

III. Phénomènes d'interruption du courant électrique

III.1. Introduction : pour réaliser la coupure du courant dans un circuit électrique continu ou alternatif, il suffit d'ouvrir un appareil tels que : interrupteur, contacteur, disjoncteur, etc..., la résistance de l'appareil dans le circuit qui était nulle passe à la valeur maximale (infini) lors de la séparation brutale de deux contacts de l'appareillage ce qui provoque un arc électrique résulte de l'ionisation de l'air ou du diélectrique situé entre les deux contacts.

III. 2. Définition : Un arc électrique correspond à une décharge électrique lumineuse transportant un fort courant sous une faible différence de potentiel, ce phénomène fut découvert en 1813 par le physicien et chimiste anglais DAVY. L'arc électrique est un milieu conducteur, il possède une très haute température qui peut atteindre 5000°C à 8000°C suivant la nature des électrodes et le milieu dans lequel il se propage, l'apparition de ce dernier est facilitée si le circuit parcouru par un courant I est inductif, car une surtension proportionnelle au facteur LdI/dt est générée au moment de la coupure, en l'absence de précautions particulières, l'arc peut entraîner la soudure des électrodes.

III. 3. Naissance d'un arc électrique:

III.3.1 Dans l'air : La résistance de passage (résistance de contact) est donnée par la relation suivante : $R = \rho L / \Delta s$; ρ résistivité du milieu, L la distance entre les contacts et Δs la surface de contacte.

Au début du déplacement du contact mobile C2 (ouverture du circuit en charge), la distance L entre les contacts augmente et la surface Δs diminue puis s'annule ; donc R augment, ce qui entraîne un échauffement local des électrodes avec fusion de métal, le gradient de potentiel entre les contacts est très élevé ; un jet d'électrons ionise l'espace inter – électrodes. C'est dans cette colonne d'électrons et de gaz ionisés que l'arc va se propager (fig.1).

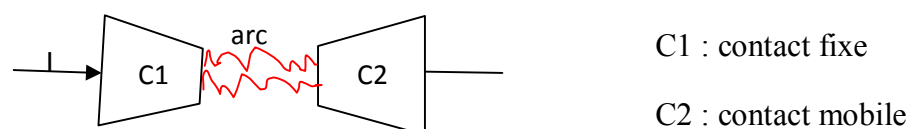


Fig.1 Naissance d'un arc dans l'air.

Donc l'apparition de l'arc dans l'air se manifeste comme étant la continuité du courant dans une colonne gazeuse plus ou moins ionisée et mobile.

III.3.2 Dans l'huile :

Le processus initial est identique : augmentation de L , diminution de Δs , d'où augmentation de R et de l'échauffement ; celui-ci provoque une fusion locale sur les électrodes et la vaporisation d'une petite quantité d'huile, ce qui forme une bulle gazeuse contenant de l'hydrogène, de l'acétylène, du méthane, etc. C'est à l'intérieur de cette bulle de gaz très chauds, parcourue par un jet d'électrons, que l'arc se propage (fig.2).

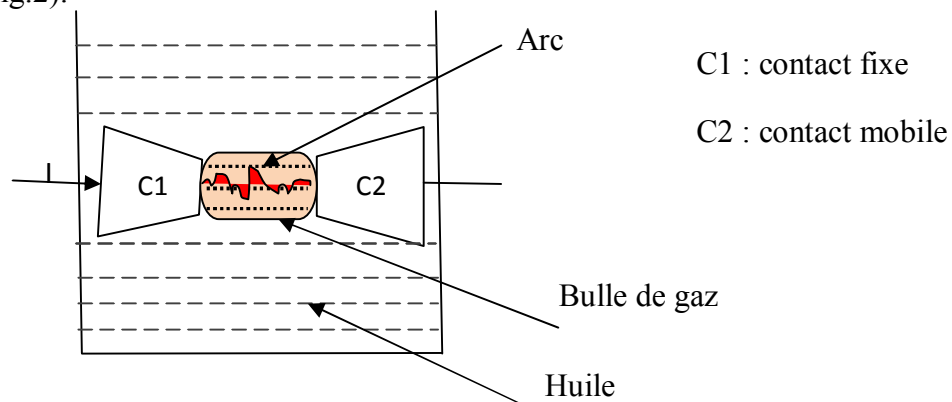


Fig.2 Naissance d'un arc dans l'huile.

III.4. Propriétés de l'arc :

III.4.1 Tension d'arc :

Quelque soit la nature du courant (continu ou alternatif), à tout instant, la différence de potentiel entre les deux électrodes en mouvement (ouverture complète ou même un faible écartement des électrodes) favorise l'établissement de l'arc avec une tension d'établissement U_{arc} (fig.3).

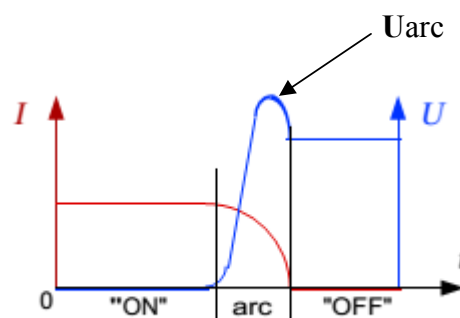


Fig.3 Tension d'établissement de l'arc

La tension d'établissement de l'arc électrique est définie comme suit :

$$U_a = \alpha + \beta I = \alpha + \beta.v.t$$

U_a : Tension de l'arc

α : Chute de tension à l'électrode négative

β : Chute de tension par unité de longueur d'arc

I : Longueur de l'arc

v : Vitesse d'allongement de l'arc

t : Temps de l'arc (compté depuis le début de la séparation des contacts)

III.4.2 Energie de l'arc :

L'énergie dissipée dans l'arc est :

$$W = \int_0^t I. \alpha. dt + \int_0^t I. \beta. v. t. dt = W_1 + W_2$$

W_1 : Énergie appliquée directement au contact négatif (à la racine de l'arc) ; une partie sera acheminée dans le métal de l'électrode sous forme de chaleur et dissipée plus loin ; l'autre partie servira à volatiliser des particules de métal ; la dégradation et la fusion des contacts est donc inévitable.

W_2 : Énergie développée dans la colonne d'arc sous forme d'un rayonnement lumineux intense et à température élevée.

III.4.3 Section de l'arc :

La section de l'arc ne dépend que de l'intensité du courant I à couper, elle est proportionnelle à cette intensité.

III.4.4 Longueur d'arc :

La longueur maximale d'un arc est proportionnelle à la tension U appliquée aux électrodes ; plus la tension est élevée, plus la longueur de l'arc est importante. En haute tension, l'arc peut atteindre plusieurs mètres de longueurs.

III.4.5 Mobilité de l'arc :

L'arc étant formé d'une colonne d'électrons dans l'air ou dans un gaz, il est très mobile, donc très sensible aux courants d'air, aux champs électriques et magnétiques.

III.4.6 Volume de l'arc :

Le volume de l'arc est proportionnel au produit $U.I$ donc à la puissance dépensée par l'arc.

III.4.7 Milieux de coupure de l'arc :

Bienfait aux progrès importants réalisés dans le domaine de la modélisation d'arc et de la simulation des écoulements gazeux que l'énergie d'arc a pu être asservie et utilisée efficacement pour définir des chambres de coupure à hautes performances. Historiquement, on peut résumer les milieux de coupure suivants :

- Air
- Huile
- Air comprimé
- Sf6
- Vide

Depuis des années, les constructeurs ont cherché, développé, expérimenté et mis en œuvre des appareils de coupure à base de milieux. 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 amorçages 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.
- 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 (fig.4) donne l'évolution de la rigidité diélectrique en fonction de la pression du milieu.

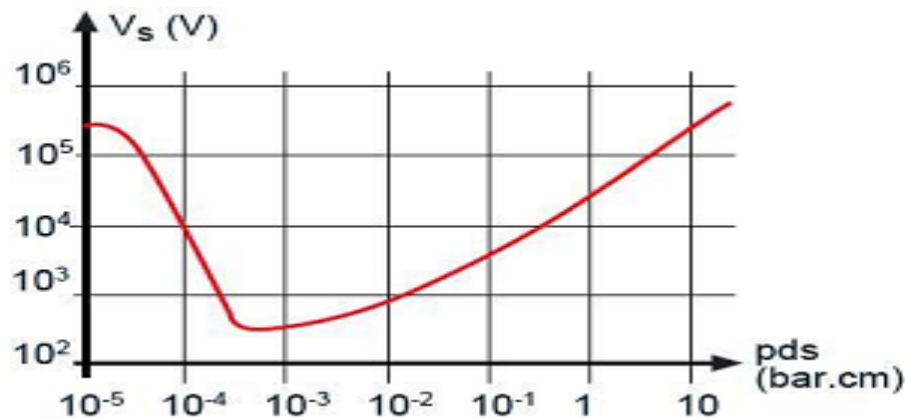


Fig.4 La courbe de PASCHEN

Les courbes suivantes (fig.5) et (fig.6) exposent l'évolution de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter – contacts.

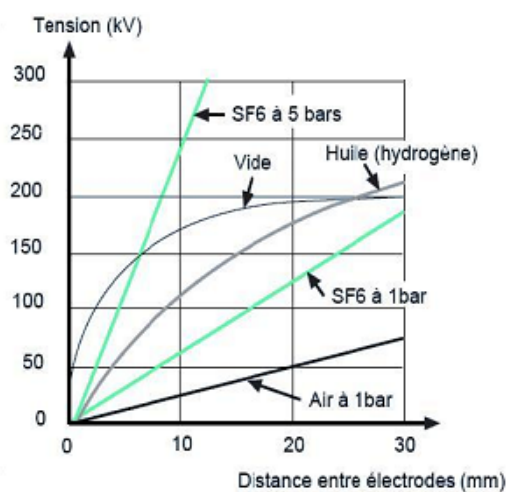


Fig.5 Rigidité diélectrique en fonction de la distance entre les électrodes

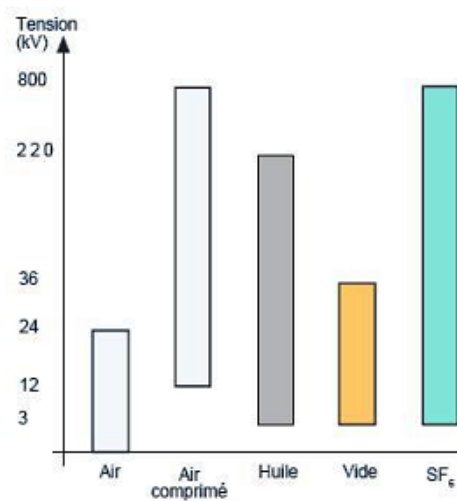


Fig.6 Domaine d'utilisation des différents milieux de coupure

Plusieurs milieux de coupure ont été développés à ce jour :

1. La coupure dans l'air jusqu'à 24 KV, mais aujourd'hui limitée à des utilisateurs en basse tension.
2. La coupure dans l'huile jusqu'à 200 KV.
3. La coupure dans le SF6 jusqu'à quelques centaines de KV.
4. La coupure dans le vide jusqu'à 36 KV.

III.4.8 Danger de l'arc :

L'arc est très dangereux par sa mobilité, d'où risque d'amorçage phase-terre ou phase-phase et risque d'électrocution pour le personnel ; il est dangereux également par son rayonnement lumineux intense, d'où risque d'aveuglement ; il est dangereux enfin par ses effets nuisibles sur les contacts, sur les pièces conductrices et isolantes voisines par suite de haute température.

Remarque :

- L'intensité à couper est grande, surtout en courant continu et sur des récepteurs fortement inductifs s'il s'agit d'un circuit à courant alternatif.
- Le courant continu plus difficile à couper que le courant alternatif qui passe par zéro cent fois par seconde.

III.5 Principe de coupure de l'arc :

En séparant les contacts d'un appareil de coupure en charge, on provoque un arc électrique ; l'arc ne s'éteint pas tout seul et la coupure du courant n'est effective qu'après l'extinction de ce dernier. Il faut donc le couper rapidement pour éviter ses effets destructeurs, mais il ne s'éteint que si la tension du réseau est insuffisante pour l'entretenir entre les contacts, c'est-à-dire : $U_{\text{réseau}} < U_{\text{arc}}$; on peut donc :

- Soit augmenter U_{arc} , or $U_{\text{arc}} = \alpha + \beta.l$; on pourra donc agir sur α , β et l .
- Soit diminuer indirectement $U_{\text{réseau}}$

Le procédé qui consiste à augmenter la tension d'arc jusqu'à avoir $U_{\text{arc}} > U_{\text{réseau}}$ s'appelle : « coupure par extinction », il est utilisé en courant continu et en courant alternatif BT et MT (36 KV).

En courant alternatif MT, surtout HT et THT, on utilise le principe de coupure dit : « coupure par blocage » à tension d'arc réduite qui consiste à supprimer l'ionisation entre contacts au moment où le courant alternatif passe par zéro.

III.6 Condition d'extinction de l'arc :

En courant alternatif à 50 HZ, l'arc s'éteint de lui-même cent fois par seconde et renaît à la même cadence ; il suffit donc d'empêcher son ré-allumage ; deux procédés peuvent être utilisés :

- Dans un premier procédé, on attend que l'arc s'éteigne, à cet instant on interpose un verrou diélectrique entre contacts (coupure par blocage) à tension d'arc réduite.
- Dans un deuxième procédé, on oblige l'arc à s'éteindre prématurément, comme en courant continu ; cela se produit lorsque $U_{\text{arc}} > U_{\text{réseau}}$ (coupure par extinction), tension d'arc élevée.

III.6.1 Coupure de l'arc par blocage :

Elle consiste donc à empêcher le ré allumage de l'arc, après extinction naturelle, en dé ionisant le milieu entre contacts, c'est-à-dire en remplaçant les gaz ionisés par des gaz non ionisés, afin d'augmenter la rigidité diélectrique entre contacts.

III.6.2 Coupure de l'arc par extinction :

- Action sur le terme α (fragmentation)

Il faut multiplier le nombre de chutes cathodiques en disposant et fractionnant l'arc en plusieurs arcs en série.

- Action sur le terme β (dé ionisation)

Cela consiste à dé ioniser le milieu entre contacts, il s'agit d'augmenter le gradient de potentiel ; il faut donc remplacer l'air ou les gaz ionisés (chauds) par l'air ou les gaz non ionisé (frais).

- Action sur le terme I (étirement)

Cela consiste à allonger au maximum l'arc, il faut l'imposer un chemin sinueux pour obtenir un grand allongement avec un faible encombrement.

III.7 Tension de rétablissement de l'arc (U_R) :

C'est la tension U_R qui apparait entre les contacts au moment précis de l'extinction de l'arc :

- Mise hors tension d'une installation à vide : des surtensions instantanées dangereuses peuvent se produire (ligne, transformateur).
- Mise hors service.
- Déclenchement sur court-circuit.

III.8 Différentes techniques de coupure de l'arc :

III.8.1 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 dé ionisation. 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. Néanmoins, 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 dé ionisation élevée.

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.

III.8.2 Coupure dans l'huile :

Elle consiste à immerger les électrodes (contacts) dans l'huile. Au moment de séparation des contacts, l'huile se décompose et dégage H_2 et $C_2 H_2$ principalement dans une bulle de gaz. Cette dernière 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 H_2 .

Les disjoncteurs à coupure dans l'huile ont donné la place à d'autres types de technologie tels que le SF_6 et le vide pour des raisons et les inconvénients suivants :

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

III.8.3 Coupure dans le SF_6 :

Vu ses propriétés chimiques et diélectriques, depuis plusieurs années, les constructeurs de disjoncteurs se sont orientés vers le SF_6 comme milieu de coupure. Sous l'effet de la température, la molécule SF_6 se décompose, mais dès que le courant retrouve des valeurs faibles, la molécule se compose à nouveau. Le SF_6 présente une conductivité thermique équivalente à celle de l'air, une rigidité diélectrique élevée et une constante de dés ionisation faible. L'arc électrique est composé d'un plasma de SF_6 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 et la gaine extérieure reste isolante.

III.8.4 Coupure dans le vide :

Dans la coupure sous vide, l'arc électrique est composé de vapeurs métalliques et d'électrons résultant des matériaux composant les contacts. Cet arc peut être délayé

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 **MT** grâce à sa grande endurance électrique, très peu utilisée en **BT** pour des raisons de coût et reste dans le domaine éventuel pour la **HT**.

III.9 Les avantages et les inconvénients de l'arc :

III.9.1 Les avantages :

- L'avantage principal de l'arc électrique c'est le soudage à l'arc.

III.9.2 Les inconvénients:

- La rupture du circuit n'est pas effectuée tant que subsiste l'arc.
- Les électrodes sont détruites par fusion.
- L'arc présente un risque grave d'incendie ou d'explosion.
- La température élevée des gaz impose des contraintes thermiques importantes tantôt conductrices qu'aux isolants, réduisant leurs durées de vie.
- Il y a production d'un rayonnement électromagnétique parasite.