctionnement sur court-circuit ($Z_c=0$).

L'interrupteur « idéal » devrait assurer une coupure quasi instantanée ($t=0$) avec une énergie dissipée ses pôles : $r * i^2 * t = 0$.



En réalité, au moment de la coupure, la résistance r des pôles du disjoncteur Q ci-dessus va passer d'une valeur presque nulle à une valeur très élevée, ce qui conduit aux graphes suivants :



L'énergie de coupure prend la forme :

$$\int ri^2 dt = \int (E - R * i) * i dt + \int Li di$$

Cette relation montre que même avec une coupure infiniment rapide, l'énergie électromagnétique $\frac{1}{2}Li^2$ initialement contenue dans le circuit va devoir cependant être dépensée entre les contacts.

D'autre part, dès les premiers instants de l'écartement des pôles, la densité de courant $j = \frac{i}{S}$ va considérablement augmenter du fait de la diminution de la surface de contacts. Ceci entraîne un échauffement très localisé qui a pour effet d'ioniser le fluide isolant en abaissant sa rigidité diélectrique : un arc apparaît avec ses effets négatifs.

3 : Etude temporelle de la tension d'arc en courant alternatif :

A l'ouverture du disjoncteur sur court-circuit, la loi qui régit l'évolution du courant i_{cc} est :

$$e - U_a = R_{icc} + L \frac{di_{cc}}{dt}$$

U_a est la tension d'arc entre pôles du disjoncteur.

On peut négliger R, ce qui conduit à :

$$e - U_a = L \frac{di_{cc}}{dt}$$

Le dispositif de protection insère ainsi très rapidement une chute de tension U_a qui joue le rôle de f_{cem} s'opposant à la croissance du courant de court-circuit présumé i_{cc} . On obtient en conséquence un « effet limiteur » du courant de court-circuit, effet d'autant plus efficace que U_a est élevée.

4 : Coupure avec l'arc électrique :

La technique de coupure au passage à zéro du courant s'accompagne de surtensions au moment de l'interruption qui surviennent à cause de l'effet capacitif des circuits électriques. La coupure du courant au passage par zéro est pratiquement irréalisable à cause des temps de réponse des systèmes de mesure et de commande, sachant qu'au moment du défaut le courant évolue très rapidement et la réaction au moment du passage à zéro est une opération très délicate. C'est ce qui explique l'existence de l'arc électrique.

5 : Inconvénients, dangers de l'arc électrique :

- ✓ Pas de rupture instantanée du circuit.
- ✓ Dégradation des contacts par micro-fusion (matière "arrachée») et risques de soudure.
- ✓ Contraintes thermiques élevées (température d'arc de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers de degrés) avec risques de brûlure, d'incendie pour le matériel.
- ✓ Onde parasite, rayonnement U-V.

6 : Processus de coupure avec l'arc électrique :

La coupure par l'arc électrique se fait en trois phases:

6-1 : La période d'attente :

C'est la période entre l'ouverture des contacts et le zéro du courant où l'arc électrique est constitué d'une colonne de plasma composée d'ions et d'électrons. Cette colonne est conductrice sous l'effet d'une température élevée due à l'énergie dissipée par l'arc. La tension entre les deux contacts s'appelle la tension d'arc et c'est une composante très importante dans le choix du milieu de coupure, car elle définit la valeur de l'énergie dissipée.

6-2 : La période d'extinction :

Au moment de passage par zéro du courant, l'arc est éteint, le canal des molécules ionisées est cassé, le milieu redevient isolant et le courant est interrompu.

La résistance de l'arc doit augmenter au voisinage du zéro du courant, et dépend de la constante d'ionisation du milieu. Aussi, la puissance de refroidissement de l'appareil doit être supérieure à l'énergie de l'arc dissipée par effet joule.

6-3 : La période Post-Arc :

Pour que la coupure soit réussie, il faut que la vitesse de régénération diélectrique soit plus rapide que l'évolution de la tension transitoire de rétablissement TTR, sinon on assiste à un phénomène de ré-allumage ou réamorçage de l'arc.

La vitesse de croissance de la TTR a un rôle fondamental sur la capacité de coupure d'appareils. La norme impose pour chaque tension nominale, une valeur enveloppe qui correspond aux besoins normalement rencontrés.

Le pouvoir de coupure d'un disjoncteur correspond à la valeur la plus élevée du courant qu'il peut couper à sa tension assignée et à sa TTR assignée. Un disjoncteur devrait être capable de couper tout courant inférieur à son PDC pour toute TTR dont la valeur est inférieure à la TTR assignée. Pour une tension assignée de 24 kV, la valeur maximale de TTR est de l'ordre de 41 kV et peut accroître avec une vitesse de 0.5 kV/ms.

7 : Les milieux de coupure :

Depuis des années, les constructeurs ont cherché, développé, expérimenté et mis en œuvre des appareils de coupure à base de milieux aussi variés que : l'air, l'huile, le SF₆ et enfin le vide. Pour une coupure réussie, le milieu doit avoir les caractéristiques suivantes :

Avoir une conductivité thermique importante pour pouvoir évacuer l'énergie thermique engendrée par l'arc électrique ;

Avoir une vitesse de dés ionisation importante pour éviter des réamorçages du milieu ;

Avoir une résistivité électrique faible lorsque la température est élevée pour minimiser l'énergie dissipée pour l'arc ;

Avoir une résistivité électrique grande lorsque la température est faible pour minimiser le délai de rétablissement de la tension ;

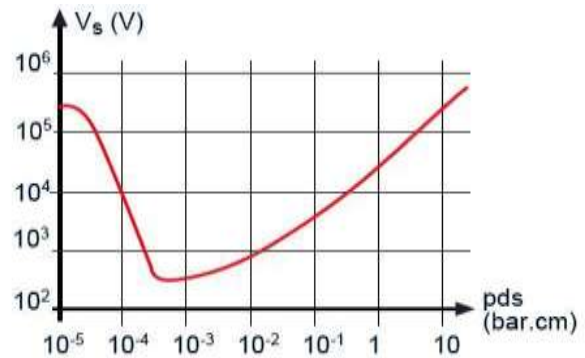


Figure 2 : La courbe de Paschen.

L'espace inter contacts doit offrir une tenue diélectrique suffisante.

La tenue diélectrique du milieu dépend de la distance entre les électrodes et de la pression du milieu. Pour l'air, la courbe de *Paschen* donne l'évolution de la rigidité diélectrique en fonction de la pression du milieu.

Les courbes suivantes donnent l'évolution de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter contacts.

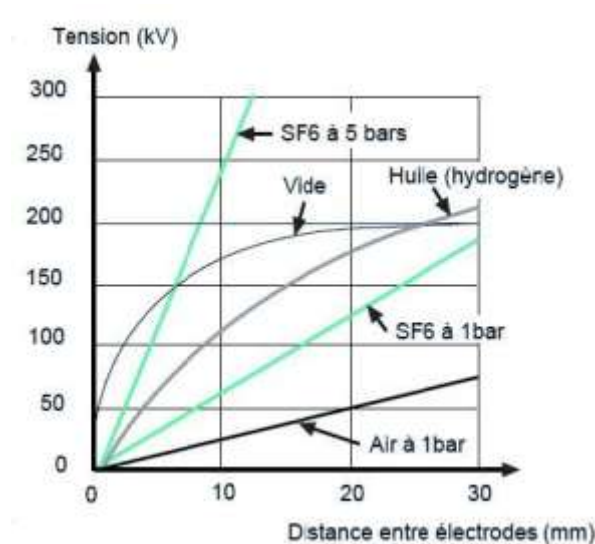


Figure 3 : Rigidité diélectrique en fonction de la distance entre les électrodes.

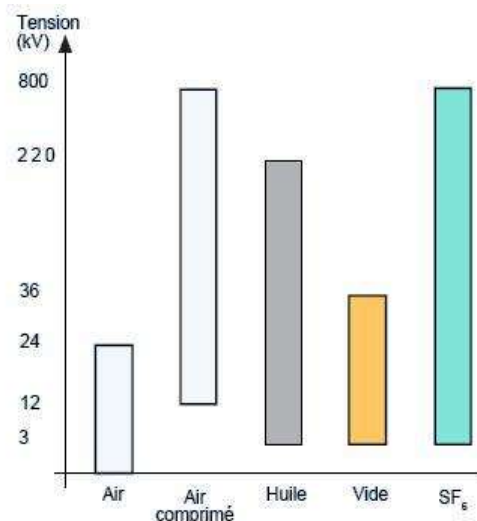


Figure 4 : Domaine d'utilisation des différents milieux de coupure.

Plusieurs milieux de coupure ont été développés à ce jour :

- ✓ La coupure dans l'air (jusqu'à 24 kV), mais aujourd'hui limitée à des utilisations en basse tension.
- ✓ La coupure dans l'huile (jusqu'à 200 kV).
- ✓ La coupure dans le SF6 (jusqu'à quelques centaines de kV).
- ✓ La coupure dans le vide (jusqu'à 36 kV).

8 : Différentes techniques de coupure de l'arc :

8-1 : La coupure dans l'air :

Pour des tensions supérieures à 24 kV, l'air comprimé est utilisé pour améliorer la tenue diélectrique, la vitesse de refroidissement et la constante de temps de désionisation. L'arc est refroidi par des systèmes de soufflage à haute pression.

La coupure n'est pas très utilisée en moyenne tension pour des raisons d'encombrement et de coût. Toutefois la coupure dans l'air reste la solution la plus utilisée en basse tension grâce à sa simplicité et son endurance.

L'air à pression atmosphérique présente une rigidité diélectrique faible et une constante de désionisation élevée (10ms).

La technique utilisée consiste à garder l'arc électrique court pour limiter l'énergie thermique dissipée, et l'allonger par le biais de plaque une fois le courant passe par zéro.

8-2 : La coupure dans l'huile :

Cette technique de coupure consiste à immerger les contacts dans l'huile. Au moment de la coupure, l'huile se décompose et dégage de l'hydrogène et du méthane principalement. Ces gaz forment une bulle qui est soumise à une grande pression pendant la coupure. Au passage du courant par zéro, l'arc s'éteint du fait de la présence de l'hydrogène.

Les disjoncteurs à coupure dans l'huile ont cédé la place à d'autres types de technologie tels que le SF6 et le vide pour les inconvénients suivants :

- ✓ Niveau de sécurité et de maintenance élevé pour contrôler la dégradation des propriétés diélectriques de l'huile et l'usure des contacts.
- ✓ La décomposition de l'huile à chaque coupure est un phénomène irréversible.
- ✓ Risque d'explosion et d'inflammation.

8-3 : La coupure dans le SF6 :

Depuis plusieurs années, les constructeurs de disjoncteurs se sont orientés vers le SF6 (hexafluorure de soufre) comme milieu de coupure, vu ses qualités chimiques et diélectriques.

Sous l'effet de la température, la molécule SF6 se décompose, mais dès que le courant retrouve des valeurs faibles, la molécule se compose à nouveau.

Le SF6 présente une conductivité thermique équivalente à celle de l'air, une rigidité diélectrique élevée, et une constante de désionisation faible.

L'arc électrique est composé d'un plasma de SF6 dissocié, de forme cylindrique. Ce plasma comporte un noyau à température très élevée, entouré d'une gaine de gaz plus froid. La totalité du courant est transportée par le noyau. La gaine extérieure reste isolante.

8-4 : La coupure dans le vide :

D'après la courbe de *Paschen* (Figure.2), le vide présente des performances très intéressantes: à partir d'une pression de 10^{-5} bars, la rigidité diélectrique est de 200 kV pour une distance entre électrodes de seulement 12 mm .

En l'absence de milieu de coupure, l'arc électrique, dans la coupure sous vide, est composé de vapeurs métalliques et d'électrons provenant des matériaux composant les contacts. Cet arc peut être diffus ou concentré.

Les constructeurs de disjoncteurs avec ampoule sous vide ont porté leur recherche au niveau des matériaux des contacts, leur forme et les mécanismes de coupure. La coupure dans le vide est très employée aujourd'hui en moyenne tension, très peu utilisée en basse tension pour des raisons de coût, et reste dans le domaine prospectif pour la haute tension ($> 50 \text{ kV}$). Grâce à sa grande endurance électrique avec des TTR à front de montée très raides, la coupure sous vide est aujourd'hui largement utilisée en MT pour l'alimentation des moteurs, câbles, lignes aériennes, transformateurs, condensateurs, fours à arc...