

### 3.1. Introduction

L'appareillage électrique est un élément essentiel qui permet d'obtenir la protection et une exploitation sûre et ininterrompue des installations électriques. Plusieurs principes et technologies sont utilisées par l'appareillage de protection pour assurer l'amorçage d'un arc entre deux contacts : l'air à pression atmosphérique, l'huile, l'air comprimé, l'hexafluorure de soufre et le vide. Le présent chapitre a pour but d'exposer les phénomènes liés à l'interruption du courant ainsi que les différentes techniques de coupure de l'arc électrique.

### 3.2. Définition de l'arc électrique

L'arc électrique peut-être défini comme une décharge électrique visible qui traverse le milieu isolant entre deux conducteurs ayant une différence de potentiel convenable. La découverte des principes régissant ce phénomène est attribuée à l'ingénieur anglais Humphry Davy dans la première décennie du XIXe siècle, alors qu'il tentait d'assembler des centaines de piles voltaïques en une pile électrique géante reliée à deux bâtons de charbon de bois.

### 3.3. Naissance de l'arc

L'arc électrique est entretenu par la présence d'une colonne de gaz ionisé thermiquement (appelée plasma) à travers laquelle circule le courant. Une telle colonne d'arc est présentée par la Figure 3.1. En général, l'air atmosphérique est un mauvais conducteur de courant électrique. La distance entre les électrodes, cependant, est faible et la tension appliquée est élevée, de sorte qu'une décharge dans le gaz, c'est-à-dire la formation d'un arc, peut se produire.

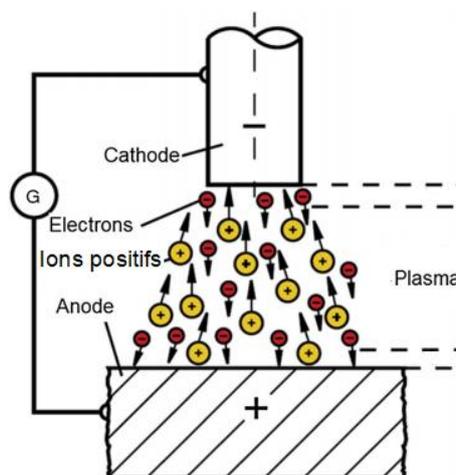


Figure 3.1. Naissance de l'arc dans l'air [19].

Dans l'accumulation entre les électrodes de polarisation opposée, un champ électrique accélère électriquement les particules chargées vers le pôle opposé. Il est important dans ce contexte que les électrons qui sont accélérés en tant que particules chargées négativement presque sans masse soient très forts et donc capables de transporter de l'énergie. Après leur arrivée à l'anode, ils rencontrent des molécules de gaz à haute énergie et se divisent en leurs atomes constitutifs. Ceux-ci peuvent être ré-ionisés. Les ions positifs se déplacent vers la cathode et les ions chargés négativement sont éliminés des électrons de la couche électronique. Sur leur chemin vers l'anode, les électrons peuvent avoir un impact sur les processus pour ioniser à nouveau les molécules de gaz, de sorte que le nombre de porteurs de charge augmente de manière exponentielle. Comme le montre la Figure 3.1, dans l'arc ainsi formé, les charges sont transportées dans les deux sens. Cette opération est importante pour créer l'échauffement du gaz qui devient conducteur et qui forme alors l'arc électrique [19].

### 3.4. Tension d'arc

Comme le montre la Figure 3.2, la tension de l'arc électrique  $U_{arc}$  se divise en 3 parties. On distingue les chutes de tension aux bornes (anode et cathode) qui dépendent essentiellement des matériaux les composant. La partie médiane dépend elle de la longueur de l'arc.

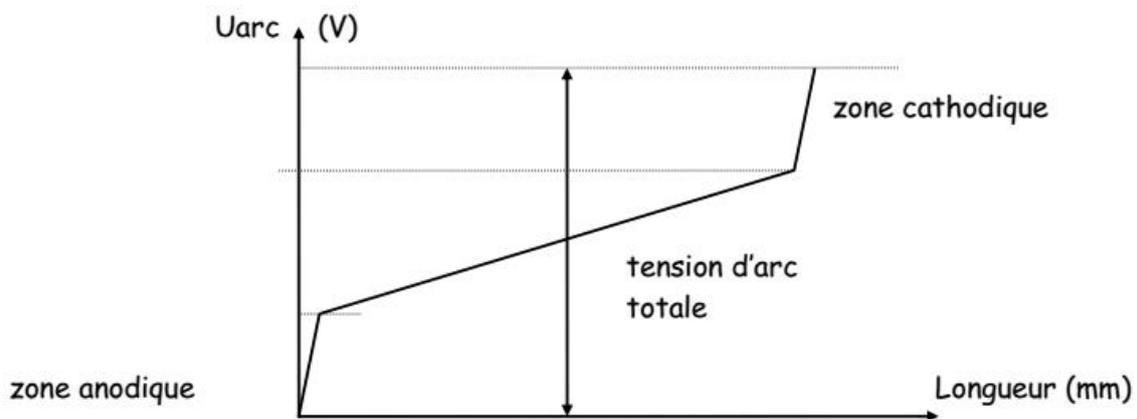


Figure 3.2. Les trois zones caractérisant la tension de l'arc électrique [20].

### 3.5. Principe de coupure de l'arc

Pour pouvoir interrompre un courant électrique, il suffit que la résistance de l'appareil de coupure, initialement égale à zéro, augmente et passe à l'infinie. Lorsque cette condition est remplie, le dispositif devient isolant. En théorie, pour interrompre instantanément un courant à

l'aide d'un appareil de coupure idéal, il faudra passer directement de l'état conducteur à l'état isolant. Dans ce cas, l'appareil devrait être capable [21] :

- D'absorber toute l'énergie électromagnétique accumulée dans le circuit avant la coupure, soit, en cas de court-circuit,  $\frac{1}{2} L i^2$  du fait de la nature inductive des réseaux électriques.
- De supporter la surtension  $L \frac{di}{dt}$  qui apparaît à ses bornes.

La coupure du courant d'une façon idéale est pratiquement irréalisable à cause des temps de réponse des dispositifs de protection. Pratiquement, les mécanismes des appareils de coupure doivent assurer une ouverture très rapide des contacts afin de pouvoir maintenir l'arc suffisamment court. Pour parvenir à cette fin, il faut réduire autant que possible la tension d'arc  $U_{arc}$  pour limiter l'énergie dépensée dans l'arc. Pour un courant alternatif, il faut aussi profiter de l'annulation du courant à chaque demi-période pour régénérer les qualités diélectriques de l'espace entre contacts et pour bloquer le réallumage de l'arc à la demi-période suivante [22].

### 3.6. Conditions d'extinction de l'arc

Pour assurer l'extinction de l'arc il faut que le courant devienne et reste nul et que le milieu jusque-là ionisé se régénère diélectriquement pour « résister » à la tension réseau [23]. Il faut donc :

- Refroidir, dé-ioniser et régénérer le diélectrique chaud par un diélectrique froid ;
- Augmenter la longueur de l'arc en assurant un écartement des contacts ;
- Augmenter la vitesse de coupure en utilisant des moyens tels que le ressort moteur, l'air comprimé et l'électro-aimant.

### 3.7. Tension transitoire de rétablissement

Juste après l'interruption du courant, la tension aux bornes du dispositif de coupure rejoint la tension du réseau. Comme indiqué sur la Figure 3.3, un régime transitoire s'établit alors assurant le raccordement de la tension à celle du réseau. Cette tension est appelée tension transitoire de rétablissement (TTR) [24]. C'est un paramètre qui influe fortement sur la réussite d'une coupure de courant, car l'appareillage électrique doit pouvoir supporter cette augmentation en tension moins d'une micro seconde après la transition conducteur-isolant.

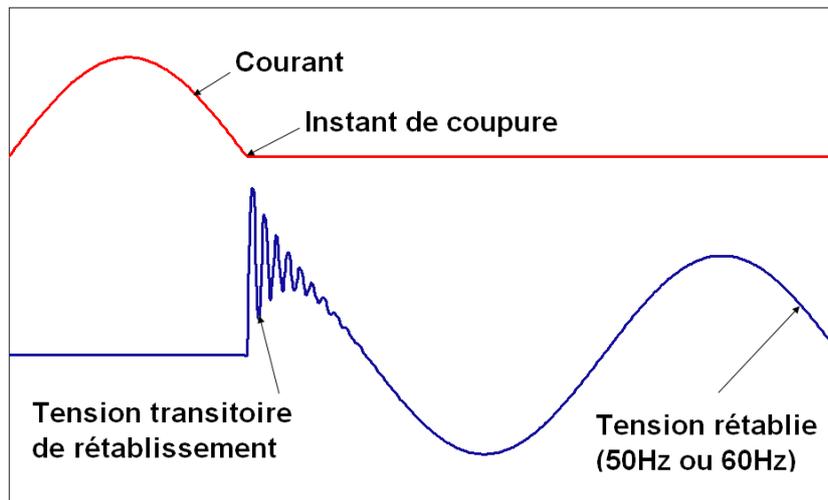


Figure 3.3. Courant, tension transitoire de rétablissement et tension rétablie [25].

### 3.8. Différentes techniques de coupure de l'arc

Pour couper le courant d'arc, les constructeurs ont développé et perfectionné les appareils de coupure, utilisant divers milieux de coupure : l'air, l'huile, le vide et le SF<sub>6</sub>. La Figure 3.4 indique les plages de tension où chacune de ces techniques est aujourd'hui utilisée.

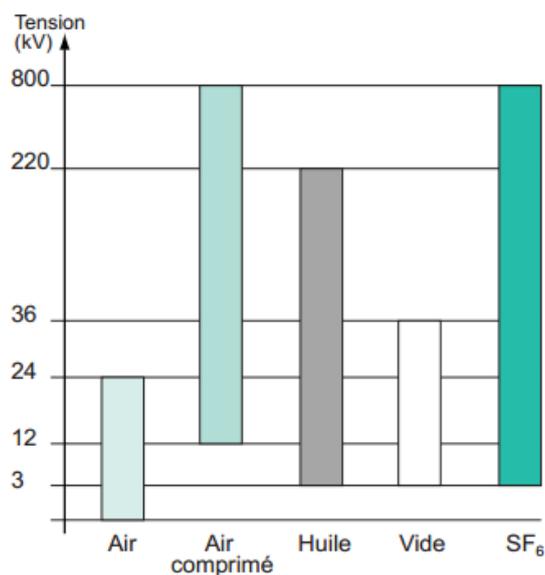
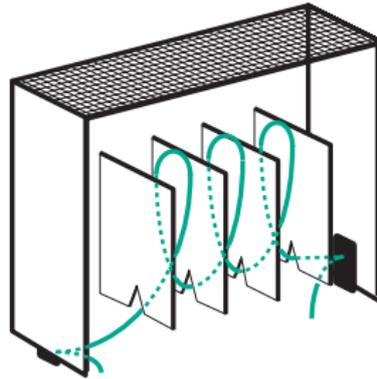


Figure 3.4. Types d'appareils de coupure utilisés selon les tensions d'utilisation [21].

#### 3.8.1. La coupure dans l'air

Les appareils utilisant la coupure dans l'air à la pression atmosphérique ont été les premiers employés (disjoncteur magnétique). L'air à pression atmosphérique, malgré sa rigidité

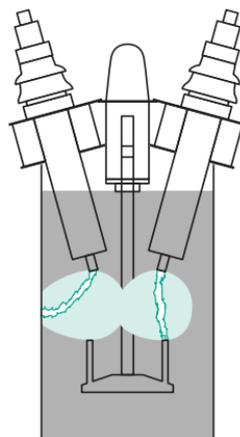
diélectrique relativement faible et sa constante de temps de désionisation élevée, peut être utilisé pour la coupure jusqu'à des tensions voisines de 24 kV. Pour cela il faut disposer d'une puissance de refroidissement suffisante pour éviter l'emballement thermique. Comme le montre la Figure 3.5, le principe consiste à créer une chambre de coupure pour chaque pôle d'appareil. Il s'agit d'un volume situé au voisinage de l'espace intercontacts et divisé par des plaques réfractaires en céramique à grande capacité d'accumulation d'énergie thermique entre lesquelles l'arc s'étire.



**Figure. 3.5.** Chambre de coupure d'un disjoncteur à coupure dans l'air [21].

### 3.8.2. La coupure dans l'huile

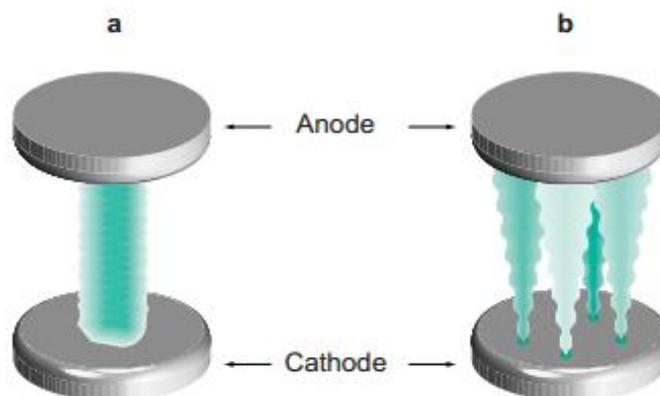
Les disjoncteurs à huile sont utilisés principalement pour les tensions de 3 à 220 kV. Le principe consiste à immerger les contacts dans une huile diélectrique. Lors de la séparation, l'arc provoque la décomposition de l'huile qui libère de l'hydrogène, de l'éthylène, du méthane et du carbone libre. Comme le montre la Figure 3.6, ces gaz forment une bulle qui, par inertie de la masse d'huile, se trouve soumise pendant la coupure à une énorme pression dynamique. Quand le courant passe par zéro, le gaz se détend et souffle l'arc qui s'éteint.



**Figure. 3.6.** Coupure dans un disjoncteur à huile [21].

### 3.8.3. La coupure dans le vide

En principe le vide est un milieu diélectrique idéal : il n'y a pas de matière donc pas de conduction électrique. Cependant, le vide n'est jamais parfait et de toute façon a une limite de tenue diélectrique. Malgré tout, le « vide » réel a des performances spectaculaires : à la pression de  $10^{-6}$  bar, la rigidité diélectrique en champ homogène peut atteindre une tension crête de 200 kV pour une distance inter-électrodes de 12 mm. La coupure dans le vide est assez particulière à cause des caractéristiques très spécifiques de l'arc dans le vide : la colonne d'arc est composée de vapeurs métalliques et d'électrons provenant des électrodes à la différence des autres techniques de coupure pour lesquelles cette colonne est principalement composée du gaz intercontacts ionisé par collisions. Comme le montre la Figure 3.7, l'arc dans le vide peut se présenter sous deux formes principales : le mode diffus et le mode concentré. Pour des valeurs élevées du courant, l'arc est unique et concentré. Pour des valeurs de courant inférieures à quelques milliers d'ampères, cet arc se trouve sous forme diffuse. Il est composé de plusieurs arcs séparés les uns des autres, de forme conique dont le sommet est à la cathode [25]. En plus, les tensions d'arc dans le vide sont généralement nettement inférieures à celles des arcs développés dans d'autres milieux, ce qui constitue un avantage au regard de l'énergie dissipée dans l'arc [26].



**Figure. 3.7.** Coupure dans un disjoncteur à vide : (a) arc concentré ; (b) arc diffus [21].

### 3.8.4. La coupure dans le SF6

L'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>), est un gaz apprécié pour ses excellentes propriétés d'isolation et une exceptionnelle stabilité thermique et chimique. C'est un gaz non polluant, incolore, inodore, non inflammable et non toxique à l'état pur. Il est insoluble dans l'eau. Il est chimiquement inerte : sa molécule a toutes ses liaisons chimiques saturées et une énergie de

dissociation élevée ainsi qu'une grande capacité d'évacuation de la chaleur produite par l'arc. Pendant la période d'arc, sous l'effet de la température, le SF6 se décompose. Cette décomposition est quasi réversible : quand le courant diminue la température diminue, les ions et les électrons se recombinent alors pour reconstituer la molécule de SF6. Dans les appareils au SF6, les contacts sont situés à l'intérieur d'une enceinte fermée remplie de gaz dont la pression varie selon la tension et les paramètres de conception. Ces enveloppes sont généralement scellées à vie car le taux de fuite est maîtrisé à un niveau très bas.

### 3.9. Évaluation formative

#### Exercice : Définition de l'arc électrique

L'arc électrique peut-être défini comme une décharge électrique :

- Invisible.
- Lumineuse.
- Qui traverse un milieu isolant.

#### Exercice : Formation de l'arc électrique

La formation de l'arc peut se produire lorsque la tension appliquée est faible et la distance entre les électrodes est élevée.

- Faux.
- Faux.

#### Exercice : Décharge dans le gaz

L'air atmosphérique est un mauvais conducteur de courant électrique.

- Faux.
- Faux.

#### Exercice : Tension de l'arc

La tension de l'arc électrique se divise en :

- Deux parties.
- Trois parties.
- Quatre parties.

#### Exercice : Coupure idéale

La coupure du courant d'une façon idéale :

- Consiste à interrompre instantanément le courant électrique.
- Est pratiquement irréalisable.
- Consiste à diminuer la résistance de l'appareil de coupure.

#### Exercice : Coupure en courant alternatif

Pour un courant alternatif, il faut profiter de l'annulation du courant à chaque demi-période pour :

- Régénérer les qualités diélectriques de l'espace entre contacts.
- Conserver les qualités conductrices des contacts.
- Autoriser le réallumage de l'arc à la demi-période suivante.

#### Exercice : Conditions d'extinction de l'arc

Pour assurer l'extinction de l'arc il faut que :

- Le courant devient et reste nul.
- La tension devient et reste nulle.
- Le milieu isolant se régénère diélectriquement.

**Exercice : Tension transitoire de rétablissement**

Juste avant l'interruption du courant, la tension aux bornes du dispositif de coupure rejoint la tension du réseau.

- Vrai.
- Faux.

**Exercice : Coupure dans l'air**

Les appareils utilisant la coupure dans l'air sont généralement utilisés pour des tensions allant jusqu'à :

- 24 kV.
- 36 kV.
- 220 kV.
- 800 kV.

**Exercice : Coupure dans l'huile**

La coupure dans un disjoncteur à huile :

- Est utilisée principalement pour les tensions de 3 à 220 kV.
- Consiste à immerger les contacts dans une huile conductrice d'électricité.
- Donne lieu à la formation d'une bulle de gaz.