

19.2. L'appareillage HTA

19.2.1. Introduction

L'**appareillage électrique à haute tension** est l'ensemble des appareils électriques qui permettent la mise sous ou hors tension de portions d'un réseau électrique à haute tension. elle concerne les appareils de tension assignée supérieure à 1 000 V, en courant alternatif, et supérieure à 1 500 V dans le cas de courants continus.

L'appareillage électrique est un élément essentiel qui permet d'obtenir la protection et une exploitation sûre et sans interruption d'un réseau à haute tension. Ce type de matériel est très important dans la mesure où de multiples activités nécessitent de disposer d'une alimentation en électricité qui soit permanente et de qualité.

19.2.2. Classifications

L'appareillage électrique à haute tension peut être classé en plusieurs catégories selon sa fonction, sa tension, sa destination, son installation et son type d'isolement.

19.2.2.1. Classification par fonction

On classe généralement les constituants de l'appareillage Haute Tension en raison de leur fonction dans le circuit électrique :

- Le sectionneur : il isole,
- Le sectionneur de terre : il met à la terre et en court-circuit
- L'interrupteur : il manœuvre, établit et interrompt les courants de service
- L'interrupteur sectionneur : il isole, établit et interrompt les courants de service
- Le contacteur : il établit et interrompt les courants de service à partir d'un ordre de commande électrique, n'assure pas la fonction d'isolement
- Le contacteur débrochable : il établit et interrompt les courants de service à partir d'un ordre de commande électrique, mais en plus, il isole s'il est débroché
- Le coupe circuit à fusible : il protège des surcharges et interrompt les courants de défaut jusqu'à lcc du réseau (1 fois)
- Le disjoncteur fixe : il protège établit et interrompt les courants de défaut jusqu'à lcc du réseau
- Le disjoncteur débrochable : il protège établit et interrompt les courants de défaut jusqu'à lcc du réseau mais en plus, il isole s'il est débroché

19.2.3. Sectionneurs

19.2.3.1. Symbole

Il est d'usage en distribution électrique d'utiliser préférentiellement une représentation unifilaire des circuits électriques.

La figure ci-dessous illustrent la représentation schématique unifilaire d'un sectionneur.



Fig. 19.2-1

19.2.3.2. Description

Les sectionneurs sont des organes de sécurité utilisés pour ouvrir ou fermer un circuit lorsqu'ils ne sont pas parcourus par un courant. Ils sont utilisés pour isoler un ensemble de circuits, un appareil, une machine, une section de ligne aérienne ou de câble, afin de permettre au personnel d'exploitation d'y accéder sans danger.

L'ouverture des sectionneurs de ligne ou de jeu de barres (les conducteurs qui permettent de relier l'arrivée d'énergie d'un poste à haute tension vers les différents organes internes) est nécessaire pour assurer la sécurité mais n'est pas suffisante, il faut en outre effectuer des mises à la terre en amont et en aval de l'appareil sur lequel on souhaite intervenir. On distingue donc les sectionneurs, proprement dits dont la fonction est d'isoler, des sectionneurs de mise à la terre (ou MALT ou sectionneur de terre) qui ensemble contribuent à la mise en sécurité d'une portion de réseau électrique. A noter, que le sectionneur de mise à la terre doit être capable de fermer sur un court-circuit.

19.2.3.3. Caractéristiques

Les caractéristiques principales d'un sectionneur sont :

- | | |
|-----------------------------|---|
| • tension assignée | Un en kV (tension nominale) |
| • intensité assignée | In en A (courant nominal) |
| • surintensité admissible | I _{eff} en kA/ sec (tenue thermique) |
| • tenue électrodynamique | I _{crête} en kA tenue aux efforts mécaniques |
| • tenue 50 Hz 1 min | U en kV (fréquence industrielle) |
| • tenue au choc de foudre | U en kV (surtension atmosphérique) |
| • pouvoir de coupure | 0 |
| • pouvoir de fermeture | 0 * |
| • sécurité par condamnation | serrure (matériel) ou cadenas (personnel) |
- } doit être manœuvré à vide et hors tension

* sauf pour le sectionneur de mise à la terre (MALT) qui peut fermer sur un courant I_{cc}.

19.2.3.4. Sécurité de construction

La sécurité de construction est caractérisée en particulier par :

- une distance entre contacts "Entrée et Sortie" plus grande que distance entre phase et masse
- une coupure omnipolaire

19.2.3.5. Commande

La commande est du type manuelle - directe

- elle doit être verrouillable en position (ouvert et fermé)

19.2.4. L'interrupteur

Les interrupteurs sont des appareils destinés à établir et à interrompre un circuit dans des conditions normales de charge. Leurs performances sont cependant limitées car ils sont capables d'établir un courant de court-circuit mais ne peuvent en aucun cas l'interrompre. Leur conception doit être telle qu'il n'y a pas de risque de collage des contacts lors de l'établissement d'un courant de court-circuit.

Dans le cas de l'ouverture des contacts (coupure de courant), si les tensions sont très élevées (>100kV), un gaz inerte est soufflé entre les contacts pour éteindre rapidement l'arc électrique qui se trouve entre elles.

Certains interrupteurs sont prévus pour remplir également les fonctions de sectionneur. Dans ce cas, dans sa position ouverte, l'interrupteur doit satisfaire aux conditions d'isolement spécifiées pour un sectionneur.

19.2.4.1. Symboles

Interrupteur
Symbole général

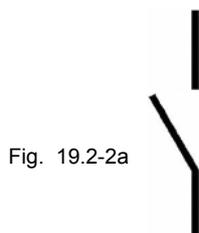


Fig. 19.2-2a

inter/sectionneur



Fig. 19.2-2b

19.2.4.2. Caractéristiques principales

- | | |
|---------------------------|---|
| • tension assignée | U_n en kV |
| • intensité assignée | I_n en A |
| • surintensité admissible | I_{eff} en kA / 1 sec |
| • tenue électrodynamique | $I_{crête}$ en kA |
| • tenue 50 Hz 1 min | $U_{50 Hz}$ en kV |
| • tenue au choc de foudre | en kV |
| • pouvoir de coupure | 100 coupures à $I_n \cos \varphi \geq 0,7$ (CEI 265)
3 coupures à $7 \times I_n \cos \varphi \leq 0,3$ (CEI 420) |
| • pouvoir de fermeture | I_{cc} |
| • sécurité | aucune sauf verrouillage fonctionnel |
| • commande brusque | manuelle ou électrique |
| • endurance mécanique | 1000 manœuvres mini
5000 manœuvres mini en cde renforcée ou électrique |
| • Coupure | visible |
| - | pleinement apparente |

19.2.5. Le contacteur

Les contacteurs ont un rôle comparable à celui des interrupteurs, mais ils sont capables de fonctionner avec des cadences très élevées. Ils possèdent une grande endurance électrique et une grande endurance mécanique.

Les contacteurs sont utilisés pour la commande des moteurs à haute tension jusque 7,2 kV et de dispositifs d'éclairage de 3,5 et 6,6 kV. En version fixe, ils sont associés à un sectionneur pour assurer la fonction d'isolement.

19.2.5.1. Symboles

fixe



Fig. 19.2-3a

Débrochable



Fig. 19.2-3b

19.2.5.2. Caractéristiques principales

- | | |
|---------------------------|---|
| • tension assignée | Un en kV |
| • intensité assignée | In en A |
| • surintensité admissible | I _{eff} en kA / 1 sec |
| • tenue électrodynamique | I _{crête} en kA |
| • tenue 50 Hz 1 min | U 50 Hz en kV |
| • tenue au choc de foudre | U en kV eff |
| • pouvoir de coupure | en kA (PdC) |
| • pouvoir de fermeture | en kA _{crête} (PdF) |
| • sécurité | aucune sauf verrouillage fonctionnel |
| • commande | automatique tripolaire à maintient magnétique ou à accrochage mécanique |
| • appareil fixe | il doit être toujours combiné avec un sectionneur |
| • appareil débrochable. | Il offre un double sectionnement (entrées - sorties) |

19.2.5.3. Exemples de contacteurs de la famille Rollarc R400 (Schneider Electric)

Appareil de base

Contacteur nu,
sans châssis support



Fig. 19.2-4a

Appareil fixe

Contacteur monté
sur châssis support fixe



Fig. 19.2-4b

Appareil débrochable

Contacteur monté
sur chariot mobile embrochable



Fig. 19.2-4c

19.2.6. Le fusible

19.2.6.1. Symbole

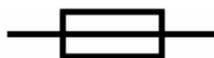


Fig. 19.2-5

19.2.6.2. Description

Le fusible est un appareil de connexion dont la fonction est d'ouvrir par la fusion d'un de ses éléments calibrés à cet effet, le circuit dans lequel il est inséré et d'interrompre le courant lorsque celui-ci dépasse pendant un temps suffisant une valeur précise.

Ils sont surtout utilisés pour la protection contre les courts-circuits dont ils limitent la valeur crête du courant de défaut.

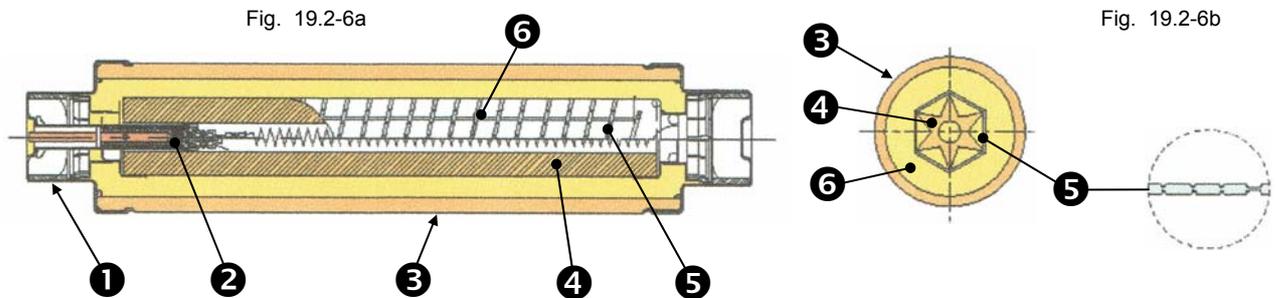
En régime triphasé, ils n'éliminent que les phases parcourues par un courant de défaut, ce qui peut présenter un danger pour le matériel et le personnel. Pour pallier cet inconvénient, les fusibles peuvent être associés à des interrupteurs ou à des contacteurs avec lesquels ils constituent des combinés capables d'assurer la protection en cas de surcharge du réseau ou de courts-circuits.

En HT, on ne les rencontre qu'en HTA uniquement.

Le principe du fusible est basé sur la création d'un point faible dans un circuit avec un conducteur dont la nature, la section et le point de fusion sont parfaitement connus. La nature du métal fusible varie selon les types de fusibles et les fabricants. La technologie de ce matériau est particulièrement complexe.

Exemple de technologie de fusibles HT (Fusarc CF, Soléfuse, Tépéfuse, MGK de Schneider Electric)

La figure ci-dessous représente la coupe schématique d'un fusible HT.



- **①** Calottes d'extrémités formant contact
Associées à l'enveloppe, elles forment un ensemble qui doit rester complet avant, pendant et après la coupure de courant. C'est pourquoi, elles doivent résister aux contraintes mécaniques et d'étanchéité dues aux surpressions développées par l'arc. Elles doivent aussi assurer la stabilité des composants intérieurs au fil du temps.
- **②** Percuteur thermique
C'est le dispositif mécanique qui indique le fonctionnement correct du fusible. Il fournit aussi l'énergie nécessaire pour actionner un appareil de coupure associé. Le percuteur est commandé par un fil résistant qui, après la fusion de l'élément fusible, fond aussi et libère le percuteur. Il est très important que le fil de commande ne provoque pas le déclenchement précoce du percuteur, et il ne doit pas non plus interférer dans le processus de coupure.
- **③** Enveloppe
Cette partie du fusible doit résister aux contraintes spécifiques suivantes (en relation avec ce qui a déjà été mentionné) :
 - contraintes thermiques : l'enveloppe doit résister à des échauffements rapides développés au moment où l'arc est éteint
 - contraintes électriques : l'enveloppe doit résister au rétablissement du courant après la coupure
 - Contraintes mécaniques : l'enveloppe doit résister à l'augmentation de pression produite par la dilatation du sable quand il y a coupure.
- **④** Noyau
C'est un cylindre entouré d'ailettes en céramique sur lequel est bobiné l'élément fusible. Le fil de commande du percuteur ainsi que ce dernier sont logés à l'intérieur du cylindre. Ils sont isolés des éléments fusibles.
- **⑤** Élément fusible
C'est l'élément principal du fusible. Des matériaux à faible résistivité et ne subissant pas l'usure du temps sont utilisés. Nos fusibles ont des éléments fusibles avec une configuration choisie avec soin et obtenue après de nombreux essais. Les résultats désirés peuvent ainsi être atteints.
- **⑥** Poudre d'extinction
La poudre d'extinction est constituée d'un sable de quarzite d'une grande pureté (plus de 99,7 %), et exempt de composés métalliques et d'humidité. Le sable, par sa vitrification absorbe l'énergie développée par l'arc et forme avec l'élément fusible un composé isolant, appelé *fulgurite*.

19.2.6.3. Caractéristiques électriques principales

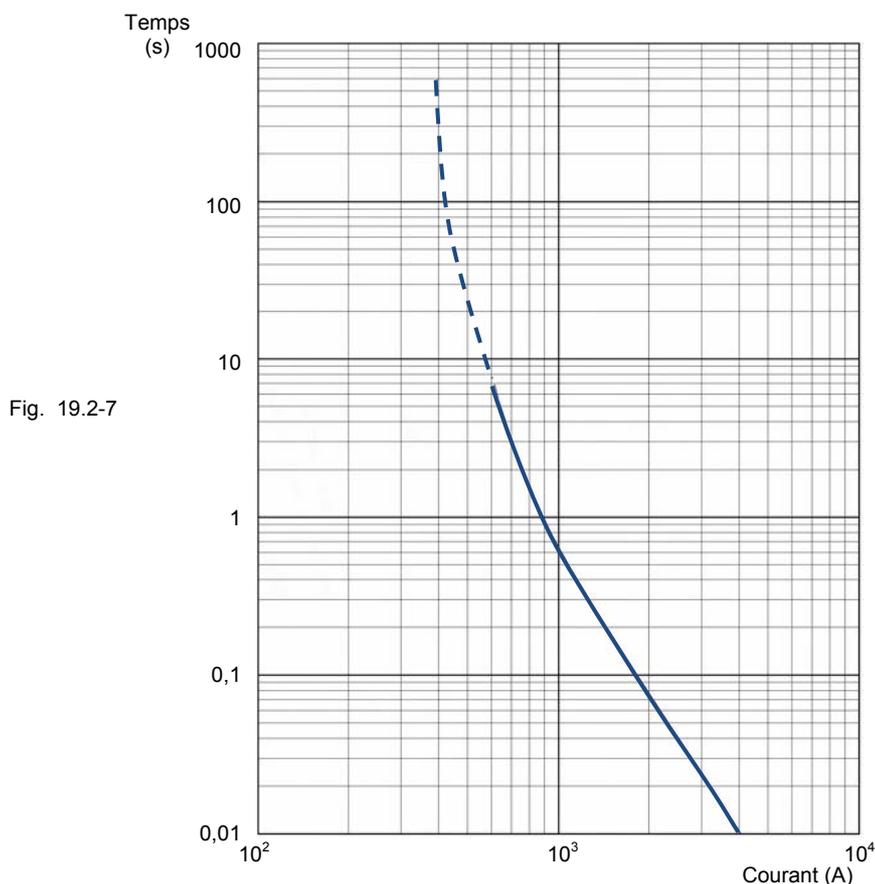
Un fusible est caractérisé par :

- | | |
|---|--|
| • La tension assignée | Un en kV |
| • L'intensité assignée | In en A |
| • La tenue 50 Hz 1 min | U 50 Hz en kV/min |
| • La tenue au choc de foudre | U en kV |
| • Le courant maximal de coupure assigné (I_1) | en kAeff (il correspond au PdC du fusible) |
| • Le courant critique de fusion (I_2) | en Aeff |
| • Le courant minimal de coupure assigné (I_3) | en Aeff |

Courbe de fusion temps/courant

C'est la courbe qui représente le temps virtuel de fusion ou préarc, en fonction de la valeur de la composante symétrique de l'intensité prévue.

Une courbe tracée sur une échelle logarithmique normalisée, permet de retrouver la durée de préarc pour chaque valeur du courant (cf. Fig. 19.2-7 ci-dessous).



Cette courbe ne concerne que le préarc, aussi, pour estimer le temps total de coupure du courant, il convient de rajouter le temps d'arc (5 à 50 ms typiquement) pour obtenir la durée de fonctionnement total.

Par ailleurs, les durées de préarc pour des courants inférieurs à I_3 peuvent être mentionnées. Dans ce cas, la courbe est tracée en pointillés. Il est ainsi possible de retrouver la valeur de I_3 (limite du trait plein) sur ce diagramme.

Cette courbe, qui se prolonge jusqu'à atteindre une durée de préarc de 600 s, est donnée avec une tolérance de $\pm 10\%$ sur la valeur du courant.

Exemple de courbe de fusion

Courbes reproduites d'après le catalogue AC0479 Fusarc CF de Schneider Electric

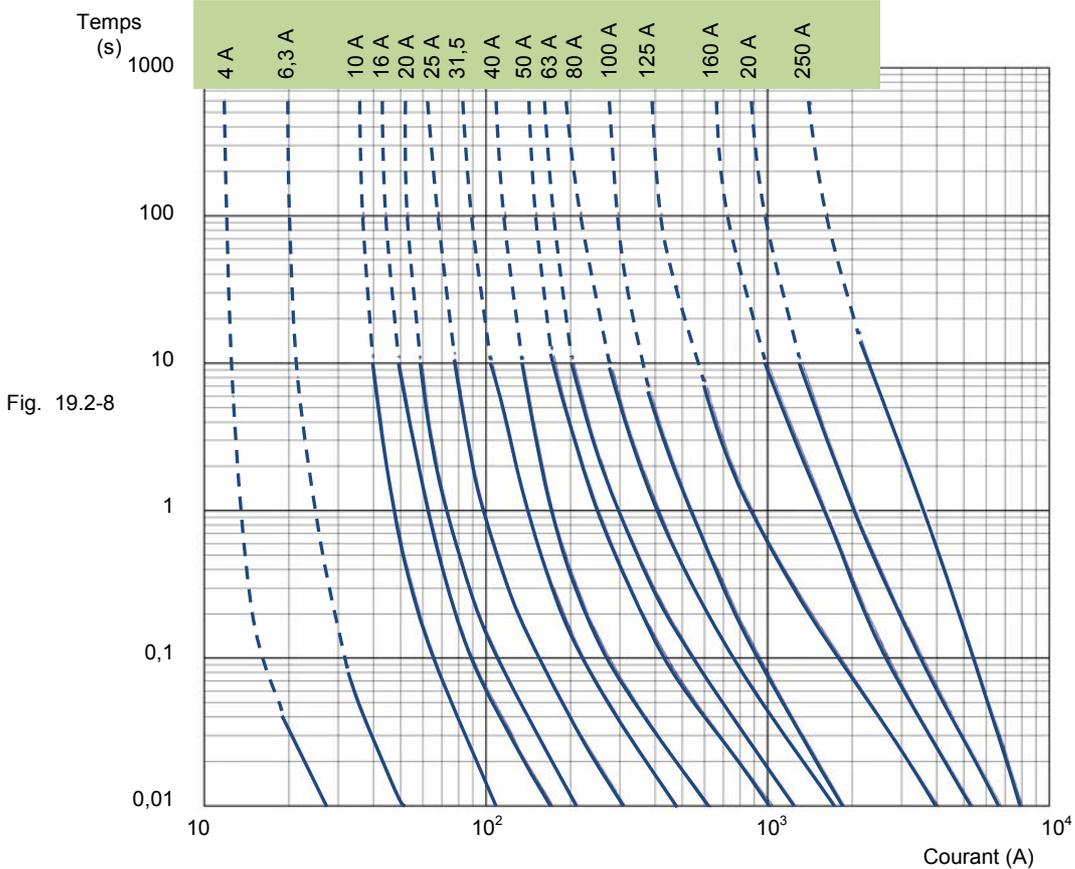


Fig. 19.2-8

Caractéristique de courant coupé limité

Les fusibles utilisés en distribution HTA sont limiteurs d'intensité. Par conséquent, les courants de court-circuit sont limités et n'atteignent pas leurs valeurs maximales (cf. Fig. 19.2-9a).

Complément indispensable à la caractéristique fusion temps/courant, la caractéristique de courant coupé limité permet, pour les valeurs de courant proches de I₁ où le courant de court-circuit est limité, de déterminer la valeur I_p du courant limité en fonction du courant présumé (cf. Fig. 19.2-9b).

A titre d'exemple, sur le diagramme Fig. 19.2-9b on observe qu'avec un fusible de calibre 200A le pic du courant coupé est ramené à 25 kA pour une intensité présumée de court-circuit (sans fusible) de 40 kA.

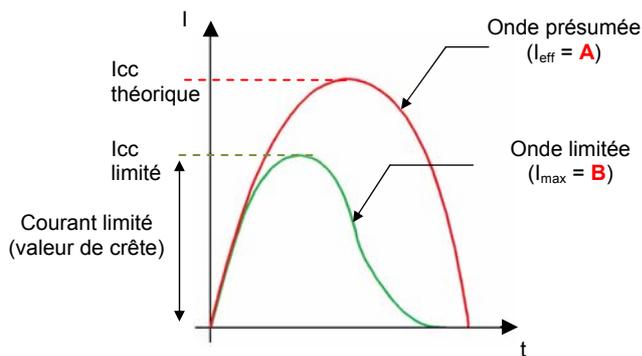


Fig. 19.2-9a

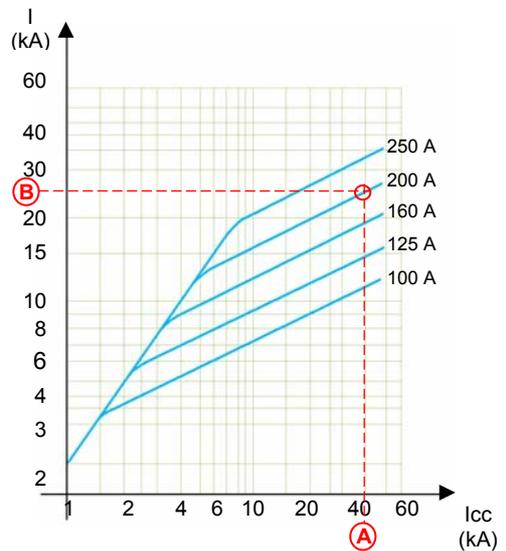


Fig. 19.2-9b

Remarques :

Certains fabricants proposent dans leur gamme de produits des fusibles HTA munis d'un dispositif de protection thermique. Dans le cas de surintensités permanentes de défaut inférieures au courant minimal de coupure I_3 et supérieures au courant assigné (I_n), le fusible libère le perceur mécanique, permettant l'ouverture du dispositif associé et évitant ainsi les incidents dus à des surchauffes.

De cette façon, le fusible ne fonctionne pas seulement en tant que limiteur de courant mais également en tant que fusible limiteur de température lorsque celui-ci est combiné à un dispositif de coupure externe.

La figure ci-dessous montre la zone de fonctionnement de la protection thermique.

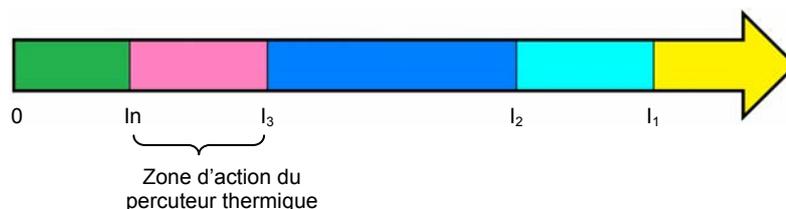


Fig. 19.2-10

L'incorporation d'un protecteur thermique sur les fusibles procure de nombreux avantages tels que :

- Protéger les fusibles et leur environnement de températures inadmissibles dans les installations équipées d'un interrupteur-sectionneur avec possibilité d'ouverture automatique,
 - Donner une réponse à des conditions de fonctionnement non prévues, à des surcharges fréquentes ou de longue durée, ou à des erreurs lors du choix du calibre des fusibles, ou encore lorsque les conditions de ventilation sont limitées au sein de l'installation
 - Effectuer la signalisation et la protection contre les surcharges provoquées par des surintensités situées en dessous de l'intensité minimum de coupure (I_3) du fusible installé et pouvant donner origine à de dangereuses températures de fonctionnement
 - Réduire les coûts d'exploitation dus à la destruction de l'appareillage ou les coûts provoqués par la perte de la qualité du service (temps de réparation, personnel, etc.).
- Ce protecteur thermique de sécurité diminue ainsi sensiblement les risques de dommages et d'accidents dans les installations, et augmente ainsi la qualité du service dans la distribution de l'énergie électrique.

19.2.6.4. Exemples de fusibles

Ci-dessous quelques exemples de fusibles HTA de Schneider Electric:

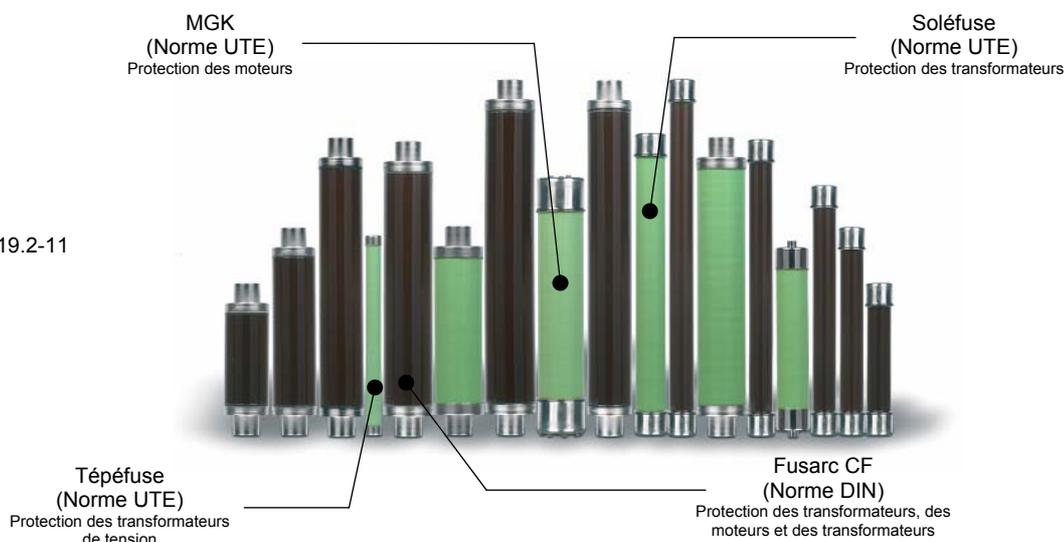


Fig. 19.2-11

19.2.7. Le disjoncteur

19.2.7.1. Fonction

Un disjoncteur à haute tension est destiné à établir, supporter et interrompre des courants sous sa tension assignée (la tension maximale du réseau électrique qu'il protège) à la fois :

- dans des conditions normales de service, par exemple pour connecter ou déconnecter une ligne dans un réseau électrique ;
- dans des conditions anormales spécifiées, en particulier pour éliminer un court-circuit.

De par ses caractéristiques, un disjoncteur est l'appareil de protection essentiel d'un réseau à haute tension, car il est seul capable d'interrompre un courant de court-circuit et donc d'éviter que le matériel connecté sur le réseau soit endommagé par ce court-circuit. La norme internationale CEI 62271-100 définit les exigences relatives aux caractéristiques des disjoncteurs à haute tension.

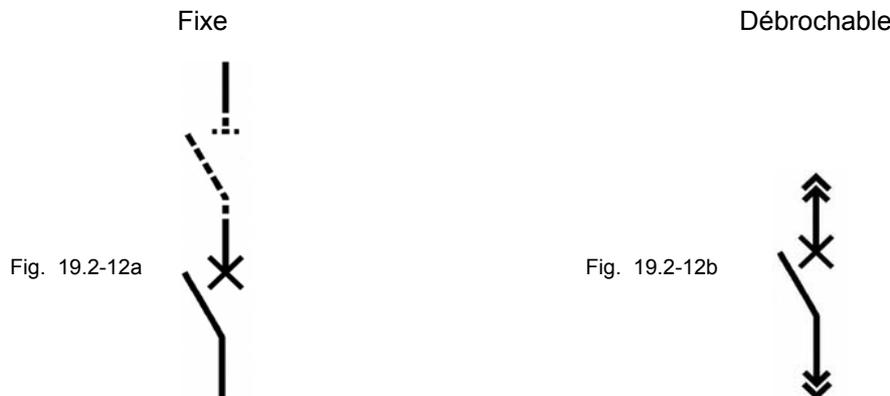
Dans leur configuration actuelle, les disjoncteurs peuvent être équipés d'appareils électroniques permettant à tout moment de connaître leur état (usure, pression de gaz pour la coupure, etc.) et éventuellement de détecter des défauts par des dérives de caractéristiques, ce qui permet à l'exploitant de programmer les opérations de maintenance et de prévenir les risques de défaillance.

Pour la manœuvre des longues lignes, les disjoncteurs sont généralement équipés de résistances de fermeture pour la limitation des surtensions.

Ils peuvent aussi être équipés de dispositifs de synchronisation à la fermeture et/ou à l'ouverture pour limiter les surtensions ou les courants d'appels à la manœuvre de lignes, de transformateurs à vide, de réactances shunt et batteries de condensateurs.

Des appareils ont été conçus pour remplir les fonctions de disjoncteur et de sectionneur, ils sont appelés disjoncteur-sectionneurs. Leur usage est cependant limité.

19.2.7.2. Symboles



19.2.7.3. Performances et caractéristiques principales d'un disjoncteur à haute tension

En préambule, rappelons que les performances des disjoncteurs à haute tension sont définies dans la norme CEI 62271-100. Comme tout appareil électrique à haute tension, un disjoncteur doit avoir un niveau d'isolement assigné et un courant permanent assigné en service continu qui assure que la température de ses pièces ne dépassera pas une valeur normalisée.

De plus un disjoncteur doit avoir un pouvoir de coupure assigné dans les cas suivants :

- coupure de courants de lignes à vide, câbles à vide ou de batteries de condensateurs;
- coupure de défaut aux bornes;
- coupure de défaut en ligne;
- coupure en discordance de phases;
- coupure de courants de charges inductives pour les disjoncteurs qui manœuvrent des moteurs ou des réactances shunt.

La performance principale qui caractérise un disjoncteur est son pouvoir de coupure en court-circuit, c'est-à-dire le courant maximal qu'il est capable d'interrompre sous sa tension assignée (tension maximale du réseau où il est utilisé). Les valeurs du pouvoir de coupure en court-circuit, exprimé en valeur efficace, sont comprises typiquement entre 25 kA et 63 kA (exception faite des disjoncteurs de générateurs).

Le courant de court-circuit qui peut être interrompu par un disjoncteur dépend fortement de la tension qui se rétablit aux bornes du disjoncteur après interruption du courant. Cette tension se rétablit tout d'abord avec des oscillations à haute fréquence, on l'appelle alors la tension transitoire de rétablissement (TTR), puis elle varie avec la fréquence industrielle du réseau.

Un disjoncteur doit aussi être capable d'établir un courant de court-circuit dont la valeur crête est normalement égale au produit de son pouvoir de coupure en court-circuit par 2,5 (réseaux à 50 Hz) ou 2,6 (réseaux à 60 Hz).

Caractéristiques principales :

• tension assignée	Un en kV
• intensité assignée	In en A
• courant de courte durée admissible	kA eff / 1 sec (3 sec pour l'export)
• tenue électrodynamique	Icrête en kA
• tenue à fréquence industrielle	U 50 Hz / 1 mn
• tenue au choc de foudre	U en kV eff selon onde normalisée 1,2/50 µs
• pouvoir de coupure (PdC)	kA
• pouvoir de fermeture (PdF)	kÂ (Icc x 2,2 Normatif)
• commande à accumulation manuelle ou électrique	nombre de manœuvres = 5000 mini
• séquence de manœuvre assignée	standard O - FO - A - FO
• sécurité	aucune sauf verrouillage fonctionnel
• fixe ou débouchable	il doit toujours être combiné avec un sectionneur

19.2.7.4. Les différentes techniques de coupure

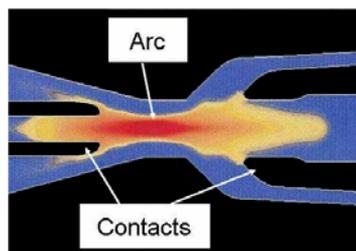
Pour remplir ses fonctions d'isolement et de coupure, plusieurs techniques ont été développées depuis la création des appareils à haute tension à la fin du XIX^e siècle. Alors que l'isolement des pièces sous tension par rapport à la terre est fait dans l'air et/ou dans le SF₆, plusieurs techniques ont été utilisées pour l'isolement entre contacts et pour la coupure par des appareils de connexion tels que les disjoncteurs.

Historiquement les milieux utilisés pour la coupure et l'isolement sont :

- l'air à pression atmosphérique (en moyenne tension) ;
- l'huile ;
- l'air comprimé ;
- le SF₆ ;
- le vide (en moyenne tension).

Les appareils électriques à haute tension doivent avoir un niveau d'isolement suffisant afin d'assurer qu'ils soient capables de supporter les surtensions exigées en service, que ce soit par rapport à la terre ou entre les bornes d'entrée et de sortie de l'appareil.

Fig. 19.2-13



Arc entre les contacts d'un disjoncteur à haute tension

La coupure d'un courant électrique par un disjoncteur en haute tension est obtenue en séparant des contacts dans un gaz (air, SF₆, etc.) ou dans un milieu isolant (par exemple l'huile ou le vide). Après séparation des contacts, le courant continue de circuler dans le circuit à travers un arc électrique qui s'est établi entre les contacts de l'appareil. Un soufflage intense est exercé sur l'arc afin de le refroidir et de provoquer son extinction lorsque la température du milieu où est amorcé l'arc est suffisamment faible pour que la conduction du courant s'interrompe. Pour les appareils de connexion à courant alternatif à haute tension, la coupure du courant est obtenue lorsque la puissance fournie à l'arc par le réseau est la plus faible, c'est-à-dire lors d'un passage par zéro du courant (pendant une seconde et pour un réseau à 50 Hz, un courant alternatif passe 100 fois par zéro).

1. La coupure dans l'air à pression atmosphérique

Les appareils utilisant la coupure dans l'air à la pression atmosphérique sont les plus simples et, historiquement, les premiers qui furent utilisés.

L'air à pression atmosphérique, malgré sa rigidité diélectrique relativement faible et sa constante de temps de désionisation élevée (10 ms) car aucun processus physique particulier ne vient y accélérer la recombinaison des ions et des électrons. Cette technique peut être utilisée pour la coupure jusqu'à des tensions voisines de 20 kV. Pour cela il faut disposer d'une puissance de refroidissement suffisante et d'une tension d'arc élevée après le passage à zéro du courant pour éviter l'emballement thermique.

Le mécanisme de coupure dans l'air

Le principe retenu consiste à maintenir l'arc suffisamment court, tant que l'intensité est importante, pour limiter l'énergie dissipée puis à l'allonger seulement à l'approche du zéro de courant.

Ce principe a conduit à la création pour chaque pôle d'appareil, d'une chambre de coupure. Il s'agit d'un volume situé au voisinage de l'espace intercontacts et divisé par des plaques réfractaires (plaques à grande capacité d'accumulation d'énergie thermique), (voir figure ci-dessous) entre lesquelles l'arc s'étire.

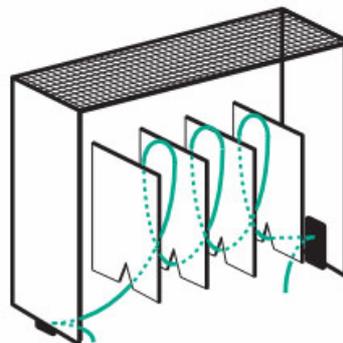


Fig. 19.2-14

Cette figure montre le principe de l'allongement d'un arc électrique entre des plaques réfractaires en céramique d'une chambre de coupure d'un disjoncteur à coupure dans l'air.

En pratique, lorsque le courant décroît, l'arc soumis aux efforts électromagnétiques pénètre entre ces plaques. Il s'allonge et se refroidit au contact du matériau réfractaire jusqu'à ce que sa tension d'arc devienne supérieure à celle du réseau, ainsi, la résistance d'arc augmente fortement. La puissance que peut lui apporter le réseau demeure alors inférieure à la puissance de refroidissement et la coupure devient effective. Du fait de la longue constante de temps de désionisation de cette technique, l'énergie d'arc à dissiper reste élevée. En contre partie, le risque de surtension à la coupure est quasi nul.

Exemple de technologie : le "Solénarc" de Merlin Gerin

Il s'agit d'un disjoncteur fonctionnant en poste intérieur jusqu'à 24 kV. Le nom de "Solénarc" vient de la forme de solénoïde (en hélice) donnée à l'arc électrique au stade précédant l'extinction.

Dans ce dispositif, l'arc va passer par 3 phases : il est d'abord allongé sur des cornes d'arc, puis il est fixé sur des cavaliers disposés en quinconce, ce qui le fractionne, et enfin, par un effet de boucle avec chemin imposé entre des plaques, il va pouvoir "s'éteindre".

L'allongement obtenu est important (plusieurs m) et ceci dans un volume réduit (~1litre), le refroidissement est assuré par des plaques réfractaires; le temps de coupure est de l'ordre de 5 à 10/100 centièmes de seconde.

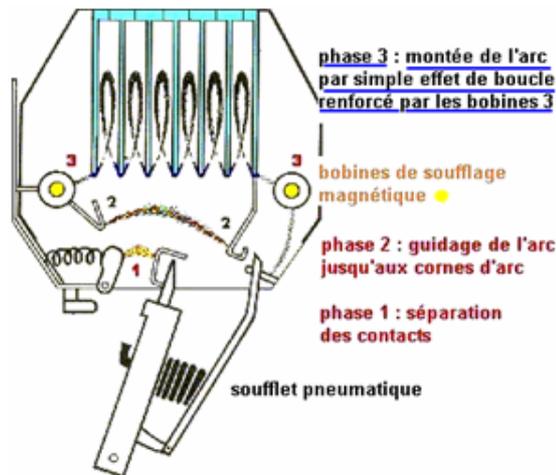


Fig. 19.2-15a

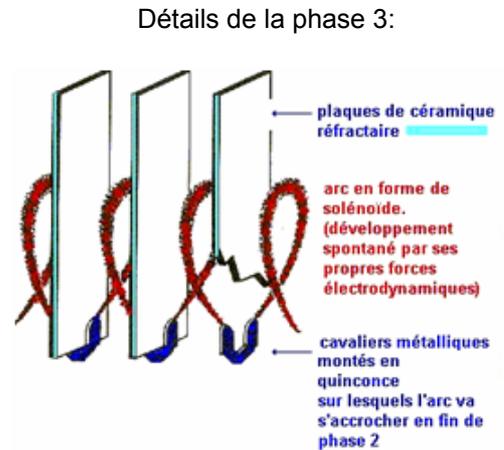


Fig. 19.2-15b

Remarques :

- Du fait de la longue constante de temps de désionisation de cette technique, l'énergie d'arc à dissiper reste élevée.
- En contre partie, le risque de surtension à la coupure est quasi nul ce qui est une qualité absolument primordiale pour les réseaux BT. C'est pourquoi la coupure dans l'air a acquis une position de monopole absolu dans ce domaine.
- Le principal handicap de ce type d'appareils réside dans leur encombrement, conditionné par les dimensions des chambres de coupure et les distances d'isolement dans l'air. Les techniques d'interruption dans le vide et dans le SF₆ ont permis de réduire de manière importante les encombrements, ainsi que les coûts des appareils MT, de sorte que les disjoncteurs et contacteurs à coupure dans l'air sont maintenant surclassés.

2. La coupure dans l'huile

Historiquement, c'est au début du XX^e siècle que l'huile minérale a été utilisée comme fluide pour la coupure et l'isolement des appareils, notamment pour les disjoncteurs à haute tension.

La décomposition par l'arc d'une faible quantité d'huile libère un volume considérablement supérieur d'hydrogène qui forme subitement une bulle au sein du liquide et c'est dans celle-ci que s'effectue la coupure. L'énergie d'arc étant consommée par la vaporisation et la décomposition de l'huile, l'arc se refroidit et s'interrompt au voisinage du passage par zéro du courant. La haute conductivité thermique de l'hydrogène permet de refroidir énergiquement l'arc, ce qui favorise une régénération diélectrique très rapide du milieu interélectrodes. Ce gaz est un excellent agent de déionisation, et cette propriété est d'autant plus efficace que la pression dynamique, générée à la coupure, est élevée. (jusqu'à 150 bars). Les disjoncteurs équipés de ce système ont l'avantage d'utiliser une quantité d'huile relativement faible avec un risque minime d'amorçage entre l'arc et la cuve tel que l'on peut le constater sur le pôle de gauche de la figure 19.2-16 illustrant un disjoncteur à gros volume d'huile ou encore entre les arcs des différentes bulles.

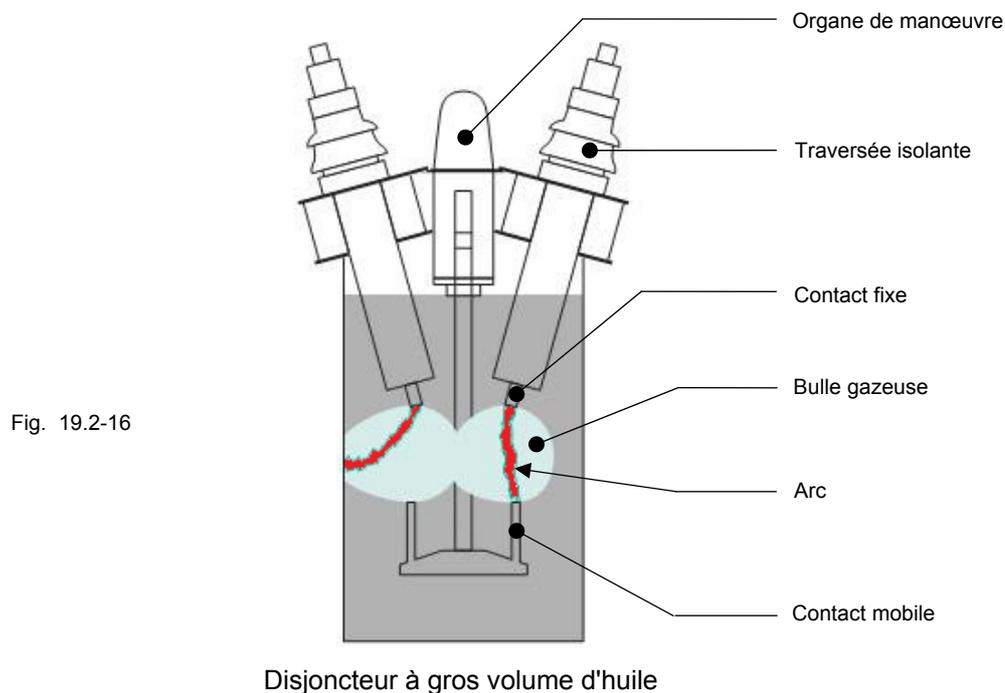
Technologies de coupure dans l'huile

On distingue deux grandes familles :

1) *Les disjoncteurs à gros volume d'huile*

Les premiers disjoncteurs à huile à haute tension furent des disjoncteurs à gros volume d'huile qui comportaient deux éléments de coupure en série par pôle, placés dans une cuve métallique (figure 19.2-16 page suivante).

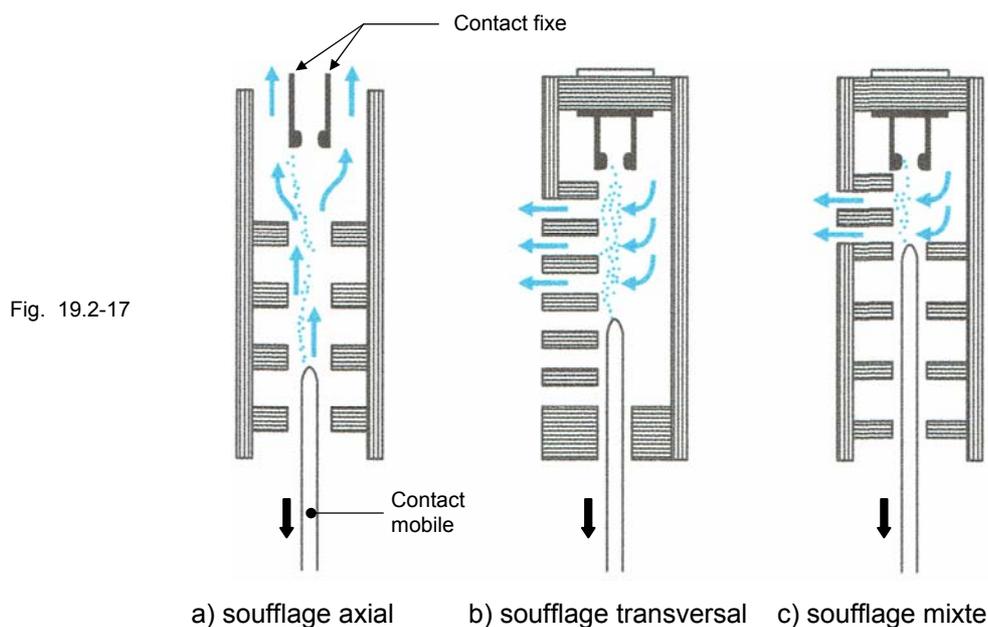
Suivant les technologies utilisées, l'arc se développait soit librement dans la cuve, soit en étant enfermé dans un pot de coupure qui avait pour objet de limiter la longueur d'arc et de favoriser son refroidissement par la production de jets de gaz sous pression.



2) Les disjoncteurs à faible volume d'huile

Ces disjoncteurs ont été conçus pour réduire la quantité d'huile utilisée, les efforts de réaction au sol et les dangers d'incendie des appareils à gros volume d'huile.

Ce sont des appareils à isolement dans l'air où l'arc est contenu dans un pot de coupure (voir figure 19.2-17 suivante) qui permet de réduire la durée d'arc et l'énergie transmise au volume d'huile. Ce sont les précurseurs des disjoncteurs à autosoufflage car l'énergie d'arc est utilisée pour générer la surpression nécessaire au soufflage et à l'extinction de l'arc.



Principaux inconvénients de la coupure dans l'huile

- Les disjoncteurs à coupure dans l'huile nécessitent de nombreux éléments de coupure en série pour tenir la tension,
- Les coupures répétées entraînent la dégradation progressive des contacts avec une décomposition de l'huile qui provoque non seulement la formation d'hydrogène et de gaz divers mais aussi de carbone libre qui, restant en suspension dans l'huile, ce qui abaisse progressivement ses qualités isolantes,
- La décomposition de l'huile n'est pas réversible,
- Le risque d'explosion et d'inflammation n'est pas complètement écarté,
- En cas de refermeture rapide le pôle reste à pression élevée et son PdC diminue,
- La sécurité d'emploi de ces disjoncteurs demeure très liée à leur bon état d'entretien, dont on ne peut s'assurer que par des démontages périodiques, longs et minutieux, ce qui, dans les réseaux modernes, vient à l'encontre de la nécessaire réduction des opérations de maintenance.

La technique de coupure dans l'huile, très employée dans le passé en particulier dans les domaines, du transport et de la distribution de l'énergie électrique, a été progressivement supplantée par les techniques de coupure dans le vide et dans le SF₆ car celles-ci ne présentent pas les inconvénients évoqués précédemment.

3. La coupure dans l'air comprimé

Les disjoncteurs à air comprimé ont supplanté les disjoncteurs à l'huile dans le domaine des hautes performances grâce à la haute rigidité diélectrique et aux bonnes propriétés thermiques du fluide utilisé qui permettent d'obtenir un refroidissement rapide de l'arc au voisinage du passage par zéro du courant. L'air comprimé sous une pression de 20 à 35 bar est emmagasiné préalablement dans des réservoirs puis évacué à l'intérieur de tuyères pour permettre d'obtenir un refroidissement efficace de l'arc et en assurer ainsi un soufflage très efficace lors de l'ouverture des contacts. Les pouvoirs de coupure les plus élevés exigés ont pu être atteints en augmentant la pression (30 à 50 bar).

Il existe des formes très diverses de ces tuyères pour canaliser le jet d'air comprimé sur le trajet de l'arc et, de préférence aux points d'attache tel que le montre les exemples de la figure ci-dessous.

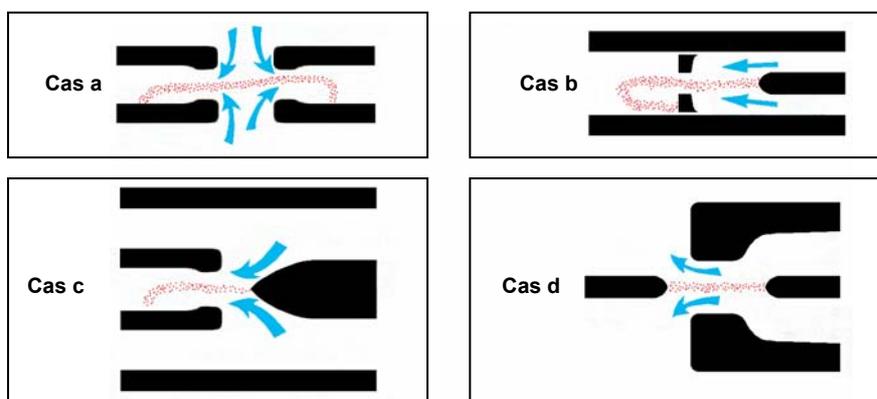


Fig. 19.2-18

Dispositions schématiques de diverses tuyères d'appareils à air comprimé.

Ces disjoncteurs sont généralement munis de résistances qui sont insérées dans le circuit à l'ouverture afin de réduire les contraintes en coupure de courants forts et aussi pour limiter les surtensions susceptibles d'être générées pendant la coupure.

Par ailleurs, il est intéressant de remarquer que les disjoncteurs à air comprimé sont des appareils de haute technicité, de grande endurance électrique et mécanique. L'usure des contacts est faible en raison des durées d'arc très courtes et de tensions d'arc peu élevées. La technique de coupure à air comprimé est bien adaptée aux fonctionnements à très basse température, car il n'y a pas de risque de liquéfaction du gaz de coupure. Pour cette raison, ces disjoncteurs sont encore largement utilisés au Canada.

Néanmoins aujourd'hui en HT, d'autres techniques lui ont été préférées, car la coupure dans l'air présente plusieurs inconvénients :

- Encombrement de l'appareillage (dimensions plus grandes à cause de l'allongement de l'arc),
- Le pouvoir de coupure est influencé par la présence des cloisons métalliques de la cellule contenant l'appareil,
- Les appareils à air comprimé exigent un certain entretien, en particulier les stations de compression,
- Aux performances moyennes, la nécessité d'une alimentation en air comprimé, soigneusement déshydraté, a constitué de tout temps un sérieux handicap vis-à-vis de techniques plus autonomes,
- Bruit au déclenchement,
- coût élevé.

4. La coupure dans le SF₆

Historique

L'utilisation du SF₆ pour l'isolation a été brevetée aux États-Unis par Franklin Cooper de General Electric en 1938, et son utilisation pour l'interruption d'un courant a été revendiquée aussi en 1938 dans un brevet allemand par Vitaly Grosse de AEG (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft).

La première application industrielle du SF₆ pour la coupure date de 1953, elle a été faite par Westinghouse pour des interrupteurs en charge à haute tension 15 kV à 161 kV avec un pouvoir de coupure de 600 A.

La première réalisation d'un disjoncteur SF₆ haute tension a été faite en 1956 par Westinghouse mais le pouvoir de coupure était alors limité à 5 kA sous 115 kV (1 000 MVA) et cet appareil devait avoir de nombreux éléments de coupure en série par pôle pour assurer les performances.

Dans le même temps, en 1957, les Ateliers de Constructions Electriques de Delle ont réalisé un disjoncteur 23 kV 250 MVA pour cellules de distribution, puis un disjoncteur "Dead Tank" pour locomotive 25 kV 200 MVA.

Il fallut attendre 1959 pour voir la production par Westinghouse du premier disjoncteur SF₆ à grand pouvoir de coupure : 41,8 kA sous 138 kV (10 000 MVA) et 37,6 kA sous 230 kV (15 000 MVA). Ce disjoncteur tripolaire comprenait trois chambres de coupure en série par pôle. Il fonctionnait avec une pression SF₆ de 13,5 bar relatifs (au-dessus de la pression atmosphérique) pour le soufflage et de 3 bar relatifs pour assurer la tenue diélectrique. Des performances étaient obtenues grâce aux hautes pressions utilisées, cependant ces appareils présentaient le risque de liquéfaction du SF₆ pour des températures inférieures à 5°C, il fallait donc prévoir un maintien en température du réservoir haute pression.

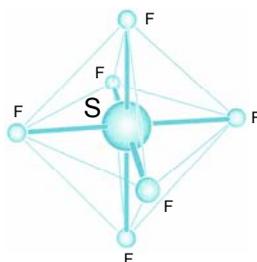
Les très bonnes propriétés du SF₆ ont entraîné l'extension de la technique SF₆ au cours des années 1960 et son utilisation pour le développement de disjoncteurs à fort pouvoir de coupure sous des tensions de plus en plus élevées allant jusqu'à 800 kV et 1 100 kV depuis 2009 en Chine.

Propriétés du gaz hexafluorure de soufre (SF₆)

• **Structure de la molécule**

L'hexafluorure de soufre est un composé chimique de soufre et de fluor, de formule chimique SF₆. La molécule du gaz est de forme octaédrique (les six atomes de fluor sont symétriquement repartis sur les sommets autour de l'atome de soufre).

Fig. 19.2-19



- **Propriétés chimiques**

Le SF₆ 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 (+1096 kJ/mol) 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 qui peut atteindre 15 000 à 20 000 K, le SF₆ se décompose. Cette décomposition est quasi réversible : quand le courant diminue la température diminue, les ions et les électrons se recombinaient alors pour reconstituer la molécule de SF₆. Une faible quantité de sous-produits résulte de la dégradation du SF₆ en présence d'impuretés telles que le dioxyde de soufre ou le tétrafluorure de carbone. Ces sous-produits restent confinés dans les ampoules et sont très facilement absorbés par des éléments actifs comme le silicate d'aluminium souvent placés dans l'enceinte de coupure.

- **Propriétés physiques**

⇒ Propriétés thermiques

La conductivité thermique du SF₆ est équivalente à celle de l'air, mais l'étude de la courbe de conductivité thermique du SF₆ à des hautes températures révèle un pic à la température de dissociation du SF₆ (voir la figure ci-dessous).

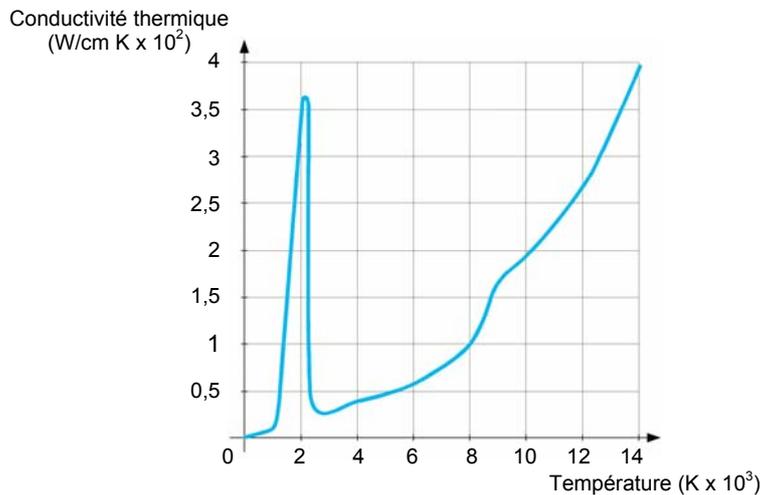


Fig. 19.2-20

Courbe de conductivité thermique du SF₆ en fonction de la température

⇒ Propriétés diélectriques

Le SF₆ a une rigidité diélectrique très élevée grâce aux propriétés très électronégatives du fluor :

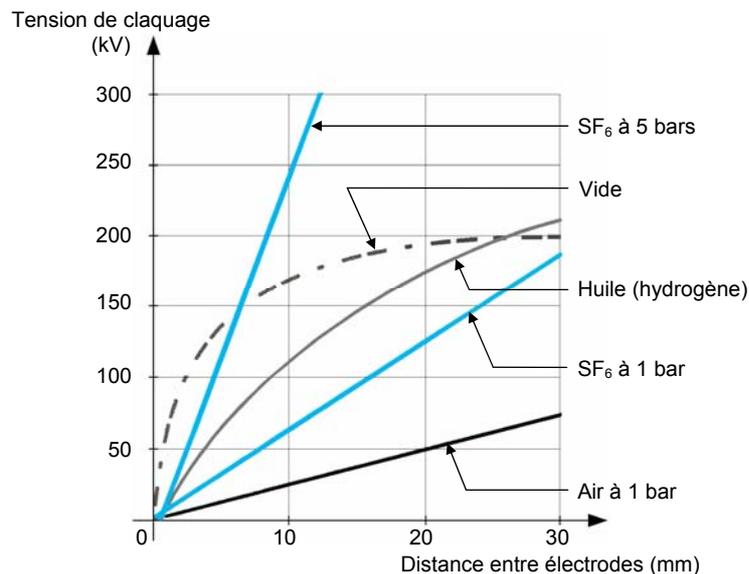
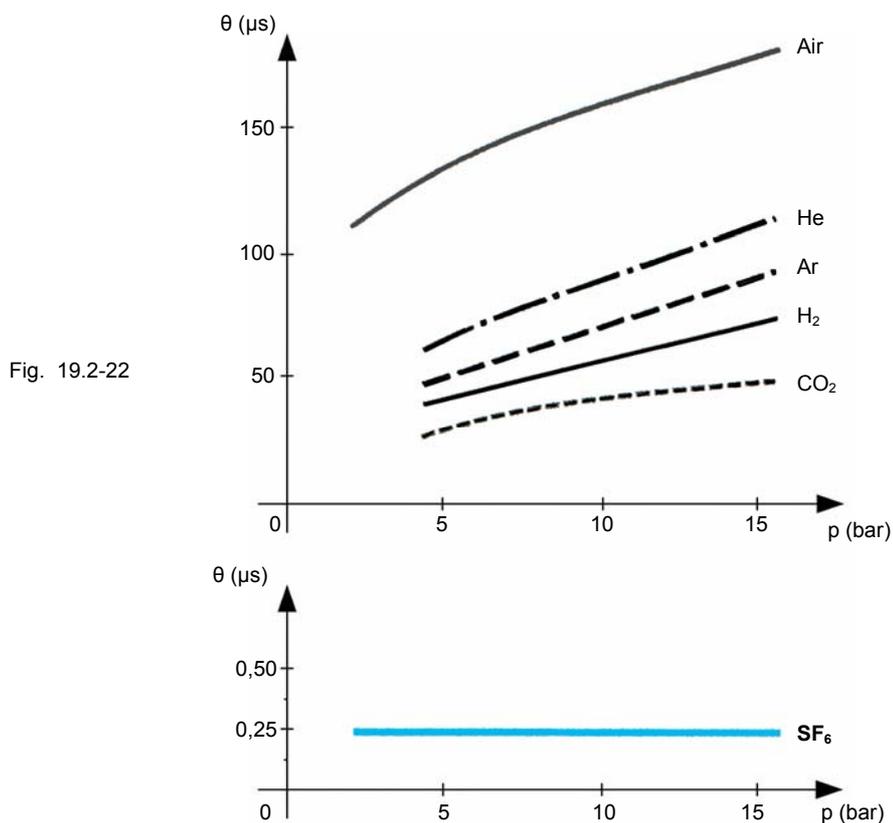


Fig. 19.2-21

- La durée de vie de ses électrons libres reste très faible et ils forment avec les molécules de SF₆ des ions lourds à faible mobilité. La probabilité de rupture diélectrique par avalanche est ainsi retardée.
- Il confère à son milieu une constante de temps de désionisation extrêmement faible, de l'ordre de 0,25 μs.

La figure 19.2-22 ci-dessous donne quelques constantes de temps de désionisation en fonction de la pression pour différents gaz. On remarque la valeur très faible et la grande stabilité de ce temps en fonction de la pression du SF₆ par rapport aux autres gaz.



avec :

- p ⇔ pression
- θ ⇔ constante de temps de désionisation)

• Le mécanisme de coupure dans le SF₆

⇒ L'arc électrique dans le SF₆

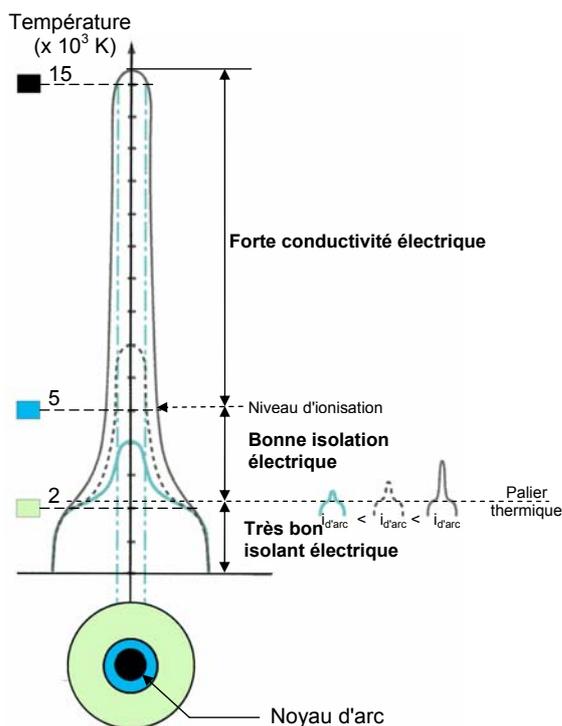
Son étude thermique permet de le décrire comme étant formé d'un plasma de SF₆ dissocié, de forme cylindrique, constitué d'un noyau à une température très élevée fonction du courant coupé, entouré d'une gaine de gaz plus froid. Le noyau et la gaine sont séparés par un palier de température lié à la température de dissociation de la molécule. Proche de 2000°C, ce palier reste inchangé lorsque l'intensité du courant varie. (voir figure 19.2-23 page suivante).

Pendant cette période d'arc la totalité du courant est transportée par le noyau car la température du palier est inférieure à la température minimale d'ionisation et la gaine extérieure reste isolante.

Les grandeurs caractéristiques de l'arc dépendent du type de coupure utilisé (autocompression, arc tournant, auto-expansion) seront données dans les paragraphes traitant de chacun de ces types de coupure.

La figure suivante illustre la courbe de répartition de la température d'un arc contenu dans un tube cylindrique rempli de SF₆

Fig. 19.2-23



⇒ Passage au zéro du courant

Avec la décroissance du courant, la température du noyau diminue, de ce fait la conductivité électrique commence aussi à diminuer.

A l'approche du zéro de courant, les échanges thermiques entre la gaine et le noyau deviennent très importants. Celui-ci disparaît entraînant la disparition de la conductivité avec une constante de temps très faible (0,25 μs) mais pas suffisante pour couper les courants de haute fréquence (pas de réallumage).

• **Les différentes technologies de coupure dans le SF₆**

⇒ Généralités

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. Des systèmes de pressostats ou densistats peuvent être installés, ils permettent un contrôle permanent de la pression du gaz dans l'enveloppe.

Il existe plusieurs technologies d'appareils au SF₆ qui diffèrent par le mode de refroidissement de l'arc et dont les caractéristiques et les champs d'application varient.

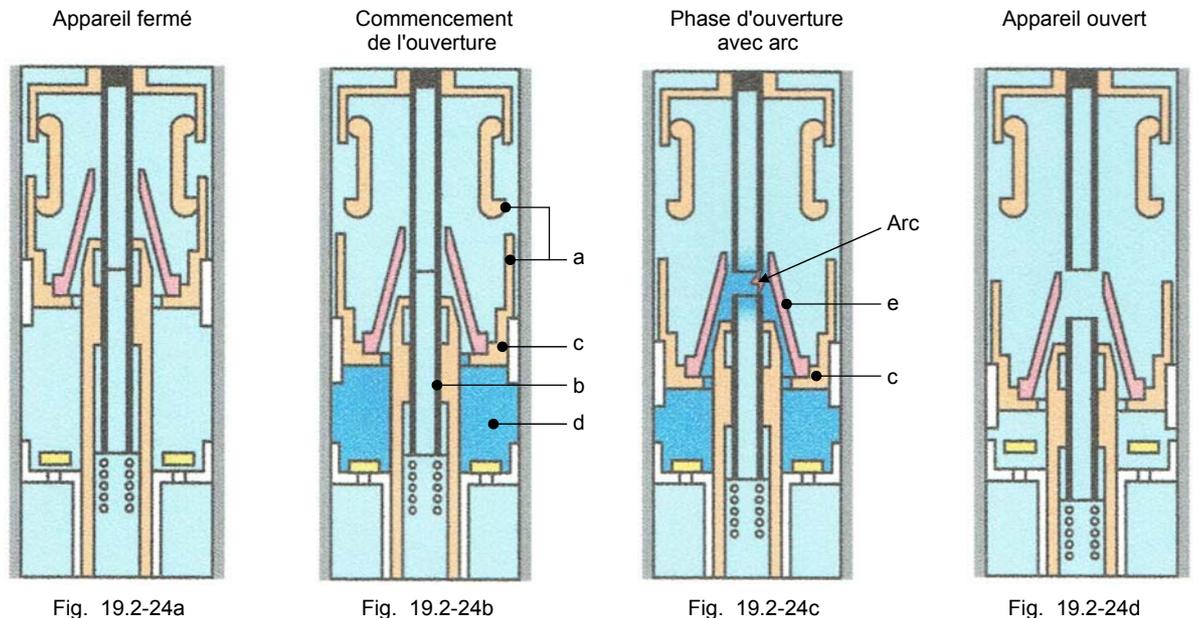
⇒ La coupure par autocompression

Dans ce type de disjoncteur, l'arc est soufflé par la détente d'un volume de SF₆ comprimé par pistonnage. A l'ouverture de l'appareil, un cylindre solidaire du contact mobile se déplace et comprime un volume de SF₆ (voir figures 19.2-24). Une buse de soufflage canalise le gaz dans l'axe de l'arc qui est ensuite expulsé dans des contacts creux.

Aux forts courants, l'arc provoque un effet bouchon qui contribue à l'accumulation de gaz comprimé. Quand le courant approche de zéro, l'arc est d'abord refroidi puis il est éteint grâce à l'injection de nouvelles molécules de SF₆. La valeur moyenne de la tension d'arc est comprise entre 300 et 500 V.

Cette technologie permet de couper sans difficulté tout courant jusqu'au PdC, sans courant critique car l'énergie nécessaire pour souffler l'arc est produite par la commande mécanique donc indépendante du courant à couper. C'est une technique de coupure utilisée pour les hautes performances (40,5 kV - 31,5 kA).

Les figures suivantes illustrent un exemple d'une séquence de fonctionnement d'une chambre de coupure à autocompression dont la partie mobile est mue par la commande mécanique.



On peut ainsi distinguer quatre phases de fonctionnement :

- 1) Figure 19.2-24a

Le disjoncteur est fermé

- 2) Figure 19.2-24b

Suite à un ordre d'ouverture, les contacts principaux se séparent (a) et le courant est dérivé dans le circuit de coupure (b). Lorsque les contacts principaux commencent à s'ouvrir, le piston (c) comprime légèrement le gaz SF₆ dans la chambre de compression (d).

- 3) Figure 19.2-24c

A la séparation des contacts d'arc, il apparaît un arc électrique. Le piston (c) continue sa course vers le bas. Une petite quantité de gaz canalisée par la buse isolante (e) est injectée sur l'arc. Pour la coupure des faibles courants, l'arc est refroidi par ventilation forcée. Toutefois, pour les courants élevés, l'expansion thermique amène les gaz chauds vers les parties les plus froides du pôle de coupure.

La distance entre les contacts d'arc devient suffisante pour permettre la coupure du courant lors du passage à zéro, grâce aux propriétés diélectriques du SF₆.

- 4) Figure 19.2-24d

Les parties mobiles finissent leur mouvement et l'injection de gaz froid continue jusqu'à ce que les contacts soient complètement ouverts.

Le disjoncteur est ouvert.

➤ Grandeurs caractéristiques

Les pressions relatives de SF₆ généralement utilisées varient de 0,5 bar (16 kA, 24 kV) à 5 bars (52 kV), ce qui autorise la réalisation d'enveloppes scellées sans fuites avec toutes les garanties de sécurité.

Les facteurs influençant les dimensions de la chambre de coupure sont les suivants :

- La tenue à la tension d'essais entrée/sortie qui conditionne la distance d'isolement entre contacts ouverts. Elle peut être constante et de l'ordre de 45 mm compte tenu des pressions de SF6 utilisées.
- Le courant de court-circuit à couper dimensionne le diamètre de la buse et des contacts.
- La puissance de court circuit à couper impose les dimensions du piston de soufflage (en 24 kV le volume de gaz soufflé est de l'ordre d'un litre pour un PdC de 40 kA). L'énergie d'ouverture de 200 J (16 kA) à 500 J (50 kA), reste relativement élevée malgré la compacité des appareils à cause de l'énergie nécessaire à la compression du gaz.

➤ **Domaines d'application de la coupure par autocompression**

Le principe d'autocompression est le plus ancien. Il a été utilisé pour tous les types de disjoncteurs à usage général. Il ne présente pas de surtensions trop élevées car le phénomène d'arrachement est faible et il n'y a pas de risque de réallumages successifs. Les disjoncteurs à autocompression sont bien adaptés à la manœuvre des batteries de condensateurs car ils ont une très faible probabilité de réamorçage d'une part, et une grande endurance aux courants de fermeture d'autre part. Cependant, l'énergie de manœuvre nécessaire relativement importante engendre des contraintes assez élevées sur les commandes et éventuellement une limitation du nombre de manœuvres.

Cette technologie est encore largement utilisée aujourd'hui, surtout pour les appareils à forte intensité et les tensions supérieures à 24 kV.

⇒ La coupure par arc tournant

Ce procédé utilise le principe qu'un conducteur parcouru par un courant, et placé dans un champ magnétique, est soumis à une force qui tend à le faire déplacer (loi de Laplace). C'est cette même loi qui, appliquée à un arc électrique conducteur, permet d'obtenir un arc tournant.

Lors de l'écartement des contacts principaux, le courant à couper passe au travers d'un solénoïde jusqu'à une électrode circulaire. Un arc apparaît entre deux anneaux, perpendiculairement au champ magnétique B produit par le solénoïde. L'arc étant conducteur subit donc une force F, et est en conséquence accéléré dans un mouvement circulaire (voir figure 19.2-25).

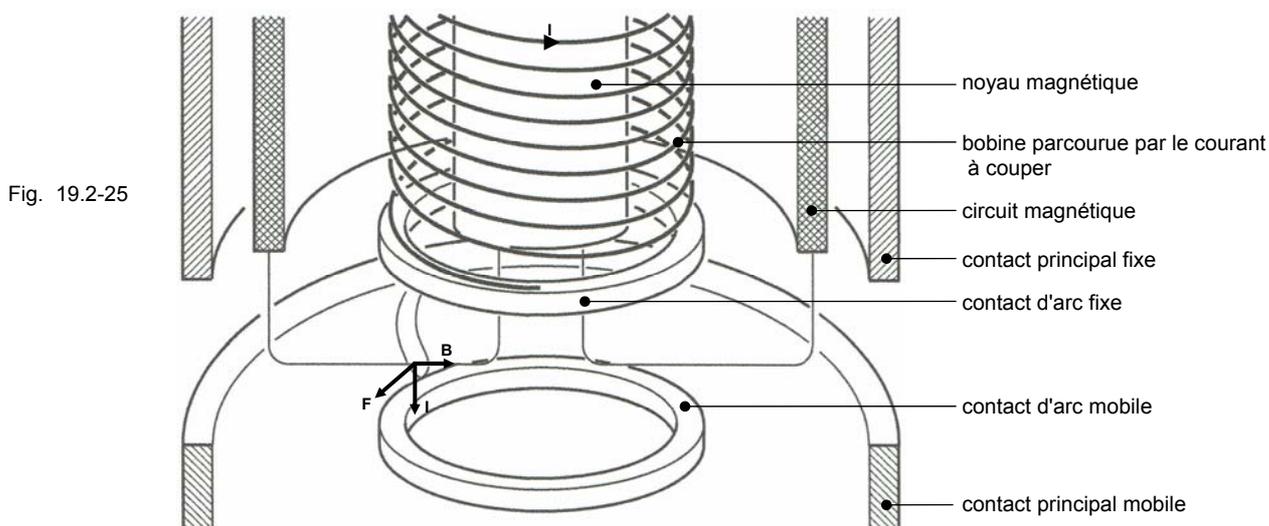


Fig. 19.2-25

La technique de l'arc tournant présente plusieurs avantages :

- le refroidissement de l'arc est efficace dans le SF6 environnant,
- les points chauds créant des vapeurs métalliques et une usure ponctuelle sont évités grâce au mouvement des racines de l'arc ;
- cette rotation de l'arc se produit jusqu'au zéro de courant.

La vitesse de rotation de l'arc varie avec l'intensité du courant à couper, et dans le gaz peut atteindre la vitesse du son pour les forts courants de court-circuit.

Lors de la coupure des courants de court-circuit, la force au voisinage du zéro de courant est assez élevée pour maintenir l'arc en rotation. En effet, la force est le produit vectoriel du champ et du courant, deux paramètres qui ne sont pas en phase mais dont le produit garde une valeur significative au voisinage du zéro de courant.

Lors de la coupure de faibles courants, la vitesse est très faible juste avant le passage à zéro de courant. Le refroidissement par convection est alors faible et la désionisation n'est due qu'aux qualités intrinsèques du gaz SF₆. Ce faible refroidissement et cette désionisation font que les coupures s'effectuent en douceur et sans surtension de manœuvre.

➤ **Grandeurs caractéristiques**

L'arc tournant dans le SF₆ a une tension de 50 à 100 V pour une longueur de 15 à 25 mm. Du fait de la faible énergie de coupure, les appareils sont très compacts, même avec une pression de remplissage relativement faible (de l'ordre de 2,5 bars) et l'énergie de commande pour l'ouverture est inférieure à 100 J.

➤ **Domaines d'application de la coupure par arc tournant**

Cette technologie de coupure dans le SF₆ est bien adaptée à la commande de machines sensibles aux surtensions telles que moteurs MT et alternateurs. Son excellente endurance due à la faible usure des contacts et aux énergies de commande faibles la rend très intéressante pour les applications à grand nombre de manœuvres, (fonction contacteur du type Rollarc de Schneider Electric). La technique de l'arc tournant utilisée seule ne permet d'obtenir qu'un pouvoir de coupure limité (25/30 kA en 17,5 kV) et ne s'applique qu'à des tensions inférieures à 17,5 kV.

⇒ La coupure par auto-expansion

Cette technique utilise l'énergie thermique dissipée par l'arc pour augmenter la pression d'un petit volume de SF₆, lequel s'échappe par un orifice traversé par l'arc (voir figure 19.2-26a page suivante). Tant que le courant dans l'arc est important, il a un effet bouchon qui empêche l'écoulement du gaz à travers l'orifice. Le gaz froid bloqué dans le volume a sa température qui croît, à cause de la dissipation thermique de l'arc (principalement par rayonnement), donc sa pression augmente également. Au zéro de courant, le bouchon disparaît, le SF₆ se détend et souffle l'arc. L'effet du soufflage dépend de la valeur du courant, d'où des énergies de commande faibles et des coupures en douceur, mais avec un risque d'existence de courants critiques. Ceux-ci se trouvent généralement aux environs de 10 % du PdC.

On utilise deux méthodes de guidage de l'arc, le guidage mécanique et le guidage magnétique. Elles ont été développées afin de stabiliser l'arc dans la zone de soufflage et de supprimer les courants critiques.

- Le guidage mécanique (type autocompression) (voir figure 19.2-26b)

L'arc est maintenu centré entre les deux contacts par des parois isolantes qui confinent les flux gazeux de manière similaire aux buses utilisées en autocompression.

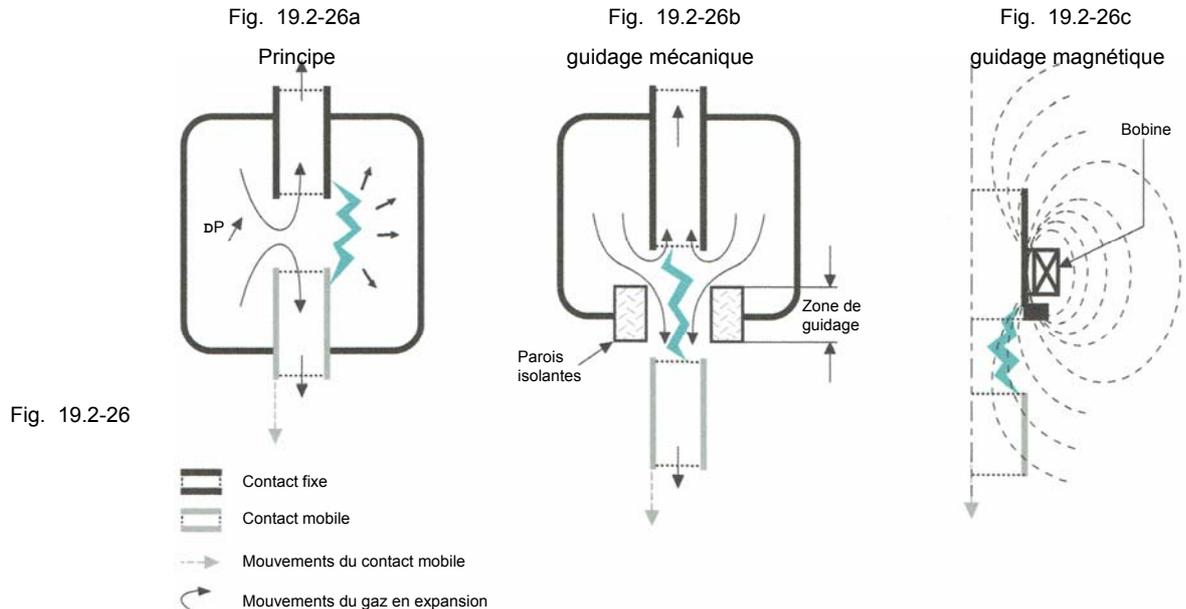
Cette technique, développée par tous les grands constructeurs, est sûre et simple mais elle augmente l'énergie nécessaire à la commande.

En effet, la présence de ces dispositifs dans la zone d'arc diminuent les performances diélectriques du SF₆ pendant la période de rétablissement, ce qui conduit à augmenter les distances inter-électrodes et les vitesses de déplacement des contacts, voire la pression du SF₆.

- Le guidage magnétique (type arc tournant) (voir figure 19.2-26c)

Un champ magnétique permet de centrer l'arc dans la zone d'expansion du SF₆ tout en lui imprimant un mouvement de rotation rapide à l'instar de la technologie à arc tournant. Cette autre technologie qui nécessite une grande maîtrise de conception a pour avantage d'éviter la présence d'autres matériaux que celle du SF₆ dans la zone d'arc. Le rendement thermodynamique est optimal et le SF₆ garde toutes ses qualités diélectriques. Ainsi les distances d'isolement pouvant être réduites au maximum, l'énergie de commande requise est faible.

Les figures ci-dessous schématisent le fonctionnement des dispositifs de coupure dans le SF6 par auto-expansion (principe et les méthodes de guidage de l'arc (mécanique et magnétique) :



➤ **Grandeurs caractéristiques**

Pour les petits courants, le soufflage est alors quasi inexistant et la tension d'arc ne dépasse généralement pas 200 V.

La pression de remplissage de l'ampoule est voisine de la pression atmosphérique.

Le volume de soufflage thermique est compris entre 0,5 et 2 litres.

L'énergie de commande sous 24 kV est inférieure à 100 J.

Toutes ces caractéristiques font que la coupure par auto-expansion est la technologie la plus performante à ce jour. Ses capacités de coupure peuvent être très élevées avec des pressions et des énergies de commande faibles, donc avec une très grande fiabilité.

➤ **Domaines d'application de la coupure par auto-expansion**

Cette technologie, développée pour la coupure des courants de défaut, est bien adaptée à la coupure des courants capacitifs car elle accepte les surintensités et les surtensions. Elle convient aussi à la coupure des courants faiblement inductifs.

Sans moyen auxiliaire, les appareils à expansion thermique ont un PdC et une tension d'emploi limités. L'auto-expansion est donc souvent associée à l'auto-compression à arc tournant ou au pistonnage. Elle est alors utilisée dans les appareils destinés à la MT et même à la HT et ce pour toutes les applications.

Les performances atteintes grâce à l'association de l'expansion thermique et de l'arc tournant sont telles qu'il est envisagé d'utiliser ces techniques pour des disjoncteurs destinés à des applications très contraignantes, par exemple la protection des alternateurs des centrales (forte asymétrie et TTR élevée), ou qui requièrent une grande endurance.

5. La coupure dans le vide

Historique

Les premières recherches et brevets sur les ampoules (interrupteurs) à vide ont été faits par le *California Institute of Technology* vers 1926. Les premières applications industrielles ont été réalisées à la fin des années 1950 lorsque les difficultés technologiques de mise en œuvre furent résolues, notamment la garantie d'un vide poussé pendant au moins vingt ans, ce qui nécessite une étanchéité parfaite de l'ampoule.

Actuellement des appareils intégrant des ampoules à vide sont en service jusqu'à 84 kV le pouvoir de coupure d'un disjoncteur à vide peut atteindre 63 kA.

Propriétés diélectriques du 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.

Le mécanisme à l'origine de la rupture diélectrique dans le vide est lié aux phénomènes d'émission électronique froide, sans effet d'avalanche par ionisation. C'est pourquoi sa tenue diélectrique ne dépend pratiquement plus de la pression dès que celle-ci est inférieure à 10^{-6} bar. Elle dépend alors de la nature des matériaux, de la forme des électrodes (en particulier de la présence d'aspérités) et de la distance inter-électrodes.

L'allure de la courbe donnant la tension de claquage en fonction de la distance intercontacts (Fig. 19.2-21) montre pourquoi le domaine d'application du vide reste limité en tension. En effet, les distances nécessaires pour la tenue diélectrique augmentent très vite dès que la tension dépasse 30 à 50 kV ce qui entraîne des coûts prohibitifs par rapport aux autres technologies. De plus il y a émission de rayons X quand la tension s'élève.

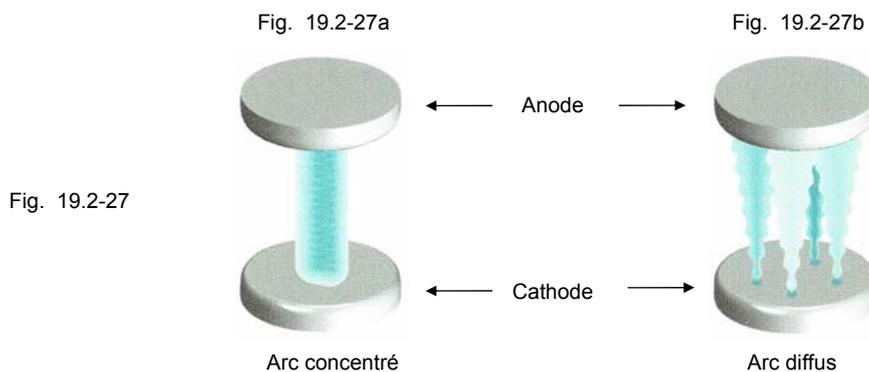
• **Le mécanisme de coupure dans le vide**

La coupure dans le vide est assez particulière à cause des caractéristiques très spécifiques de l'arc dans le vide.

⇒ L'arc électrique dans le vide

La colonne d'arc est composée de vapeurs métalliques et d'électrons provenant des électrodes
L'arc peut avoir deux aspects, concentré ou diffus, selon l'intensité du courant qui le traverse :

- Pour des valeurs élevées du courant ($\geq 10\ 000$ A) l'arc est unique et concentré comme dans les fluides traditionnels (voir figure 19.2-27a). Les taches cathodiques et anodiques de plusieurs mm^2 sont portées à des températures très élevées. Une fine couche du matériau de contact se vaporise et l'arc se développe dans une atmosphère de vapeurs métalliques qui occupe tout l'espace. Lorsque le courant décroît, ces vapeurs se condensent sur les électrodes elles-mêmes ou sur des écrans métalliques disposés à cet effet, dans cette phase, la tension d'arc peut atteindre 200 V.
- 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 (voir figure 19.2-27b). Leurs racines cathodiques appelées spots ont une surface très petite (10^{-5} cm^2) et la densité de courant y est très élevée (10^5 à 10^7 A/cm^2). La très haute température locale (3000 K) entraîne une émission combinée thermoélectronique/effet de champ très intense pour une évaporation de matériau de contact modérée. Le courant est alors essentiellement dû au flux d'électrons. Les ions métalliques positifs produits à la cathode ont une énergie cinétique (entre 30 et 50 eV) telle qu'ils peuvent occuper tout l'espace jusqu'à l'anode. Ainsi ils neutralisent les charges d'espace intercontacts, d'où un faible gradient de potentiel et une faible tension d'arc (80 V au maximum).



⇒ Passage au zéro de courant

En régime d'arc diffus, soit immédiat, soit à la suite d'un arc unique et concentré mais assez longtemps après pour que les vapeurs métalliques aient eu le temps de condenser, la coupure se fait aisément au zéro de courant.

En effet à l'approche du zéro, le nombre de spots diminue jusqu'au dernier qui disparaît quand l'énergie apportée par l'arc n'est plus suffisante pour maintenir une température de pied d'arc assez élevée. L'extinction brutale du dernier spot est à l'origine des phénomènes d'arrachement fréquemment rencontrés avec cette technologie. Il faut noter qu'à l'inversion de la tension, l'anode devient cathode mais froide, elle ne peut pas émettre d'électrons ce qui correspond à une constante de temps de désionisation excessivement petite. Les appareils à vide peuvent par conséquent couper des courants avec des croissances de TTR très rapides ainsi que des courants à haute fréquence.

Pour les courants élevés, il peut rester encore un plasma d'arc au zéro de courant et la coupure devient incertaine. C'est donc essentiellement la densité de vapeur métallique résiduelle qui détermine le PdC.

⇒ Phénomènes de réallumages et de reclaquages

Ils se produisent lorsque les contacts dégagent trop de vapeurs métalliques. On considère que si la densité de vapeur après le zéro de courant dépasse $10^{22}/m^3$, la probabilité de coupure est quasiment nulle.

De manière générale, ces phénomènes sont peu reproductibles et difficiles à modéliser.

De nombreux essais sont nécessaires pour valider les conceptions. En particulier, on peut observer des défaillances diélectriques tardives après coupure, éventuellement fugitives, liées à la présence de particules ou de condensats de métal

• **Les différentes technologies de coupure dans le vide**

Tous les constructeurs ont été confrontés aux mêmes exigences :

- réduire le phénomène d'arrachement de courant pour limiter les surtensions,
- éviter l'érosion précoce des contacts pour obtenir une endurance élevée,
- retarder l'apparition du régime d'arc concentré pour augmenter le PdC,
- limiter la production de vapeurs métalliques pour éviter les reclaquages,
- conserver le vide, indispensable pour garder les performances de coupure, pendant la durée de vie de l'appareil.

Leurs développements ont porté principalement sur deux axes : la composition des matériaux de contact et le contrôle de l'arc par un champ magnétique.

⇒ Choix du champ magnétique

Deux types de champs magnétiques sont utilisés : radial ou axial.

- La technologie du champ magnétique radial

Cette technologie est illustrée par la figure ci-dessous :

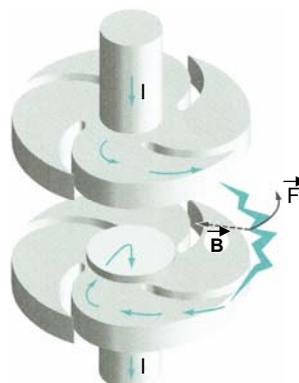


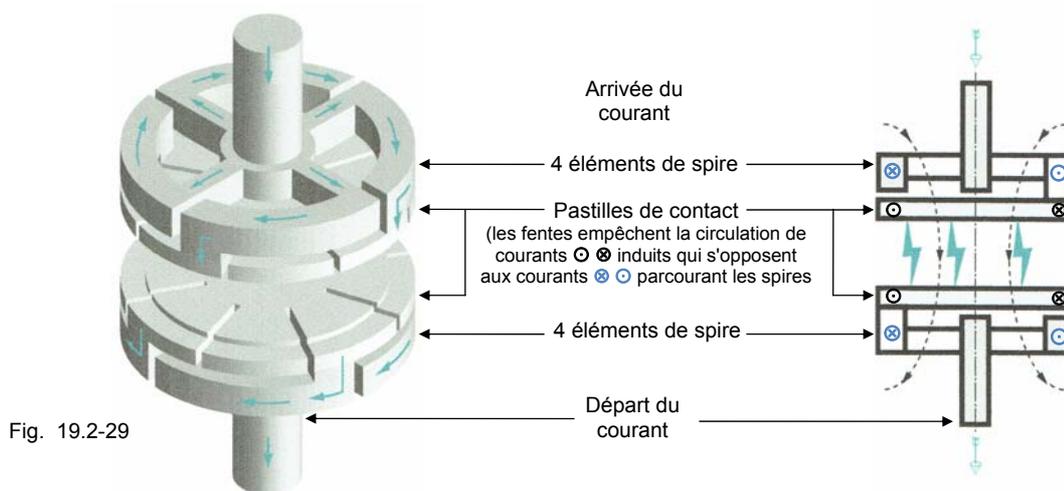
Fig. 19.2-28

Le champ est créé par le courant qui circule dans les électrodes conçues à cet effet. L'arc obéit aux lois de l'électromagnétisme, il se déplace donc du centre vers l'extrémité des « pétales » puis tourne à la périphérie des électrodes. En cas d'arc concentré les racines d'arc se déplacent en un mouvement circulaire, la chaleur se répartit uniformément ce qui limite l'érosion et la densité de vapeurs métalliques. Lorsque l'arc est diffus, les spots se déplacent librement sur la surface de la cathode comme si c'était un disque solide.

Les formes d'électrodes assez complexes qu'entraîne cette technologie rendent la tenue diélectrique entre électrodes plus difficile.

- La technologie du champ magnétique axial.

Cette technologie est illustrée par la figure suivante :



L'application d'un champ magnétique axial impose aux électrons et aux ions une trajectoire hélicoïdale le long des lignes de champ magnétique qui stabilise l'arc diffus et empêche l'apparition du régime concentré. L'apparition de la tâche anodique est ainsi évitée et l'érosion reste limitée, ce qui permet d'atteindre des pouvoirs de coupure élevés.

Ce champ magnétique peut être généré par des spires internes ou externes à l'ampoule, parcourues en permanence par le courant. Internes, les spires doivent être protégées de l'arc. Externes, ce risque est supprimé, mais dans ce cas leurs dimensions plus importantes augmentent les pertes thermiques et imposent des limites dues au risque d'échauffement.

⇒ Choix des matériaux

Afin de préserver la qualité du vide, il est indispensable que les matériaux utilisés pour les contacts et les surfaces en contact avec le vide soient très purs et exempts de gaz.

Le matériau des contacts est important car la pression de vapeur saturante dans l'ampoule ne doit être, ni trop élevée, ni trop faible :

- Une pression de vapeurs métalliques élevée permet de stabiliser l'arc et de limiter le phénomène d'arrachement de courant (surtensions).
- A l'inverse, une pression faible de vapeurs métalliques est plus favorable à l'interruption des courants élevés.

Il faut en outre que sa résistivité soit réduite, qu'il ait une faible propension à souder et une bonne tenue mécanique.

Les contacts en alliage cuivre/chrome (50-80% Cu, 50-20% Cr) sont majoritairement employés dans les disjoncteurs du fait de leur résistance à l'érosion, de leur faible résistivité et de leur faible pression de vapeur.

D'autres matériaux comme le cuivre/bismuth (98% Cu, 2% Bi) ou plus récemment Ag/W/C sont utilisés dans les appareils à grande cadence de manœuvres (type contacteurs) car ils ne provoquent pas d'arrachement et ont une faible propension à souder.

En ce qui concerne les autres éléments en contact avec le vide, les matériaux céramiques associés avec le processus de brasage à haute température sont, pour le moment, les plus appropriés pour maintenir un niveau de vide poussé (pression usuelle inférieure à 10^{-6} mbar).

⇒ Conception de l'enceinte et du dispositif de coupure

La contrainte essentielle est celle de l'étanchéité de l'ampoule à vide : par exemple, les pièces mobiles traversantes doivent être évitées.

La sensibilité aux particules et la possibilité de soudure à froid font que les contacts glissants ne sont pas utilisés dans le vide. En conséquence, les contacts sont simplement bout à bout et l'énergie de manœuvre pour de tels appareils est donc faible (30 à 50 J). En contrepartie, les pressions de contact doivent être élevées pour minimiser la résistance de contact et éviter la séparation des contacts lors du passage d'un courant de court-circuit. Ces pressions de contact nécessaires imposent des contraintes mécaniques élevées.

Compte tenu des distances d'isolement dans le vide qui sont petites, et des mécanismes qui sont simples, les ampoules peuvent être très compactes. Leur volume est alors fonction du PdC (diamètre de l'ampoule) mais c'est la tenue diélectrique externe à l'ampoule qui devient prépondérante pour définir l'encombrement de l'appareil.

Cette technologie est maintenant bien maîtrisée par les grands constructeurs dont les appareils ont une espérance de vie supérieure à 20 ans. Il faut cependant noter que le contrôle permanent en exploitation du vide n'est pas possible car il nécessite la mise hors tension de l'équipement et un appareil de mesure adapté.

La maintenance prédictive nécessaire, en cas de fuite accidentelle, pour veiller à la fiabilité des tableaux électriques MT n'est donc pas applicable avec cette technologie.

Exemple d'ampoule à vide pour disjoncteur à moyenne tension



Fig. 19.2-30

⇒ Les domaines d'application de la coupure dans le vide

Cette technique de coupure permet aujourd'hui la réalisation d'appareils ayant une grande endurance électrique avec des TTR à front de montée très raides.

C'est en Moyenne Tension que cette technique est la plus employée : des disjoncteurs d'usage général sont maintenant disponibles pour les différentes applications avec tous les pouvoirs de coupure habituels (jusqu'à 63 kA). Ils sont utilisés pour la protection et la commande :

- des câbles et des lignes aériennes,
- des transformateurs,
- des condensateurs en batterie unique,
- des moteurs et inductances shunt.

Ils sont particulièrement adaptés à la commande des fours à arc (haute endurance électrique) mais doivent être utilisés avec précaution pour la commande de gradins de condensateurs en parallèle.

Cette technique est aussi utilisée pour les contacteurs qui requièrent une grande endurance, rarement pour les interrupteurs pour des raisons économiques.

Remarques :

- Pour la coupure des courants capacitifs, dans le vide la tenue diélectrique post-coupure est aléatoire, et se traduit par un risque de réamorçage important. De fait les disjoncteurs à vide sont mal adaptés à la protection de réseaux capacitifs de tensions supérieures à 12 kV ou comportant des batteries de condensateurs.
- Avec des interrupteurs à contacts dans le vide il y a un risque de soudure des contacts, en particulier après une fermeture sur court-circuit.
C'est le cas dans certaines opérations d'exploitation, par exemple pour repérer un défaut, ou en cycle d'essais normatif. En effet, lors d'une ouverture hors charge, l'absence d'arc ne permet pas d'éliminer les aspérités laissées par la rupture de la soudure, soudure réalisée lors de la fermeture en charge. Cette détérioration de l'état de surface facilite encore le préamorçage lors de fermetures successives et amplifie l'importance des soudures, avec le risque d'une soudure définitive.
L'emploi de ces interrupteurs exige donc quelques précautions.
- Pour la commande des moteurs, il faut prendre des précautions particulières du fait que les disjoncteurs ou contacteurs à vide coupent les courants de haute fréquence (phénomènes de réallumage) et ainsi sont à l'origine de surtensions. Bien qu'il existe des appareils spécifiques, il est préférable de prévoir de parasurtenseurs de type ZnO.

6. Comparaison des différentes techniques

Aujourd'hui, dans le domaine de la BT, la coupure magnétique dans l'air est, sauf quelques rares cas particuliers, la seule employée.

En THT, la technique de coupure dans le SF₆ est pratiquement la seule mise en œuvre.

Pour la MT, où toutes les techniques peuvent être utilisées, celles de la coupure dans le SF₆ et dans le vide ont remplacé celles dans l'air pour des raisons de coût et d'encombrement, et celles dans l'huile pour des raisons de fiabilité, de sécurité et de réduction de maintenance.

Les techniques de coupure dans le vide ou dans le SF₆ ont des performances comparables et leurs qualités respectives font que l'une ou l'autre est plus adaptée à certaines applications.

Selon les pays, l'une ou l'autre de ces techniques est majoritairement employée essentiellement pour des raisons historiques ou de choix de constructeurs.

Tableau comparatif des performances des principales techniques de coupure.

	Huile	Air	SF ₆ /Vide
Sécurité	Risque d'explosion et d'incendie si l'augmentation de pression (manœuvres multiples) produit une défaillance.	Manifestations extérieures importantes (émissions de gaz chauds et ionisés lors des coupures).	Pas de risque d'explosion, ni de manifestations extérieures
Encombrement	Volume de l'appareil relativement important	Installation nécessitant de grandes distances. (coupure non confinée).	Faible.
Entretien	Remplacement périodique de l'huile (décomposition irréversible de l'huile à chaque coupure).	Remplacement des contacts d'arc si possible. Entretien périodique de la commande.	Nul sur les éléments de coupure. Lubrification minimale des mécanismes de commande.
Sensibilité à l'environnement	Le milieu de coupure peut être altéré par l'environnement (humidité, poussières...).		Non sensibles : ampoule de type scellée à vie.
Coupure en cycle rapide	Le temps de diminution de pression, long, nécessite de déclasser le PdC s'il y a un risque de coupures successives.	L'évacuation de l'air chaud très lente nécessite un déclassement du PdC.	Le SF ₆ et le vide recouvrent très rapidement leurs propriétés diélectriques : pas de déclassement.
Endurance	Médiocre	Moyenne	Excellente