

# **Chapitre 3 : Phénomènes d'interruption du courant électrique**

Couper le courant est une action indispensable à réaliser sur un circuit électrique, afin d'assurer la sécurité des personnes et des biens en cas de défaut mais aussi pour contrôler la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique.

## I. Définition de l'arc électrique

Découvert au début du 19<sup>e</sup> siècle par un chimiste nommé Humphry Davy, l'arc électrique est un impressionnant phénomène d'étincelle visible qui se crée grâce à l'ionisation d'un milieu isolant comme l'air ou le gaz. En effet, les ions du milieu isolant permettent de créer un canal conducteur qui acheminera la charge présente au début du circuit vers le point final du canal.

Pour l'illustrer avec des phénomènes visibles dans la nature, il est possible de citer la foudre, qui n'est rien d'autre qu'un arc électrique existant entre les nuages et le point de contact. Lors des orages, l'air va ainsi être ionisé et devenir un canal conducteur idéal pour la charge électrique qui descendra des nuages.

Parmi les autres applications de l'arc électrique, il est possible de citer les bobines Tesla ou encore l'arc à souder qui solidifiera les liaisons grâce à la très forte chaleur produite.

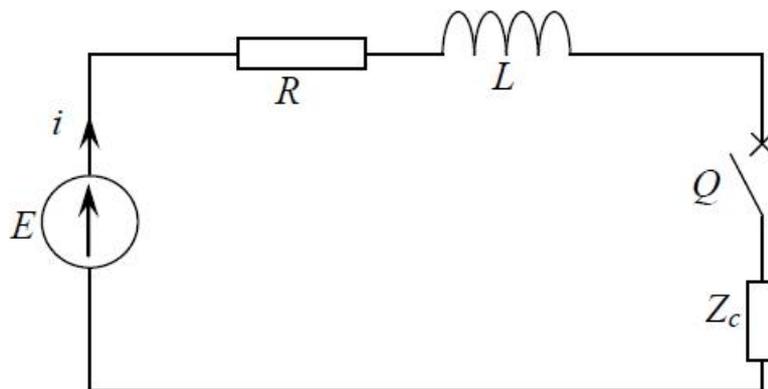
## II. Naissance d'un arc électrique à la coupure d'un circuit

Un appareil de coupure idéal serait un appareil capable d'interrompre le courant instantanément, or aucun appareil mécanique n'est capable de couper le courant sans l'aide de l'arc électrique qui dissipe l'énergie électromagnétique du circuit électrique, limite les surtensions, mais retarde la coupure totale du courant.

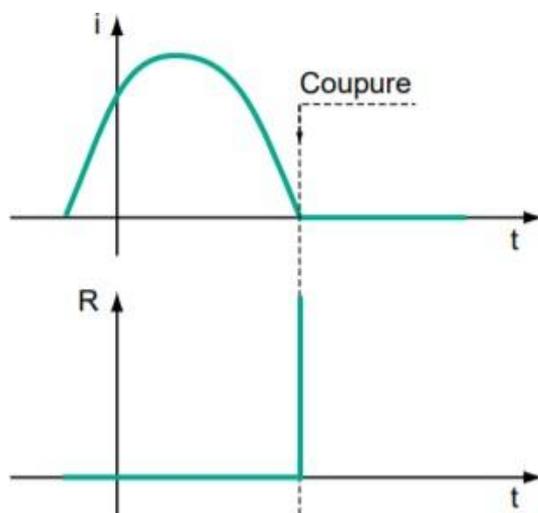
A la coupure d'un circuit d'impédance  $Z_c$ , naît généralement un arc électrique entre les contacts de l'organe de manœuvre (interrupteur, disjoncteur). Ce fait marquant, qui intervient principalement sur forte surcharge (ou court-circuit) lorsque la séparation des pôles est dépendant des éléments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

### 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 entre ses pôles  $r \cdot i^2 \cdot t = 0$  (Figure 5 et 6).

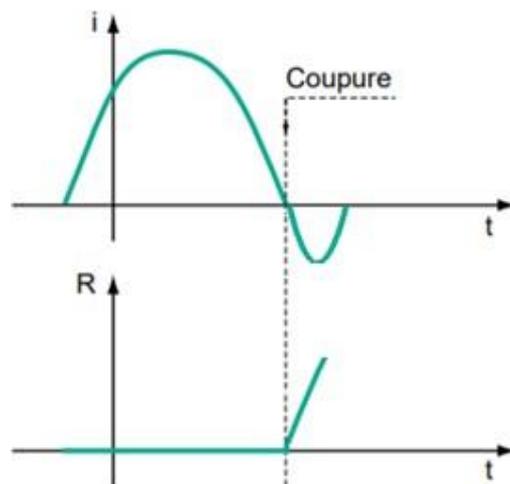


**Figure 5.** Explication simplifiée relative à un fonctionnement sur court-circuit ( $Z_c=0$ ).



**Figure 6.** Coupure réalisée par un interrupteur idéal.

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.



**Figure 7.** Coupure réalisée par un interrupteur réel.

L'énergie de coupure prend la forme :

$$\int r. i^2. dt = \int (E - R. i). i. dt + \int L. i. di$$

Cette relation montre que même avec une coupure infiniment rapide, l'énergie électromagnétique  $\frac{1}{2}L.i^2$  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 ces effets négatifs.

### III. Coupure de l'arc électrique

La coupure des courants électriques est une opération qui s'accompagne avec plusieurs phénomènes et contraintes de fonctionnement :

- Dissiper l'énergie emmagasinée dans les circuits selfiques au moment de la coupure  $\frac{1}{2} . i^2$
- Supporter une surtension  $L. \frac{di}{dt}$  qui survient lors du passage du courant de sa dernière valeur à zéro, cette tension peut conduire au claquage du diélectrique ;
- Supporter la tension transitoire de rétablissement TTR. Cette tension dépend des caractéristiques du réseau et sa vitesse de croissance ( $\frac{dv}{dt}$ ) (de l'ordre de kV/ $\mu$ s).

Pour remédier à ces contraintes, la solution adoptée est de couper le courant au moment de son passage par 0, ainsi l'énergie emmagasinée  $\frac{1}{2} L \cdot i^2$  et la tension  $L \cdot \frac{di}{dt}$  seraient nulles.

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.

#### **IV. Inconvénients et 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 pour les personnes, d'incendie pour le matériel).
- Onde parasite, rayonnement U-V.

#### **V. Processus de coupure avec l'arc électrique**

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

##### **La période d'attente**

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.

##### **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.

### **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

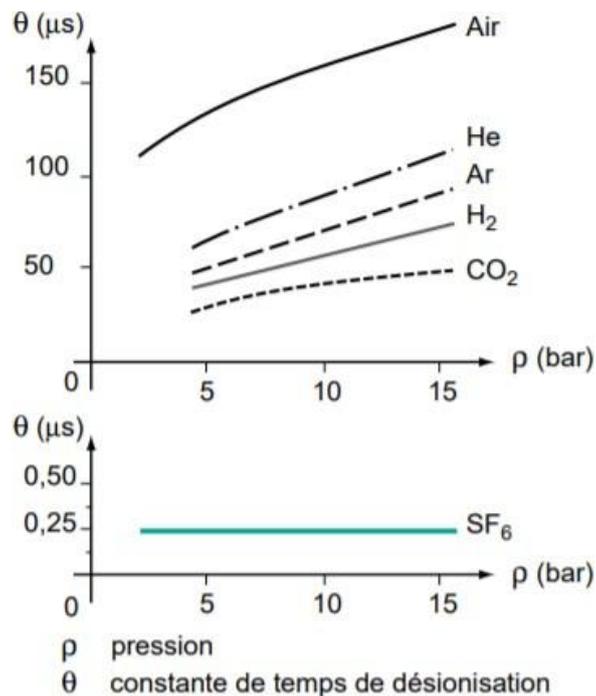
## **VI. Les milieux de coupure**

Pour couper les courants de charge ou de défaut, les constructeurs ont développé et perfectionné les appareils de coupure, disjoncteurs et contacteurs notamment, utilisant divers milieux de coupure : l'air, l'huile, le vide et le SF<sub>6</sub>. Si la coupure dans l'air ou l'huile a tendance à disparaître, il n'en va pas de même de la coupure dans le vide ou le SF<sub>6</sub>, « reine » de la moyenne tension. Pour une coupure réussie, le milieu doit avoir les caractéristiques suivantes :

- La puissance dissipée dans l'arc par effet Joule reste inférieure à la puissance de refroidissement de l'appareil,
- La vitesse de déionisation du milieu est grande, et que l'espace inter contacts à une tenue diélectrique suffisante.

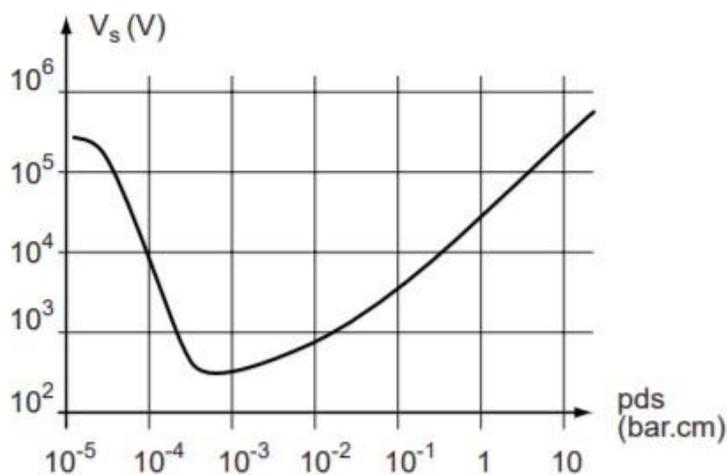
Le choix du milieu de coupure est donc important dans la conception d'un appareil. Ce milieu doit en effet :

- Avoir une conductivité thermique importante en particulier dans la phase d'extinction pour évacuer l'énergie thermique de l'arc,
- Retrouver ses propriétés diélectriques le plus vite possible afin d'éviter un réamorçage intempestif (la figure 8 montre les propriétés exceptionnelles du SF<sub>6</sub> à cet égard),
- À température élevée, être un bon conducteur électrique pour réduire la résistivité de l'arc donc de l'énergie à dissiper,
- À température faible, être un bon isolant électrique pour faciliter le rétablissement de la tension.

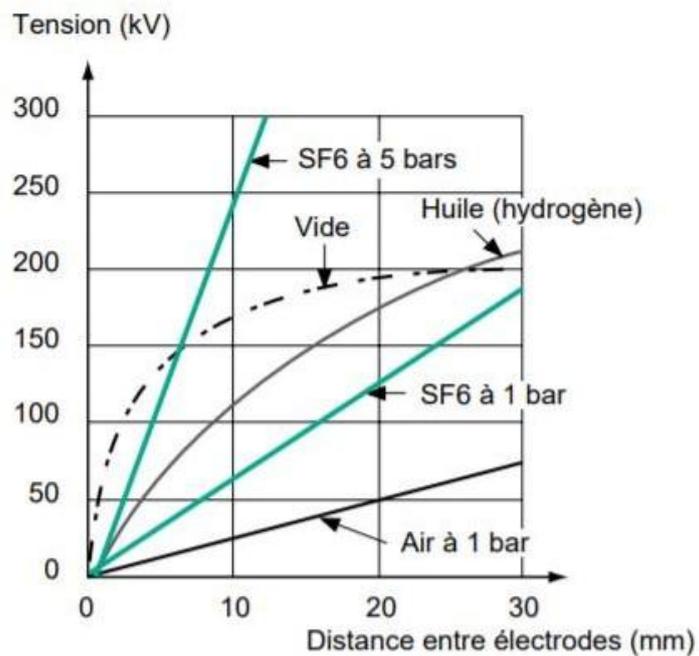


**Figure 8.** Constantes de temps de désionisation en fonction de la pression pour différents gaz.

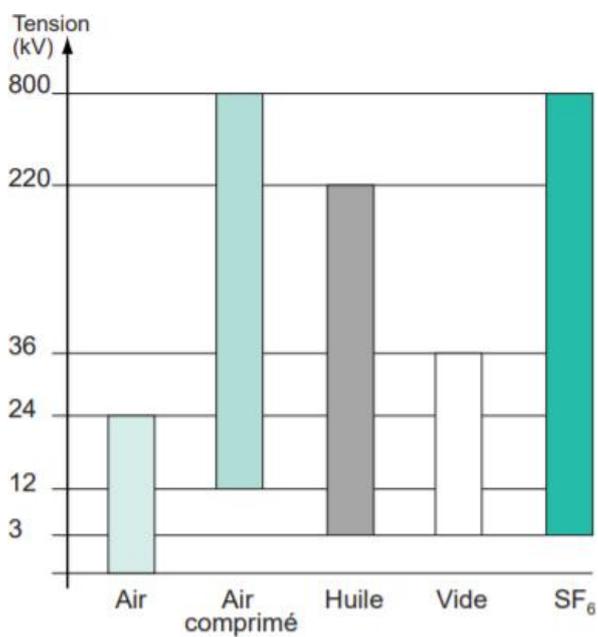
Cette qualité d'isolant se mesure par la tenue diélectrique entre les contacts qui dépend de la pression du gaz et de la distance entre les électrodes. La tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes et de la pression est donnée par la courbe de Paschen (Figure 9 et 10) qui permet de déterminer trois zones selon la pression du gaz.



**Figure 9.** Evolution de la rigidité diélectrique de l'air en fonction de la pression, en champ faiblement hétérogène (courbes de Paschen).



**Figure 10.** Influence de la distance entre les contacts sur la rigidité diélectrique.

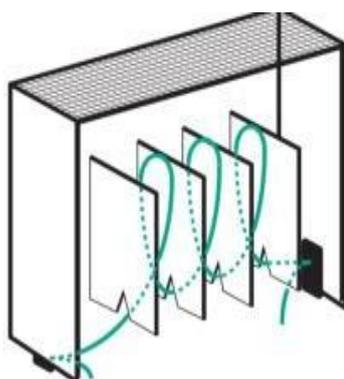


**Figure 11.** Domaine d'utilisation des différents milieux de coupure.

### VI.1. La coupure dans l'air

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.

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 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.

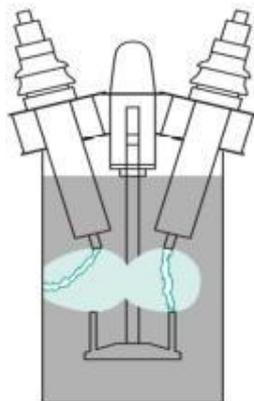


**Figure 12.** Chambre de coupure d'un disjoncteur dans l'air.

### VI.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.



**Figure 13.** Chambre de coupure d'un disjoncteur à coupure dans l'huile.

### VI.3. La coupure dans le vide

D'après la courbe de Paschen (Fig.9), 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 12mm.

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 avoir deux aspects, concentré ou diffus, selon l'intensité du courant qui le traverse.

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 ( $> 50$  kV).

#### **VI.4. La coupure dans le SF6**

Depuis plusieurs années, les constructeurs de disjoncteurs se sont orientés vers le SF6 (hexa fluore 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.