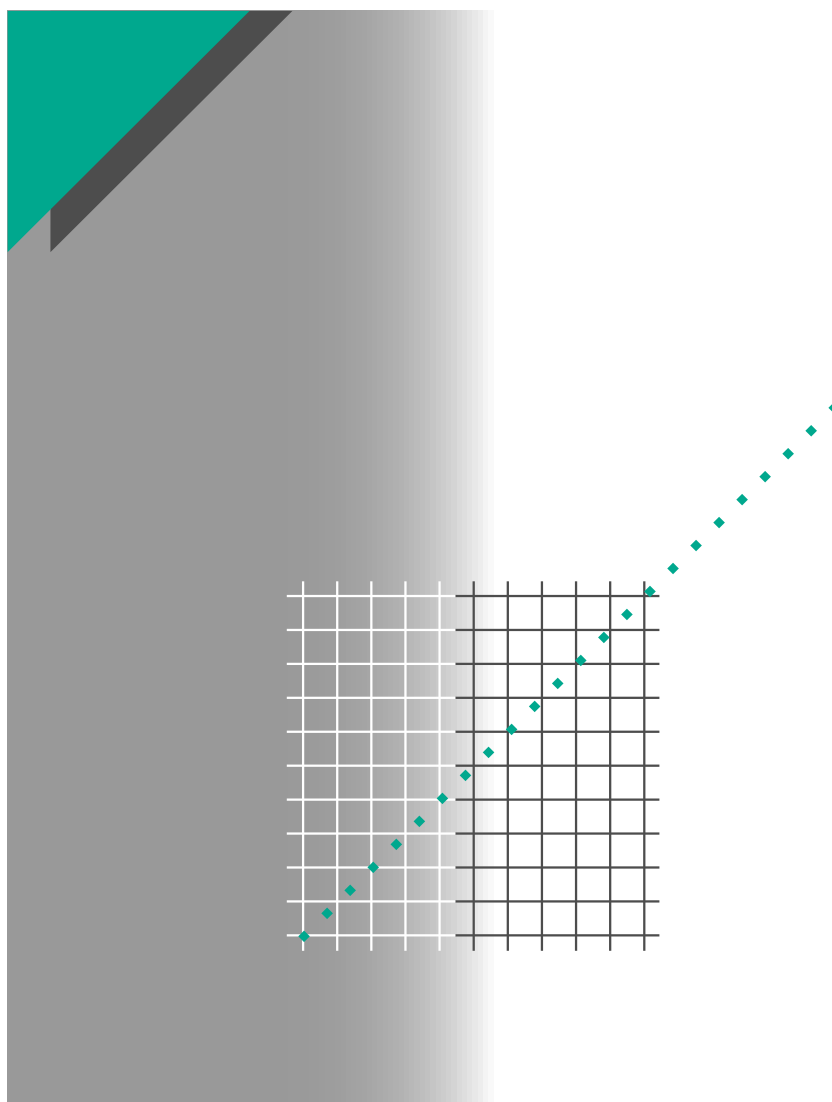


Cahier technique n° 193

Les techniques de coupure en MT



S. Théoleyre



GROUPE SCHNEIDER

Les Cahiers Techniques constituent une collection d'une centaine de titres édités à l'intention des ingénieurs et techniciens qui recherchent une information plus approfondie, complémentaire à celle des guides, catalogues et notices techniques.

Les Cahiers Techniques apportent des connaissances sur les nouvelles techniques et technologies électrotechniques et électroniques. Ils permettent également de mieux comprendre les phénomènes rencontrés dans les installations, les systèmes et les équipements.

Chaque Cahier Technique traite en profondeur un thème précis dans les domaines des réseaux électriques, protections, contrôle-commande et des automatismes industriels.

Les derniers ouvrages parus peuvent être téléchargés sur Internet à partir du site Schneider.

Code : <http://www.schneider-electric.com>

Rubrique : **maîtrise de l'électricité**

Pour obtenir un Cahier Technique ou la liste des titres disponibles contactez votre agent Schneider.

La collection des Cahiers Techniques s'insère dans la « Collection Technique » du groupe Schneider.

Avertissement

L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas reproduits dans le présent ouvrage, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni de conséquences liées à la mise en œuvre des informations et schémas contenus dans cet ouvrage.

La reproduction de tout ou partie d'un Cahier Technique est autorisée après accord de la Direction Scientifique et Technique, avec la mention obligatoire : « Extrait du Cahier Technique Schneider n° (à préciser) ».

n° 193

Les techniques de coupure en MT



Serge THEOLEYRE

De formation scientifique, diplômé Docteur-Ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Electriciens de Grenoble en 1983, il entre en 1984 dans le Groupe Schneider. Il est tout d'abord responsable de la recherche et du développement puis du marketing pour l'activité Condensateurs de puissance.

Depuis 1995, il a la responsabilité des actions du Groupe Schneider dans les domaines de la normalisation et de la communication technique au sein du Domaine d'Activité Transport et Distribution de l'énergie électrique (HT/MT).

Lexique

 U_r :

Tension assignée correspondant à la valeur efficace de la tension que l'appareil doit être capable de supporter indéfiniment dans des conditions prescrites d'emploi et de fonctionnement.

 I_{cc} :

Courant de court-circuit.

 I_r :

Courant assigné correspondant à la valeur efficace du courant que l'appareil doit être capable de supporter indéfiniment dans des conditions prescrites d'emploi et de fonctionnement.

Appareil de connexion :

Appareil destiné à établir ou interrompre le courant dans un circuit électrique.

Appareillage :

Terme général applicable aux appareils de connexion et à leur combinaison avec des appareils de commande, de mesure, de protection et de réglage qui leur sont associés.

Constante de temps de désionisation :

Temps nécessaire à la résistance d'arc pour doubler de valeur en admettant que sa vitesse de variation reste constante.

Court-circuit :

Connexion accidentelle ou intentionnelle par une résistance ou une impédance relativement faible, de deux ou plusieurs points d'un circuit se trouvant normalement à des tensions différentes.

Défaut :

Modification accidentelle affectant le fonctionnement normal.

Défaut à la terre :

Défaut dû à la mise en contact directe ou indirecte d'un conducteur avec la terre ou à la diminution de sa résistance d'isolement à la terre au-dessous d'une valeur spécifiée.

Facteur de surtension :

Rapport de la valeur crête de la surtension à la valeur crête de la tension maximale de la tension admise par l'appareil.

Pouvoir de coupure (PdC) :

Courant présumé qu'un appareil de connexion doit être capable d'interrompre dans des conditions prescrites d'emploi et de comportement.

Réallumage :

Rétablissement du courant entre les contacts d'un appareil mécanique de connexion lors d'une manœuvre de coupure, **avant** un quart de période après le zéro de courant.

Réamorçage :

Rétablissement du courant entre les contacts d'un appareil mécanique de connexion lors d'une manœuvre de coupure, **après** un quart de période après le zéro de courant.

Surtension :

Toute tension entre un conducteur de phase et la terre ou le neutre, ou entre deux conducteurs de phase dont la valeur de crête dépasse la valeur de crête correspondant à la tension la plus élevée pour le matériel.

Tension transitoire de rétablissement - TTR - :

Tension de rétablissement entre les contacts de l'appareil de connexion pendant le temps où elle présente un caractère transitoire appréciable.

Valeur assignée :

Valeur d'une grandeur fixée généralement par le constructeur pour un fonctionnement spécifié d'un composant, dispositif ou matériel.

Les techniques de coupure en MT

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

L'objet de ce Cahier Technique est de faire mieux connaître les avantages, les inconvénients et les domaines d'utilisation des anciennes et nouvelles techniques de coupure en Moyenne Tension.

Après avoir caractérisé les courants à couper et la coupure sur un plan théorique, l'auteur présente la coupure dans l'air, l'huile, le vide et le SF₆, et termine par deux tableaux comparatifs.

Aujourd'hui, la solution reste la coupure grâce à l'arc électrique que ce soit dans le SF₆ ou dans le vide ; elle nécessite une expertise que ce Cahier Technique vous invite à partager.

Sommaire

1 Introduction		p. 4
2 La coupure des courants de charge et de défaut	2.1 Principe de la coupure	p. 6
	2.2 La coupure des courants de charge	p. 9
	2.3 La coupure des courants de défaut	p. 13
3 Les techniques de coupure	3.1 Le milieu de coupure	p. 17
	3.2 La coupure dans l'air	p. 18
	3.3 La coupure dans l'huile	p. 19
	3.4 La coupure dans le vide	p. 21
	3.5 La coupure dans le SF ₆	p. 24
	3.6 Comparaison des différentes techniques	p. 29
	3.7 Quelles possibilités pour d'autres techniques ?	p. 30
4 Conclusion		p. 31
Bibliographie		p. 32

1 Introduction

Depuis les centrales de production, l'énergie électrique est acheminée jusqu'aux points de consommation par un réseau électrique schématisé sur la **figure 1**.

Il est indispensable de pouvoir couper le courant en tout point du réseau pour des raisons d'exploitation et de maintenance ou pour protéger le réseau lorsqu'il y a un défaut. Il faut également pouvoir le rétablir dans diverses situations normales ou de défaut.

Pour cela on emploie des appareils de déconnexion dont le choix dépend de la nature des courants à couper et du domaine d'application (cf. **fig. 2**). Ces courants peuvent être classés en trois catégories :

- Courants de charge, par principe inférieurs ou égaux au courant assigné I_r . Le courant assigné I_r est la valeur efficace du courant que le matériel doit être capable de supporter indéfiniment dans des conditions prescrites d'emploi et de fonctionnement.

- Courant de surcharge, lorsque le courant dépasse sa valeur assignée.

- Courant de court-circuit, lors d'un défaut sur le réseau, dont la valeur dépend de la puissance de la source, du type de défaut et des impédances amont du circuit.

De plus, que ce soit à l'ouverture, à la fermeture ou en service continu, tous ces appareils sont soumis à des contraintes :

- diélectriques (tension),

- thermiques (courants normaux et courants de défaut),

- électrodynamiques (courant de défaut),

- mécaniques.

Les contraintes les plus importantes sont liées aux phénomènes transitoires qui interviennent lors des manœuvres et lors des coupures avec arc électrique de courants de défaut. Cet arc a un comportement difficile à prédéterminer malgré les techniques actuelles de modélisation.

L'expérience, le savoir-faire et l'expérimentation contribuent donc toujours et dans une large mesure à la conception des appareils de coupure. Ces appareils sont dits « électromécaniques » car, aujourd'hui encore, la coupure statique en moyenne et haute tension n'est pas technico-économiquement envisageable. Et, parmi tous les appareils de déconnexion les disjoncteurs sont les plus intéressants car ils sont capables d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans des conditions normales et anormales (court-circuit). Dans ce Cahier Technique, nous traiterons donc principalement de la coupure du courant alternatif par disjoncteur.

Le domaine de tension considéré est celui de la Moyenne Tension (1 k - 52 kV), car c'est dans ce niveau de tension qu'il existe le plus grand nombre de techniques de coupure.

L'étude des phénomènes apparaissant lors de la coupure et de la fermeture constitue la première partie de ce document.

La deuxième partie présente les quatre types de techniques de coupure actuellement les plus répandues, à savoir les techniques de coupure dans l'air, l'huile, le vide et le SF₆.

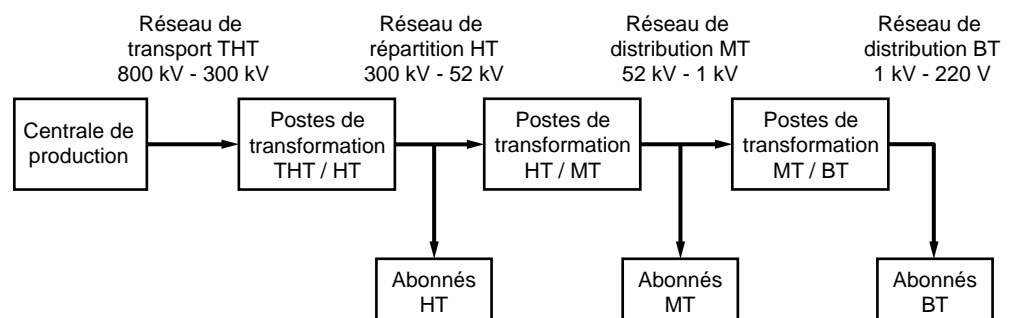








Fig. 1 : schéma d'un réseau électrique.

	■ Définition CEI ■ Fonction	Fermer			Ouvrir			Isoler
								
Sectionneur	<ul style="list-style-type: none"> ■ Appareil mécanique de connexion qui assure, en position d'ouverture une distance de sectionnement satisfaisant à des conditions spécifiées. ■ Destiné à assurer l'isolement de sécurité d'un circuit, il est souvent associé à un sectionneur de terre. 	oui	non	oui <input type="checkbox"/>	oui	non	non	oui
Sectionneur de mise à la terre	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sectionneur spécial conçu pour raccorder des conducteurs de phase à la terre. ■ Destiné à la sécurité en cas d'intervention sur les circuits, il relie les conducteurs actifs hors tension à la terre. 	oui	non	oui <input type="checkbox"/>	oui	non	non	non
Interrupteur	<ul style="list-style-type: none"> ■ Appareil mécanique de connexion capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales du circuit y compris éventuellement les courants de surcharge en service. ■ Destiné à la commande (ouverture et fermeture) des circuits, il est souvent prévu pour assurer la fonction sectionnement. Sur les réseaux MT de distribution publique et privée il est fréquemment associé à des fusibles. 	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui <input type="checkbox"/>
Contacteur	<ul style="list-style-type: none"> ■ Appareil mécanique de connexion ayant une seule position de repos, commandé autrement qu'à la main, capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales du circuit y compris les conditions de surcharge de service. ■ Prévu pour fonctionner très fréquemment, il est principalement destiné à la commande de moteurs. 	oui	oui	oui	oui	oui	non	non
Disjoncteur	<ul style="list-style-type: none"> ■ Appareil mécanique de connexion capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales du circuit et dans les conditions anormales spécifiées du circuit telles que celles du court-circuit. ■ Appareil de connexion d'usage général. Outre la commande de circuits il assure leur protection contre les défauts électriques. Il remplace les contacteurs pour la commande des gros moteurs MT. 	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non

 = à vide
 = en charge
 = court-circuit
 = selon les cas

Fig. 2 : les différents appareils de connexion, leurs fonctions et leurs applications.

2 La coupure des courants de charge et de défaut

2.1 Principe de la coupure

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

L'interrupteur idéal

En théorie, pouvoir interrompre instantanément un courant c'est être capable de passer directement de l'état conducteur à l'état isolant. La résistance d'un tel interrupteur « idéal » doit donc passer immédiatement de zéro à l'infini, (cf. **fig. 3**).

Cet appareil devrait être capable :

- d'absorber toute l'énergie électromagnétique accumulée dans le circuit avant la coupure, soit, en cas de court-circuit, $\frac{1}{2} Li^2$ du fait de la nature selfique des réseaux ;

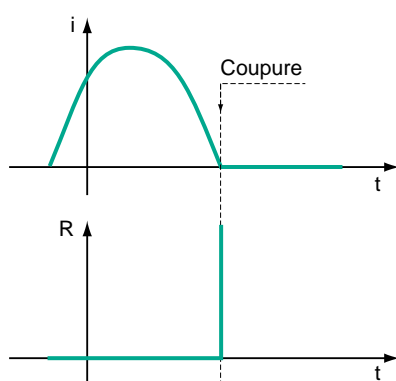
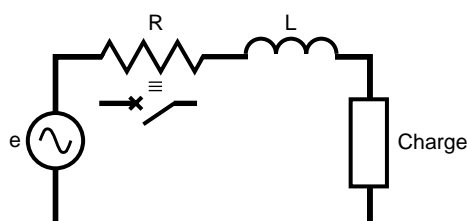


Fig. 3 : coupure réalisée par un interrupteur idéal.

- de supporter la surtension (Ldi/dt) qui apparaît à ses bornes et aurait une valeur infinie si le passage isolant-conducteur se faisait en un temps infiniment petit, ce qui conduirait inévitablement au claquage diélectrique.

En imaginant que ces difficultés soient éliminées en réalisant une synchronisation parfaite entre le passage naturel à zéro du courant, et la transition isolant-conducteur de l'appareil un autre phénomène tout aussi délicat doit être surmonté, celui de la tension transitoire de rétablissement (TTR).

En effet, juste après l'interruption du courant, la tension (de rétablissement) au bornes de l'interrupteur rejoint la tension du réseau qui est maximale à cet instant là pour les circuits inductifs. Ceci se fait sans discontinuité brutale du fait des capacités parasites du réseau. Un régime transitoire s'établit alors assurant le raccordement de la tension à celle du réseau. Cette tension appelée tension transitoire de rétablissement (TTR) dépend des caractéristiques du réseau et sa vitesse de croissance (dv/dt) peut être considérable (de l'ordre du $kV/\mu s$). En simplifiant cela signifie que, pour éviter l'échec de la coupure, l'interrupteur idéal doit pouvoir supporter plusieurs kV moins d'une micro seconde après la transition conducteur-isolant.

Couper avec l'arc électrique

Deux raisons expliquent l'existence d'un arc :

- Il est quasiment impossible de séparer les contacts très exactement au zéro naturel de courant du fait de l'incertitude mesure-commande : pour une valeur efficace de 10 kA, le courant instantané 1 ms avant d'atteindre son zéro vaut encore 3000 A. La surtension instantanée Ldi/dt qui apparaîtrait aux bornes de l'appareil si celui-ci devenait immédiatement isolant serait infinie et entraînerait le claquage immédiat de l'espace intercontacts encore faible.

- La séparation des contacts doit se faire à une vitesse suffisante pour que la tenue diélectrique entre les contacts soit supérieure à la tension transitoire de rétablissement. Cela nécessite une énergie mécanique proche de l'infini qu'en pratique aucun appareil ne peut fournir.

Examinons le processus de coupure avec un arc électrique. Il est constituée de trois périodes :

- la période d'attente,
- la période d'extinction,
- la période post-arc.

■ La période d'attente :

Avant le zéro de courant, les deux contacts se séparent provoquant la rupture diélectrique du milieu intercontacts. L'arc qui apparaît est constitué d'une colonne de plasma composée d'ions et d'électrons provenant du milieu intercontacts ou des vapeurs métalliques dégagées par les électrodes (cf. **fig. 4**). Cette colonne reste conductrice tant que sa température est suffisamment élevée. L'arc est ainsi « entretenu » par l'énergie qu'il dissipe par effet Joule.

La tension qui apparaît entre les deux contacts du fait de la résistance de l'arc et des chutes de tension de surface (tensions cathodique et anodique) s'appelle la tension d'arc (U_a). Sa valeur, qui dépend de la nature de l'arc, est influencée par l'intensité du courant et par les échanges thermiques avec le milieu (parois, matériaux...). Ces échanges thermiques qui se font par rayonnement, convection et conduction sont caractéristiques de la puissance de refroidissement de l'appareil.

Le rôle de la tension d'arc est essentiel car elle conditionne la puissance dissipée dans l'appareil

$$\text{au cours de la coupure : } W = \int_{t_0}^{t_{\text{arc}}} U_a \cdot i dt$$

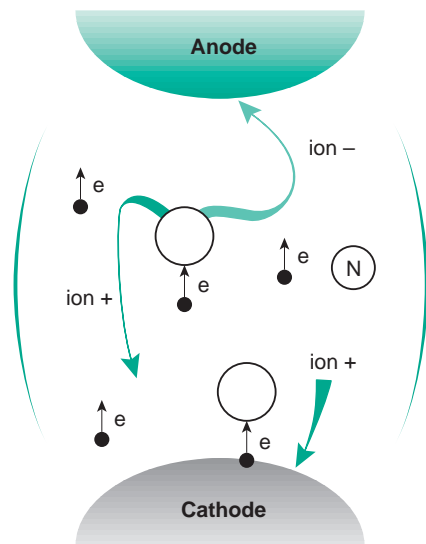


Fig. 4 : composition d'un arc électrique dans un milieu gazeux.

où t_0 est l'instant d'initiation de l'arc et t_{arc} est l'instant de la coupure.

En moyenne tension et haute tension, elle reste toujours très inférieure aux tensions de réseau et n'a donc pas d'effet limiteur, sauf artifices particuliers développés plus loin. La coupure se fait donc au voisinage du zéro « naturel » du courant alternatif.

■ La période d'extinction

L'interruption du courant qui correspond à l'extinction de l'arc se fait au zéro de courant à condition que le milieu redevienne rapidement isolant. Pour cela, le canal de molécules ionisées doit être cassé. Le processus d'extinction se fait de la manière suivante. Au voisinage du zéro de courant, la résistance de l'arc augmente selon une courbe qui dépend principalement de la constante de temps de désionisation du milieu intercontacts (cf. **fig. 5**).

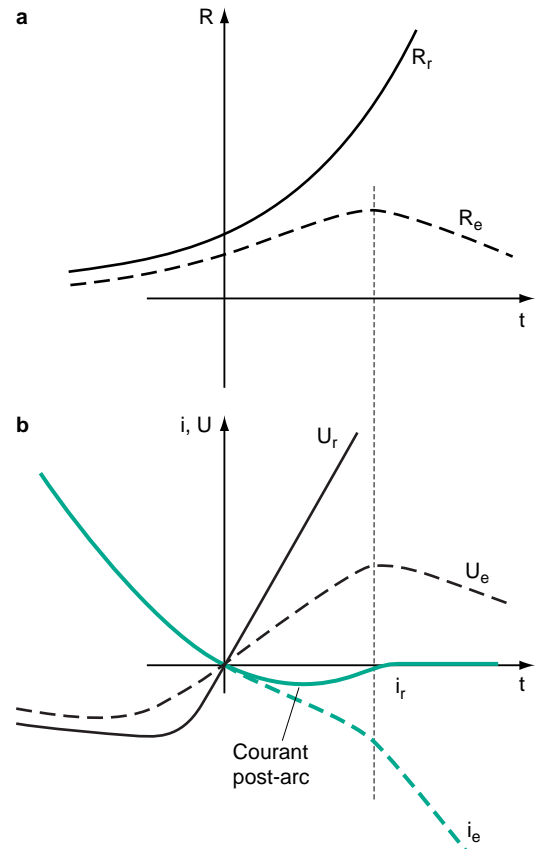


Fig. 5 : évolution de la résistance d'arc [a] et de la tension et du courant [b] pendant la période d'extinction, en cas de coupure réussie (r) ou d'échec thermique (e).

Au zéro de courant, cette résistance a une valeur qui n'est pas infinie et un courant post-arc traverse encore l'appareil du fait de la tension transitoire de rétablissement qui apparaît à ses bornes.

Si la puissance dissipée par effet joule dépasse la puissance de refroidissement caractéristique de l'appareil, le milieu ne se refroidit plus, c'est l'emballement thermique suivi d'une nouvelle rupture diélectrique : c'est un échec thermique.

Si en revanche la croissance de la tension n'excède pas une certaine valeur critique, la résistance de l'arc peut augmenter suffisamment vite pour que la puissance dissipée dans le milieu reste inférieure à la puissance de refroidissement de l'appareil évitant ainsi l'emballement thermique.

■ La période post-arc

Pour que la coupure soit réussie, il faut également que la vitesse de régénération diélectrique soit plus rapide que celle de la TTR (cf. **fig. 6**) sinon un claquage diélectrique apparaît.

A l'instant où se produit la rupture diélectrique, le milieu redevient conducteur, ce qui génère des phénomènes transitoires qui seront exposés plus en détail plus loin.

Ces échecs diélectriques post-coupure sont appelés :

- réallumages, s'ils ont lieu dans le quart de période qui suit le zéro de courant,
- réamorçages, s'ils se produisent après.

■ La TTR dans les normes

Bien que la vitesse de croissance de la TTR a un rôle fondamental sur les capacités de coupure des appareils, sa valeur ne peut être déterminée précisément pour toutes les configurations de réseau. La norme CEI 60056 définit pour chaque tension nominale une valeur enveloppe qui correspond aux besoins normalement rencontrés (cf. **fig. 7**).

Le pouvoir de coupure d'un disjoncteur est alors défini, à sa tension assignée et avec la TTR

assignée correspondante, comme la valeur la plus élevée du courant qu'il peut couper. Un disjoncteur doit donc être capable de couper tout courant inférieur à son PdC pour toute TTR dont la valeur est inférieure à la TTR assignée.

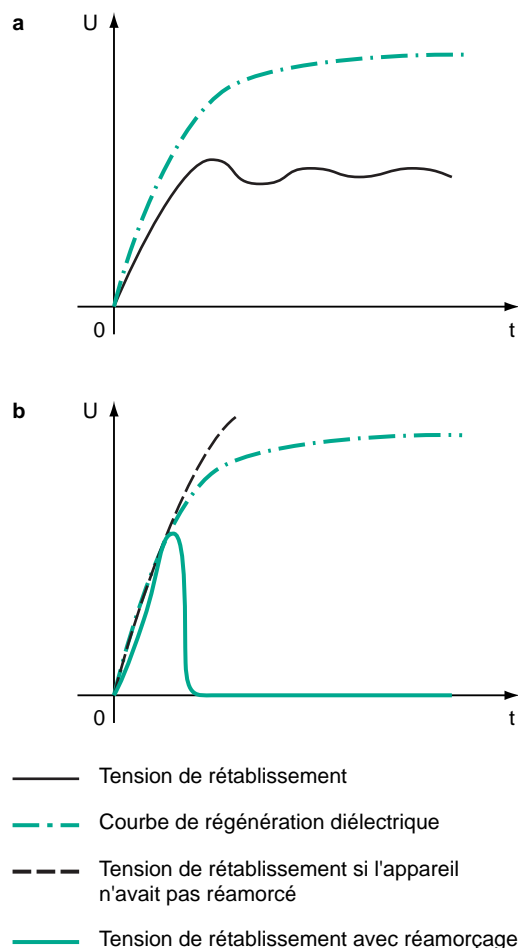


Fig. 6 : courbes de régénération diélectrique, coupure réussie [a] ou échec diélectrique [b].

Tension assignée (U_r en kV)	7,2	12	17,5	24	36	52
Valeur crête de la TTR (U_c en kV)	12,3	20,6	30	41	62	89
Temps t_3 (en μ s)	52	60	72	88	108	132
Vitesse d'accroissement (U_c / t_3)	0,24	0,34	0,42	0,47	0,57	0,68

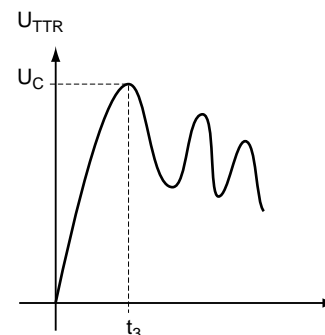


Fig. 7 : tension transitoire de rétablissement - TTR - assignée en cas de court-circuit aux bornes d'un disjoncteur (§ 4.102 de la norme CEI 60056).

2.2 La coupure des courants de charge

En exploitation normale, en MT, la coupure d'un circuit se fait :

- sur un courant de charge de quelques ampères à quelques centaines d'ampères, faible par rapport au courant de court-circuit (de 10 à 50 kA) ;

- avec un facteur de puissance supérieur ou égal à 0,8. Le déphasage entre la tension du circuit électrique et le courant est petit et le minimum de tension se produit aux alentours du minimum de courant (circuit fortement résistif).

La tension aux bornes de l'appareil de coupure s'établit alors, à la tension du réseau, quasiment sans phénomène transitoire (cf. **fig. 8**).

Dans de telles conditions, la coupure se fait au passage du zéro de courant, sans difficulté, puisque l'appareil est dimensionné pour des courants élevés en quadrature avec la tension.

La coupure des courants inductifs

- L'arrachement de courant

La coupure de courants inductifs peut donner lieu à des surtensions provoquées par la coupure précoce du courant, c'est le phénomène « arrachement de courant ».

Pour des courants inductifs faibles (quelques ampères à quelques dizaines d'ampères), la capacité de refroidissement des appareils dimensionnés pour le courant de court-circuit est très élevée par rapport à l'énergie dissipée dans l'arc. Cela engendre une instabilité de l'arc et un

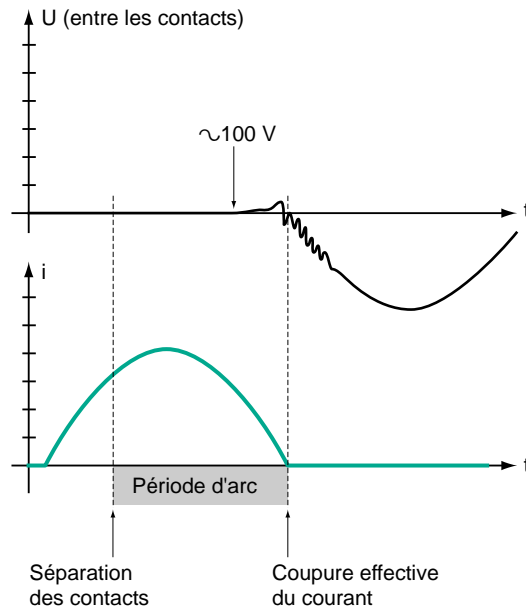
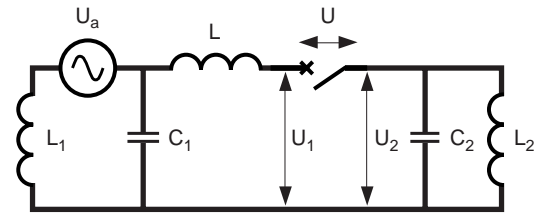


Fig. 8 : les phénomènes transitoires sont très faibles lors de la coupure d'un courant d'une charge résistive.

phénomène d'oscillation apparaît lié aux échanges d'énergie entre les capacités « vues » par l'organe de coupure et les inductances (cf. **fig. 9** et **fig. 10**). Pendant cette oscillation à haute fréquence (de l'ordre de 1 MHz) des passages à zéro du courant sont possibles et le disjoncteur peut interrompre ce courant avant le passage normal à zéro à la fréquence industrielle (50 Hz).

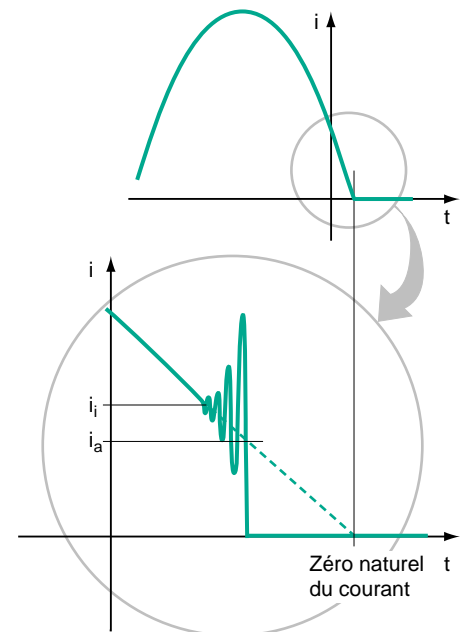


L_1, C_1 = inductance et capacité amont (source d'alimentation),

L_2, C_2 = inductance et capacité aval (primaire de transformateur),

L = inductance de liaison amont au disjoncteur D (jeu de barres ou câbles).

Fig. 9 : schéma d'un circuit lors de la coupure d'un faible courant inductif.



i = courant dans le disjoncteur,

i_i = valeur du courant conduisant à l'instabilité,

i_a = valeur du courant arraché.

Fig. 10 : phénomène d'oscillations à haute fréquence ou « d'arrachement de courant » lors de la coupure d'un courant inductif.

Ce phénomène « d'arrachement de courant » s'accompagne d'une surtension transitoire principalement due au régime oscillatoire qui s'établit du côté de la charge (cf. **fig. 11**). La valeur maximale de la surtension (U_{Cmax}) côté charge peut être donnée par l'équation suivante :

$$U_{Cmax}^2 = u_a^2 + \left[\frac{\eta_m \cdot L_2 \cdot i_a^2}{C_2} \right]$$

dans laquelle :

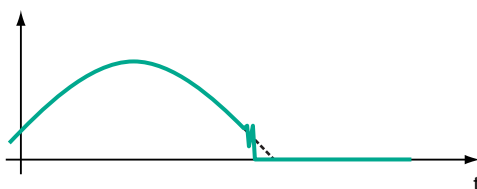
u_a = tension d'arrachement,

i_a = courant arraché,

η_m = rendement magnétique.

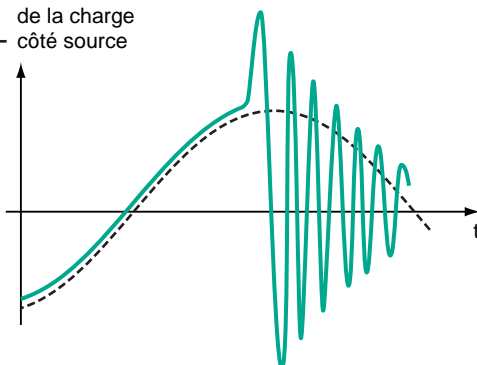
Du côté alimentation, la valeur de la tension est égale à la valeur de la tension arrachée et tend

Courant à couper



Tensions

— aux bornes de la charge
 - - - côté source



Tensions

— aux bornes du disjoncteur
 - - - de la source

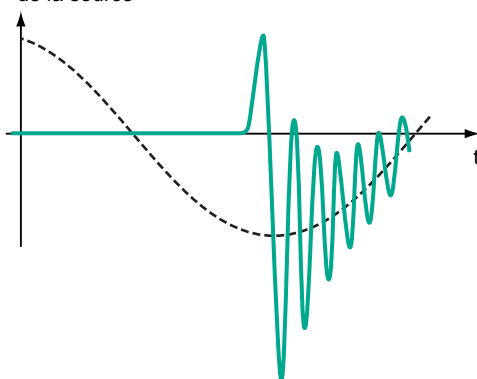


Fig. 11 : courbes de courant et de tension lors de la coupure de faibles courants inductifs.

vers la tension du réseau U_n avec un régime oscillatoire qui dépend de C_1 et de L_1 . La valeur de la tension entre les contacts du disjoncteur est égale à la différence entre ces deux tensions. Ces relations mettent bien en évidence l'influence des caractéristiques du réseau sachant que le courant arraché dépend fortement de C_1 et de l'appareil concerné.

■ Réallumages

Un autre phénomène peut conduire à des surtensions importantes. Ce sont les réallumages à l'ouverture.

D'une manière générale un réallumage est inévitable pour des durées d'arc courtes car la distance entre contact n'est pas suffisante pour supporter la tension qui apparaît aux bornes de l'appareil. C'est le cas chaque fois qu'un arc apparaît peu de temps avant le passage à zéro du courant.

La tension côté charge rejoint alors la tension côté alimentation avec un régime transitoire oscillatoire à haute fréquence (de l'ordre de 1 MHz). La valeur crête de l'oscillation déterminée par la tension de charge des capacités parasites aval est alors double de la valeur précédente.

Si le disjoncteur est apte à couper les courants haute fréquence, il parviendra à couper au premier passage au zéro de courant, quelques micro-secondes après le réallumage. Un nouveau réallumage est très probable du fait de l'augmentation de l'amplitude de l'oscillation et le phénomène se répète provoquant une escalade de la tension qui peut être dangereuse pour la charge (cf. Cahier Technique n°143).

Il faut noter que le même phénomène apparaît à la fermeture de l'appareil : il se produit un préamorçage lorsque les contacts sont suffisamment proches. Comme dans le cas des réallumages successifs, l'énergie stockée croît à chaque tentative de coupure mais la croissance de la tension est limitée par le rapprochement des contacts.

■ Les domaines d'application

Il s'agit en Moyenne Tension des courants magnétisants des transformateurs à vide ou faiblement chargés, des moteurs et des inductances shunt.

□ Les transformateurs à vide ou faiblement chargés.

Les transformateurs peuvent être manœuvrés en période de faible charge (la nuit par exemple) pour des besoins de gestion de réseau. Les courants correspondant à leurs courants magnétisants sont de quelques ampères à quelques dizaines d'ampères et leur facteur d'arrachement peut être important. Cependant, même si le courant est arraché à sa valeur crête, les facteurs de surtensions possibles sont généralement faibles compte tenu des capacités et des inductances mises en jeu.

En distribution aérienne, le risque lié à l'apparition de courant de surtension est d'autant plus faible que des parafoudres limitent les surtensions.

Par ailleurs, les normes concernant les transformateurs définissent des essais d'ondes de choc permettant de vérifier leur aptitude à supporter les surtensions de manœuvre.

□ Les inductances shunt

Ces inductances sont utilisées pour compenser la composante réactive des lignes ou pour éviter l'élévation de tension des lignes très longues, et peu chargées. Elles sont utilisées le plus souvent en HT, mais aussi en MT.

Les surtensions de coupure restent en général en dessous d'un facteur de surtension égal à 2,5 du fait des impédances concernées. S'il y a un risque pour que la surtension de coupure dépasse cette limite, des parafoudres et des résistances de coupure doivent être placés en parallèle sur le disjoncteur.

□ Les moteurs

Les bobinages, statorique et rotorique, des moteurs font que le courant qu'ils absorbent à vide ainsi que leurs courants de démarrage sont essentiellement inductifs. Etant donné le nombre important de manœuvres, les surtensions sont très fréquentes et peuvent devenir critiques par la dégradation progressive de l'isolation qu'elles engendrent, en particulier si des ouvertures ont lieu pendant les phases de démarrage.

En règle générale, il faut choisir des disjoncteurs qui ne réamorcent pas ou à très faible probabilité de réamorçage. Sinon, il est possible de placer soit des systèmes R-C aux bornes des moteurs, afin de dériver les courants transitoires à haute fréquence, soit des systèmes limiteurs de tension de type ZnO.

■ La coupure des courant inductifs et les normes

Il n'existe pas de normes internationales pour la coupure des courants inductifs, cependant le rapport technique 61233 de la CEI stipulent des essais pour les disjoncteurs employés pour l'alimentation des moteurs et des inductances shunt.

□ Moteurs

Pour des disjoncteurs ayant des tensions assignées comprises entre 1 kV et 17,5 kV. Un circuit normalisé simulant un moteur rotor bloqué est spécifié pour les essais en laboratoire.

□ Inductances shunt

Elles sont assez peu répandues en MT, néanmoins, elles sont parfois utilisées en 36 kV. Les essais, effectués en laboratoire sur un circuit triphasé, sont définis uniquement pour des tensions assignées supérieures à 12 kV .

La coupure des courants capacitifs

Elle peut donner lieu à des surtensions dues à des réamorçages lors de la période de rétablissement de la tension.

■ La coupure des courants capacitifs est en principe sans difficulté. En effet, lorsque l'appareil interrompt le courant, la tension aux bornes du générateur est maximale car le courant et la tension sont déphasés de $\pi/2$; du fait que le condensateur reste chargé à cette valeur après la coupure du courant, la tension aux bornes de l'interrupteur, initialement nulle, augmente lentement sans TTR et avec une dérivée par rapport au temps nulle à l'origine.

■ En revanche les problèmes de réamorçages sont délicats. En effet, après une demi-période, la tension du réseau s'est inversée et la tension aux bornes de l'interrupteur atteint deux fois la valeur de la tension crête. Les risques de réamorçage entre les contacts sont donc augmentés et ce d'autant plus que l'ouverture est lente.

S'il y a réamorçage à la crête de tension, la capacité se décharge alors dans l'inductance du circuit créant un courant oscillatoire de tension crête $3 \hat{E}$ (cf. fig. 12). Si la coupure est effective au zéro de courant suivant, le condensateur reste chargé à une tension $3 \hat{E}$.

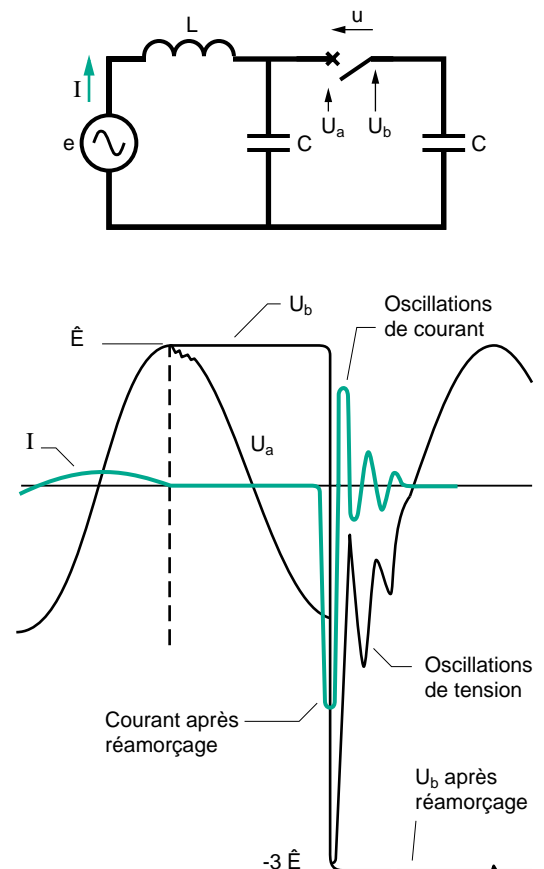


Fig. 12 : schéma d'un circuit avec une charge capacitive, lors de la coupure si le disjoncteur n'ouvre pas assez rapidement, des réamorçages successifs peuvent provoquer des surtensions dangereuses sur la charge.

Quand la tension « e » s'inverse de nouveau, la tension aux bornes de l'interrupteur est égale à $5 \hat{E}$. Cette surtension peut entraîner alors un nouveau réamorçage. Le phénomène peut se poursuivre avec une tension aux bornes de l'interrupteur pouvant atteindre des valeurs de $5 \hat{E}$, $7 \hat{E}$, etc.

Pour tout réamorçage qui a lieu après le quart de période qui suit le zéro de courant, une « escalade de tension » peut être observée et conduire à des valeurs crête inadmissibles pour les charges.

En revanche, les réallumages dont les apparitions dépendent du dimensionnement de l'appareil de coupure sont tolérables : la tension d'oscillation aux bornes du condensateur reste inférieure, en valeur absolue, à la valeur crête de la tension du générateur, ce qui ne présente pas de danger particulier pour les appareils.

Pour mémoire, l'essai de surtension des condensateurs est effectué à 2,25 fois leur tension assignée.

La régénération diélectrique du milieu intercontacts doit donc être suffisamment rapide pour qu'il n'y ait pas de réamorçage après le quart de période.

■ Etablissement de courants capacitifs et préamorçages

Lors de la fermeture de l'appareil de commande alimentant des charges capacitives, des phénomènes spécifiques aux circuits capacitifs se produisent.

Ainsi, la mise sous tension d'une batterie de condensateurs provoque une surintensité importante à fréquence élevée (cf. **fig. 13**) dont l'amplitude crête est donnée par l'équation :

$$I_c = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{C}{L_0 + L}}$$

où

L_0 = inductance du réseau amont,

L = inductances de liaison à la batterie, généralement faible vis à vis de L_0 .

Dans le cas de batteries en gradins, le phénomène est encore accentué au niveau de chaque gradin par la présence de l'énergie stockée dans les condensateurs déjà sous tension : les courants transitoires peuvent atteindre plusieurs centaines de fois le courant assigné avec des fréquences de plusieurs kHz du fait des faibles valeurs des impédances de liaison entre gradins.

Lors des préamorçages au niveau des contacts de l'appareil de commande (allumage d'un arc conducteur avant la jonction des contacts), ces courants transitoires élevés provoquent une érosion précoce des contacts et éventuellement

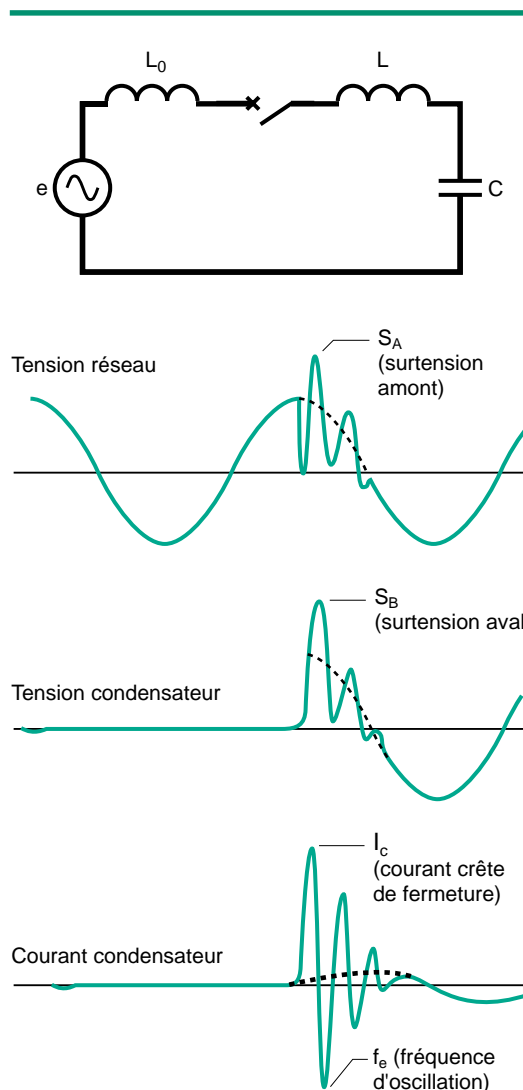


Fig. 13 : formes du courant et des tensions (surtension de préamorçage) lors du couplage au réseau d'une batterie unique de condensateurs.

leur soudure. Afin de limiter ces phénomènes, des inductances de limitation (impédances de choc) sont mises en série avec la batterie.

Ainsi, pour une batterie de condensateurs, en n gradins de capacité unitaire C , l'équation précédente devient :

$$I_c = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{C}{L}} \frac{n}{n+1}$$

où

L = inductances de limitation (impédances de choc), élevées vis-à-vis de L_0 .

A noter que des appareils adaptés à cette application existent et doivent être spécifiés.

■ Les domaines d'application

Les courants capacitifs ont principalement deux origines : les câbles et les lignes, ainsi que les batteries de condensateurs.

□ Les câbles et lignes

Il s'agit des courants de charge des câbles à vide et des lignes aériennes longues (compensées ou non). Dans nombre de pays européens (surtout les pays du Sud de l'Europe, France, Italie, Espagne...), les réseaux aériens MT sont longs et donc particulièrement sensibles aux surtensions atmosphériques de sorte qu'il y a un nombre élevé de déclenchements sur ces lignes... donc de réenclenchements.

□ Les batteries de condensateurs

Elles sont placées en dérivation sur les réseaux et servent à compenser l'énergie réactive des lignes (réseau de transport) et des charges (MT/BT). Elles permettent d'augmenter les puissances actives transportées et diminuent les pertes en ligne. Elles peuvent être :

- uniques dans le cas d'une faible compensation et d'une charge stable,
- sinon en gradins (multiples ou fractionnés).

Ce type de batterie est très utilisé par certaines grosses industries (forte puissance installée) et par les distributeurs d'énergie. Il est associé à un automatisme et le nombre de manœuvres peut être important (plusieurs opérations par jour) : il y a lieu de spécifier des appareils ayant un nombre de manœuvres adapté à ce besoin.

■ La coupure des courants capacitifs et les normes

La norme CEI 60056 (4^e édition, 1987) donne, pour toutes les tensions, des valeurs de pouvoir de coupure assigné pour les disjoncteurs placés

en protection de câbles pouvant être non chargés. Mais cette spécification non obligatoire est jugée inutile pour les tensions inférieures à 24 kV.

En ce qui concerne le pouvoir de coupure assigné pour les disjoncteurs placés en protection de lignes à vide, la spécification est limitée aux appareils dont la tension assignée est ≥ 72 kV. Aucune valeur n'est spécifiée pour les batteries de condensateurs.

La CEI 60056 spécifie aussi, pour les appareils de commande et de protection, des essais de manœuvre (cf. **fig. 14**) sur courant capacitif pour les lignes à vide, les câbles à vide et les batteries simples de condensateurs mais elle ne spécifie rien pour les lignes longues ni pour les bancs de filtres.

Les évolutions normatives, pour les applications comportant des courants capacitifs, s'orientent vers la définition d'appareils à faible probabilité de réamorçage, avec une spécification élargie des grandeurs et un nombre accru de manœuvres garantissant leur aptitude à l'emploi.

Séquence d'essai	Icc du circuit d'alimentation en fonction du PdC du disjoncteur (I_{cc} / PdC) x100	Courant d'essai (% de I_{capa})
1	< 10	20 à 40
2	< 10	> 100
3	100	20 à 40
4	100	>100

Fig. 14 : essais spécifiés par la CEI 60056 pour les appareils de commande et de protection.

2.3 La coupure des courants de défaut

Dans le cas d'un court-circuit, le déphasage entre le courant et la tension est toujours très important ($0,07 \leq \cos\phi \leq 0,15$), car les réseaux sont essentiellement inductifs. Lorsque le courant passe par zéro la tension du réseau est à son maximum ou presque.

En MT, le courant de court-circuit atteint quelques dizaines de milliers d'ampères, par conséquent la coupure se fait sans arrachement de courant car l'arc est très stable. Comme décrit précédemment, elle se décompose en trois phases :

- une période d'attente du passage par zéro du courant,
- une période d'extinction,
- une période de rétablissement.

Les courants de court-circuit

■ Les différents types de défaut (cf. Cahier Technique n°158)

Parmi tous les types de défaut (triphasé, biphasé, monophasé et de terre), l'incident le plus fréquent est le défaut monophasé à la terre (80% des courts-circuits). Il est dû en général à des ruptures d'isolement phase-terre consécutives à des surtensions d'origine atmosphérique, des casses ou contournements d'isolateur ou des travaux de génie civil.

Les courts-circuits triphasés sont rares (5% des cas) mais servent de référence pour les essais car ces courants de court-circuit et la TTR sont plus élevés que pour des défauts monophasés ou biphasés.

Le calcul des courants de défaut fait intervenir les caractéristiques des réseaux et les schémas de liaison à la terre (neutre isolé, directement mis à la terre ou impédant). Des méthodes de calcul ont été développées et normalisées (CEI 60909). Actuellement, le calcul par simulation sur ordinateur est assez répandu, et les services de Schneider ont développé et disposent de logiciels permettant d'obtenir des résultats très fiables.

■ Localisation des défauts

□ Les défauts aux bornes aval du disjoncteur

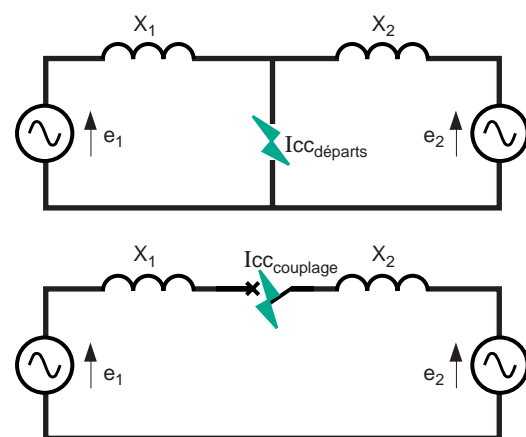
C'est dans ces conditions que le courant de court-circuit est le plus important car il n'est limité que par les impédances situées en amont de l'appareil. Bien que ce type de défaut soit très rare, c'est celui qui est retenu pour la spécification des disjoncteurs en MT.

□ Le défaut en ligne

Ce type de défaut est plus fréquent que le précédent sur les réseaux aériens, mais en MT, les caractéristiques d'arc des disjoncteurs et des liaisons disjoncteurs/câbles/lignes font que la contrainte est inférieure à celle provoquée par un court-circuit aux bornes. Il n'existe donc pas d'essais spécifiques pour les disjoncteurs MT. En HT ce type de court-circuit nécessite des essais particuliers pour les défauts proches car les phénomènes de réflexion d'ondes provoquent des TTR très contraignantes.

□ Couplage en opposition de phase (cf. fig. 15)

Il s'agit d'un court-circuit particulier qui se produit lors du couplage de deux générateurs non synchronisés.



avec $e_1 = e_2 = e$ et $X_1 = X_2 = X$

$$I_{CC_{départs}} = \frac{e}{X} + \frac{e}{X} = \frac{2e}{X}$$

$$I_{CC_{couplage}} = \frac{2e}{2X} = \frac{e}{X}$$

Fig. 15 : coupure en cas de discordance de phases lors du couplage de deux générateurs non synchronisés.

Lorsque deux générateurs ont perdu leur synchronisme, la tension aux bornes du disjoncteur de couplage est égale à la somme des tensions de chaque générateur. Le courant que doit alors couper le disjoncteur peut atteindre la moitié de la valeur du courant correspondant à un court-circuit au point de couplage. Ce maximum est obtenu lors d'un couplage en opposition de phases.

La norme CEI 60056 (§ 4.106) exige que dans ce cas, l'appareil puisse couper 25 % du courant de défaut à ses bornes, sous une tension égale à 2,5 fois la tension par rapport à la terre, ce qui couvre les valeurs pratiques rencontrées.

■ Formes des courants de court-circuit

Lors d'un court-circuit, l'intensité du courant pendant la période transitoire est la somme de deux composantes, l'une symétrique ou périodique (i_a) et l'autre asymétrique ou apériodique (i_c) (cf. fig. 16).

La composante symétrique (i_a) est créée par la source alternative qui alimente le courant de court-circuit.

La composante apériodique (i_c) est créée par l'énergie électromagnétique emmagasinée dans l'inductance au moment du court-circuit. Sa valeur à l'instant du défaut est égale et opposée à celle de la composante symétrique pour assurer la continuité du courant. Elle décroît avec une constante de temps L/R , caractéristique du réseau, dont la valeur normalisée vaut 45 ms. D'où l'expression suivante :

$$i_a = I \sin(\omega t + \theta)$$

$$i_c = -I \sin\theta e^{-t/(L/R)}$$

I = intensité maximale = E/Z_{cc}

θ = angle électrique qui caractérise le décalage entre l'instant initial du défaut et l'origine de l'onde de courant.

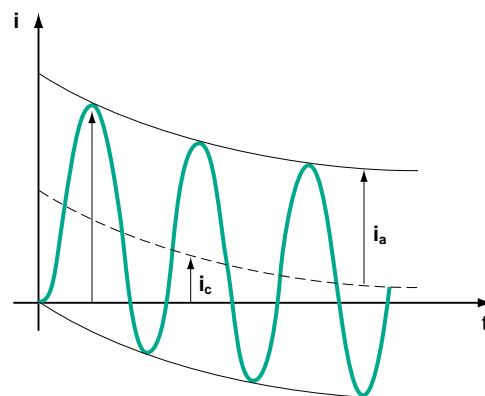


Fig. 16 : lors d'un court-circuit, le courant est la somme de deux composantes, l'une symétrique ou périodique (i_a) et l'autre asymétrique ou apériodique (i_c).

Deux cas extrêmes :

- Le court-circuit survient juste à l'instant où la tension e passe à par zéro. La composante symétrique et la composante continue ont leur valeur maximale. Le régime d'établissement est dit à asymétrie totale.
- L'instant initial du court-circuit coïncide avec le passage à zéro de la composante alternative du courant : la composante continue est nulle et le régime est dit symétrique.

Le pouvoir de coupure

Le pouvoir de coupure (PdC) est défini comme le courant le plus élevé qu'un appareil peut couper sous sa tension assignée dans un circuit dont la TTR répond à une spécification précise.

L'appareil doit pouvoir couper tous les courants de court-circuit ayant une composante périodique inférieure à son PdC et une composante apériodique quelconque dont le pourcentage ne dépasse pas une valeur spécifiée.

Cependant, selon le type d'appareil, certains courants de défaut, plus petits que le PdC, peuvent se révéler difficiles à couper, car ils engendrent des temps d'arc très longs avec des risques de non coupure.

■ La coupure en triphasé

Du fait du déphasage des courants en triphasé, la coupure se passe de la manière suivante :

- Le disjoncteur interrompt le courant de la première phase (phase 1 sur la **figure 17**) pour laquelle le courant passe à zéro.

Le régime devient alors biphasé et tout se passe comme si le point N se déplaçait en N'. La tension qui s'établit sur la première phase, aux bornes du contact ouvert AA', est celle existant entre A et N', elle vaut alors :

$$U_{\text{réseau}} \geq U_{AA'} = V.k \geq U_{\text{réseau}} \sqrt{3}/2$$

k est le facteur de premier pôle. Sa valeur varie de 1 à 1,5 selon que le neutre est directement mis à la terre ou parfaitement isolé.

- 1/2 période plus tard les deux autres phases arrivent à leur tour à zéro, le disjoncteur coupe et le réseau redevient équilibré par rapport au point neutre.

La TTR dépend donc des régimes de neutre. La norme précise les valeurs retenues pour les essais en prenant la valeur 1,5 pour la MT et les réseaux à neutre isolé. La valeur de 1,3 est prise pour les autres cas.

■ La fermeture d'un disjoncteur sur un courant de défaut

Les défauts étant souvent fugitifs, il est habituel en exploitation normale de re fermer le disjoncteur après l'interruption d'un courant de défaut.

Cependant certains sont permanents et le disjoncteur doit donc pouvoir rétablir le courant de court-circuit.

La fermeture qui s'accompagne d'un préamorçage provoque une onde de tension à front raide dont la crête de courant peut atteindre théoriquement 2,5 I_{cc} dans l'hypothèse d'une asymétrie totale, d'une constante de temps de 45 ms à 50 Hz et sans effet de décalage de pôles. Un pouvoir de fermeture est donc exigé pour les disjoncteurs.

■ Pouvoir de coupure normalisé

La conformité des disjoncteurs aux normes démontre notamment leur aptitude à couper tous ces courants appelés courants critiques.

La norme CEI 60056 (§ 4.104) impose une série d'essais permettant de valider le PdC de l'appareil et de vérifier son aptitude aux manœuvres de fermeture et d'ouverture répétées. Le pouvoir de coupure assigné est caractérisé par deux valeurs.

- La valeur efficace de sa composante périodique appelée généralement pouvoir de coupure.

Les valeurs normalisées du pouvoir de coupure assigné sont prises dans les séries de Renard (6.3, 8, 10, 12.5, 16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100 kA), sachant qu'en pratique, les courants de court-circuit ont des valeurs comprises entre 12,5 kA et 50 kA en MT.

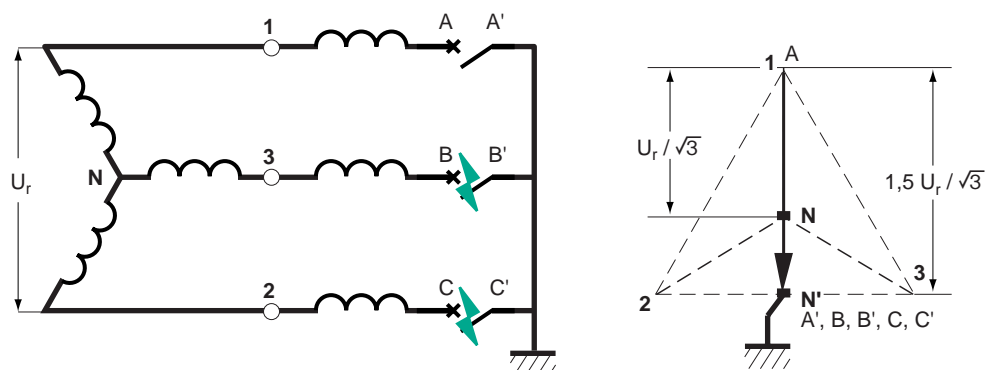


Fig. 17 : tension $U_{AA'}$ supportée par le premier pôle qui ouvre, d'un appareil triphasé.

□ Le pourcentage de la composante aperiodique Il correspond à la valeur atteinte au bout d'un temps τ égal à la durée minimale d'ouverture du disjoncteur, à laquelle on ajoute une demi-période de la fréquence assignée pour les appareils à source auxiliaire. La constante de temps de décroissance exponentielle normalisée est de 45 ms. D'autres valeurs supérieures sont à l'étude pour certains cas particuliers. Les essais de coupure en court-circuit sont faits, avec des valeurs spécifiées de TTR, pour des valeurs de courants de 10, 30, 60 et 100% du PdC selon le tableau de la **figure 18** .

Avec :

O = manœuvre d'ouverture,
FO = manœuvre de fermeture suivie immédiatement d'une manœuvre d'ouverture sauf spécification particulière, les séquences assignées des manœuvres sont définies comme suit.

□ Pour les appareils sans refermeture automatique rapide

O - 3 mn - FO - 3 mn - FO

ou

FO - 15 s - FO,

□ Pour les appareils prévus pour la refermeture automatique rapide

O - 0,3 s - FO - 3 mn - FO.

Séquence d'essai	% de I_a (composante symétrique)	% de I_c (composante asymétrique)
1	10	< 20
2	30	< 20
3	60	< 20
4	100	< 20
5*	100	selon la courbe de décroissance normalisée

* : pour des disjoncteurs ayant un temps $\tau < 80$ ms.

Fig. 18 : valeurs spécifiées de TTR pour les essais de coupure en court-circuit des disjoncteurs.

3 Les techniques de coupure

Pour couper les courants de charge ou de défaut, les constructeurs ont développé et perfectionné les appareils de coupure, disjoncteurs et contacteurs notamment, utilisant divers milieux de coupure :

l'air, l'huile, le vide et le SF₆. Si la coupure dans l'air ou l'huile a tendance à disparaître, il n'en va pas de même de la coupure dans le vide ou le SF₆, « reine » de la moyenne tension.

3.1 Le milieu de coupure

Dans le chapitre précédent il a été expliqué que la coupure réussit lorsque :

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

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

- avoir une conductivité thermique importante en particulier dans la phase d'extinction pour évacuer l'énergie thermique de l'arc,
- retrouver ses propriétés diélectriques le plus vite possible afin d'éviter un réamorçage intempestif (la figure 19 montre les propriétés exceptionnelles du SF₆ à cet égard),
- à température élevée, être un bon conducteur électrique pour réduire la résistivité de l'arc donc de l'énergie à dissiper,
- à température faible, être un bon isolant électrique pour faciliter le rétablissement de la tension.

Cette qualité d'isolant se mesure par la tenue diélectrique entre les contacts qui dépend de la pression du gaz et de la distance entre les électrodes. La tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes et de la pression est donnée par la courbe de Paschen (cf. fig. 20 et 21) qui permet de déterminer trois zones suivant la pression du gaz.

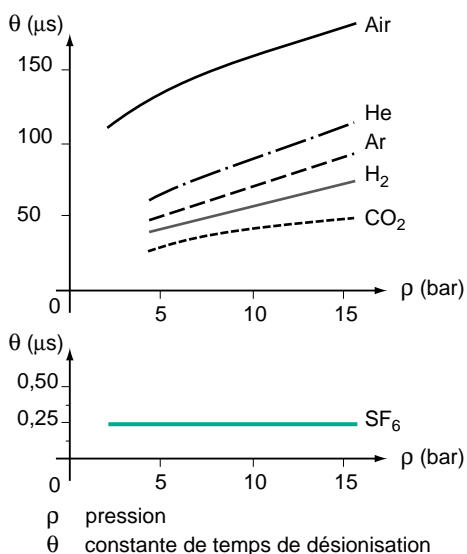


Fig. 19 : constantes de temps de désionisation en fonction de la pression pour différents gaz.

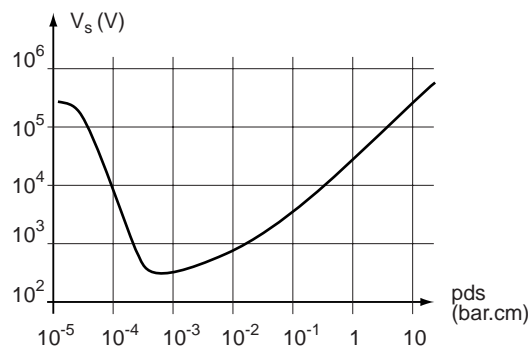


Fig. 20 : évolution de la rigidité diélectrique de l'air en fonction de la pression, en champ faiblement hétérogène (courbes de Paschen).

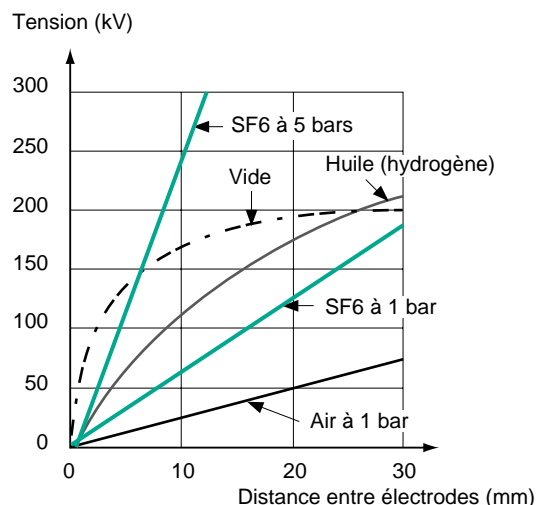


Fig. 21 : influence de la distance entre les contacts sur la rigidité diélectrique.

1- La zone à haute pression dite de « régime atmosphérique » où la tenue diélectrique est proportionnelle à la pression de gaz et à la distance intercontacts.

2- La zone à faible pression où la tenue diélectrique atteint un vrai minimum entre 200 et 600 V suivant le gaz utilisé (minimum de Paschen). Il est atteint pour une valeur déterminée du produit de la pression avec la distance intercontacts aux alentours de 10^2 mbar.cm.

3- La zone du vide où la tension de claquage ne dépend plus que de la distance entre les contacts et de leur état de la surface.

L'état conducteur est assuré par les électrons et les atomes arrachés sur les contacts dans le vide, et dans un gaz par l'ionisation rapide des molécules de ce gaz.

Ces courbes mettent en évidence les performances possibles selon les milieux de coupure qui ont été successivement utilisés : l'air à pression atmosphérique ou à haute pression, l'hydrogène produit par décomposition de l'huile, le vide ou le SF₆. La **figure 22** indique les plages de tension où chacune de ces techniques est aujourd'hui utilisée.

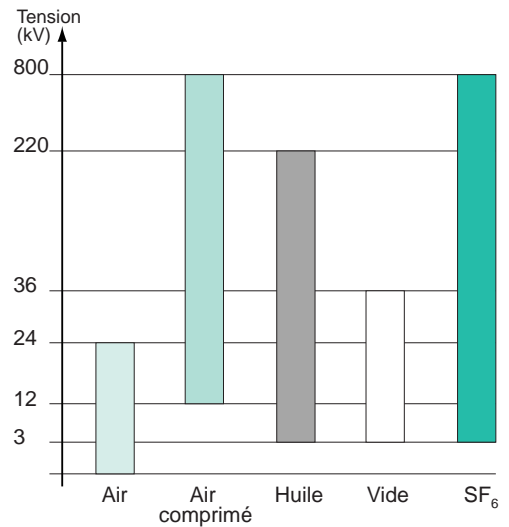


Fig. 22 : types d'appareils de coupure utilisés selon les tensions d'utilisation.

3.2 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 (10 μs), peut être utilisé 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), (cf. **fig. 23**) entre lesquelles l'arc s'étire.

En pratique, lorsque le courant décroît, l'arc soumis aux efforts électromagnétiques pénètre entre ces plaques. Il s'allonge et se refroidit au

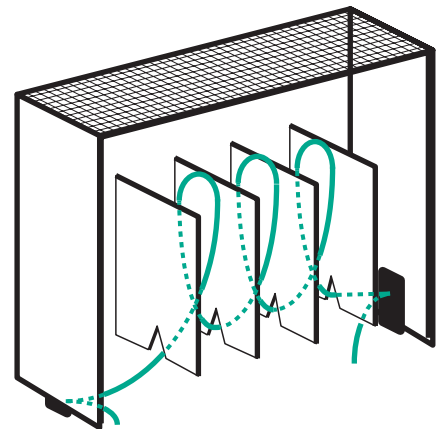


Fig. 23 : allongement d'un arc électrique entre les plaques réfractaires en céramique d'une chambre de coupure d'un disjoncteur à coupure dans l'air (Disjoncteur de type Solénarc - Marque Merlin Gerin).

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 (cf. **fig. 24**).

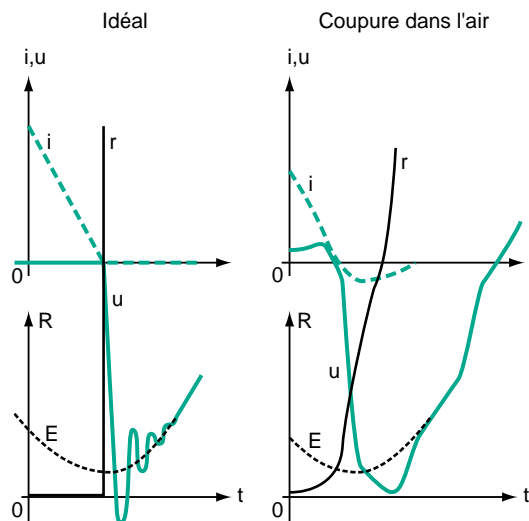


Fig. 24 : comportements comparés d'un appareil idéal et d'un appareil à coupure dans l'air.

Principales caractéristiques d'un dispositif de coupure dans l'air

La dimension de la chambre de coupure est principalement définie par la puissance de court-circuit du réseau (en MVA).

Dans les appareils de type Solénarc, la longueur très importante de l'arc (plusieurs

mètres sous 24 kV) est obtenue dans un volume raisonnable grâce au développement de l'arc sous la forme d'un solénoïde. Compte tenu des vitesses requises pour l'ouverture des contacts, de quelques m/s, les énergies de commande sont de quelques centaines de joules.

Les domaines d'application de la coupure dans l'air

Ce type d'appareil a été très utilisé dans de nombreuses applications, mais son emploi reste limité à des tensions inférieures à 24 kV. Pour des tensions supérieures, l'air comprimé est employé de manière à améliorer la tenue diélectrique et la vitesse de refroidissement et de désionisation. L'arc est alors refroidi par des systèmes de soufflage à haute pression (entre 20 et 40 bars). Cette technique a été utilisée pour des disjoncteurs à hautes performances ou pour des tensions élevées (jusqu'à 800 kV).

En BT, la technique de coupure dans l'air à pression atmosphérique est utilisée universellement pour sa simplicité, son endurance, son absence de surtension et son effet limiteur

En MT d'autres techniques 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),
- pouvoir de coupure influencé par la présence des cloisons métalliques de la cellule contenant l'appareil et par l'humidité de l'air,
- coût et bruit.

Les disjoncteurs MT à coupure dans l'air ne sont quasiment plus fabriqués aujourd'hui.

3.3 La coupure dans l'huile

L'huile qui servait déjà comme isolant a été utilisée dès le début du siècle comme milieu de coupure car cette technique permet la conception d'appareils relativement simples et économiques. Les disjoncteurs à huile ont été utilisés principalement pour les tensions de 5 à 15 kV.

Le principe

Les contacts sont immergés dans une huile diélectrique. Lors de la séparation, l'arc provoque la décomposition de l'huile qui libère de l'hydrogène (70 %), de l'éthylène (20 %), du méthane (10 %) et du carbone libre. Une énergie d'arc de 100 kJ produit environ 10 l de ces gaz. Ces gaz forment une bulle qui, par inertie de la masse d'huile, se trouve soumise pendant la coupure à

une pression dynamique qui peut atteindre 50 à 100 bars. Quand le courant passe par zéro, le gaz se détend et souffle l'arc qui s'éteint.

C'est l'hydrogène obtenu par décomposition de l'huile qui sert de milieu d'extinction. C'est un bon agent extincteur grâce à ses propriétés thermiques et à sa constante de désionisation meilleure que celle de l'air, en particulier à pression élevée.

Différentes technologies de coupure dans l'huile

- Disjoncteurs à grand volume d'huile

Dans les premiers appareils utilisant l'huile, l'arc se développait librement entre les contacts

créant des bulles de gaz non confinées. Afin d'éviter des amorçages entre phases ou entre bornes et masse, ces bulles ne doivent en aucun cas atteindre la cuve ou se rejoindre (cf. **fig. 25**). Les appareils dimensionnés en conséquence, atteignent des dimensions extrêmement grandes.

Outre l'encombrement, ces appareils ont de nombreux inconvénients tel le manque de sécurité à cause de l'hydrogène produit qui s'accumule sous le couvercle, la maintenance élevée nécessaire pour veiller à la pureté de l'huile et au maintien de ses propriétés diélectriques.

Pour parer ces inconvénients (manque de sécurité, appareils encombrants), les constructeurs ont créé les disjoncteurs à faible volume d'huile.

■ Disjoncteurs à faible volume d'huile

L'arc et la bulle sont confinés dans un pot de coupure isolant. La pression du gaz augmente lors du passage de l'arc dans une succession de chambres puis, quand le courant passe par zéro, se détend à travers une buse sur la zone d'arc.

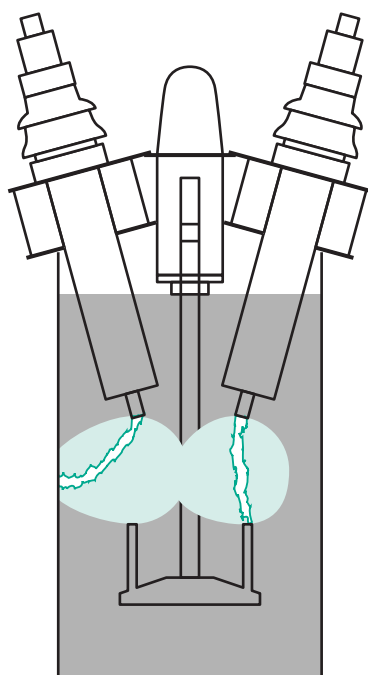


Fig. 25 : bulles de gaz à l'origine d'un défaut phase-masse lors d'une coupure dans un disjoncteur à grand volume d'huile.

Celui-ci est alors énergiquement balayé, ce qui assure la restauration des propriétés diélectriques intercontacts.

□ Influence de la valeur du courant sur le PdC
Pour les grands courants, la quantité d'hydrogène produite et les montées de pression sont importantes. Par conséquent les temps d'arc sont courts.

A l'inverse, pour les petits courants, les montées en pression sont faibles et les temps d'arc sont longs. Ces temps d'arc augmentent jusqu'à un niveau critique où il devient difficile d'achever la coupure. Des dispositifs de soufflage complémentaires en fin de course peuvent améliorer ce point.

□ Caractéristiques principales des disjoncteurs à faible volume d'huile

La valeur du courant de court-circuit ou du courant assigné impose un diamètre minimal du contact mobile. La longueur du pot de coupure et la course de l'équipage mobile sont quasiment proportionnelles à la tension appliquée.

Pour éviter les pressions excessives, le temps d'arc minimal pour la coupure d'un grand courant doit être inférieur à 10 ms et il doit rester inférieur à 40 ms pour les courants critiques.

L'enveloppe isolante du pot de coupure doit, en outre, être conçue pour supporter les pressions très élevées engendrées par des défauts consécutifs, car la diminution de pression demande environ une seconde.

Cependant malgré la réduction du volume d'huile, cette technique présente encore certains inconvénients :

- La décomposition de l'huile n'est pas réversible.
- La dégradation de l'huile et l'usure des contacts détériorent la tenue diélectrique entraînant des coûts supplémentaires de maintenance.
- En cas de refermeture rapide le pôle reste à pression élevée et son PdC diminue.
- Le risque d'explosion et d'inflammation n'est pas complètement écarté.

Les domaines d'application de la coupure dans l'huile

Cette technique de coupure a été très employée dans tous les domaines, du transport et de la distribution de l'énergie électrique.

Progressivement elle est supplantée par les techniques de coupure dans le vide et dans le SF₆, techniques qui ne présentent pas les inconvénients présentés dans les paragraphes précédents.

3.4 La coupure dans le vide

Les propriétés diélectriques du vide sont connues depuis longtemps et ont été utilisées, par exemple, pour les ampoules à vide des tubes à rayons X. L'utilisation du vide dans l'appareillage de coupure a été envisagée dès 1920, mais, à cause de contingences technologiques, n'a été effective au niveau industriel que depuis 1960. Depuis les années 70, la technique du vide se répand de plus en plus du fait des avantages qu'elle apporte : encombrement réduit, meilleure sécurité et plus grande endurance.

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 (cf. fig. 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 à la différence des autres techniques de coupure évoquée précédemment pour lesquelles

cette colonne est principalement composée du gaz intercontacts ionisé par collisions. 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 (cf. fig. 26a). 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 ce régime, 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 (cf. fig. 26b). 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 telle (entre 30 et 50 eV) 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).

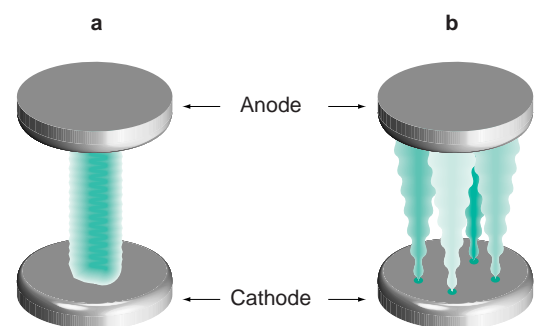


Fig. 26 : arc concentré [a] et arc diffus [b].

■ 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 $10^{22} / \text{m}^3$, 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 (cf. fig. 27)

Le champ est créé par le courant qui circule dans les électrodes conçues à cet effet. 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.

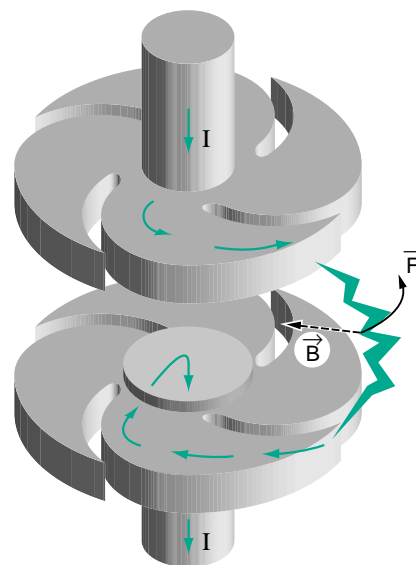


Fig. 27 : contacts créant un champ magnétique radial. L'arc obéit aux lois de l'électromagnétisme, il se déplace donc du centre vers l'extrémité des « pétales » puis tourne à la périphérie des électrodes.

□ La technologie du champ magnétique axial (cf. fig. 28)

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 d'arc 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.

Le tableau de la figure 29 établit une comparaison entre ces deux technologies.

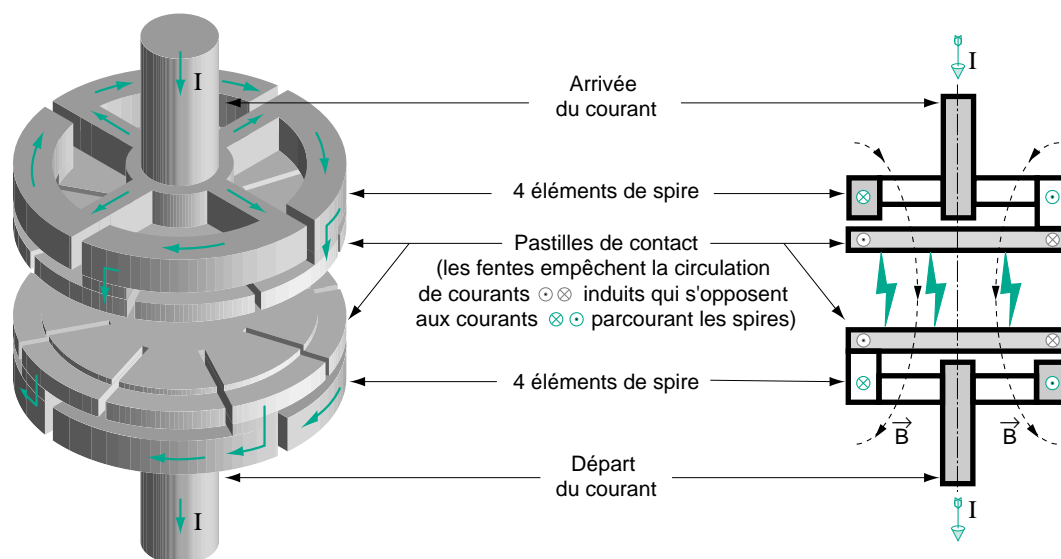


Fig. 28 : contacts créant un champ magnétique axial.

	Champ radial	Champ axial
Résistance de contact/échauffement	+	-
Tension d'arc	-	+
Erosion des contacts	-	+
PdC / diamètre des contacts	=	=

Fig. 29 : tableau comparatif des forces (+) et faiblesses (-) de chaque technologie.

■ 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.

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 MT 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.

En basse tension : l'usage de cette technique reste marginal pour des raisons de coût et d'absence de pouvoir limiteur. D'une manière générale, en BT son emploi est limité aux

courants assignés compris entre 800 et 2500 A et pour des pouvoirs de coupure inférieurs à 75 kA. En HT ($U \geq 52$ kV) l'usage de cette technique reste du domaine prospectif.

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 réamorçage 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 des parasurtenseurs de type ZnO.

3.5 La coupure dans le SF₆

L'hexafluorure de soufre -SF₆-, est un gaz apprécié pour ses nombreuses qualités chimiques et diélectriques. La technique de coupure dans ce gaz a été développée, dans les années 70, comme celle du vide.

Propriétés du SF₆

■ Propriétés chimiques

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 (+1096 kJ/mol) ainsi

qu'une grande capacité d'évacuation de la chaleur produite par l'arc (enthalpie élevée). 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.

Le rapport 61634 de la CEI sur l'utilisation du SF₆ dans l'appareillage de coupure donne des valeurs typiques de sous-produits trouvés après plusieurs années de service. Les quantités produites restent faibles et sans risque pour les personnes et l'environnement : air (qq ppmv), CF₄ (40 ppmv à 600 ppmv), SOF₂ et SO₂F₂ (en quantité négligeable).

■ 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 (cf. fig. 30).

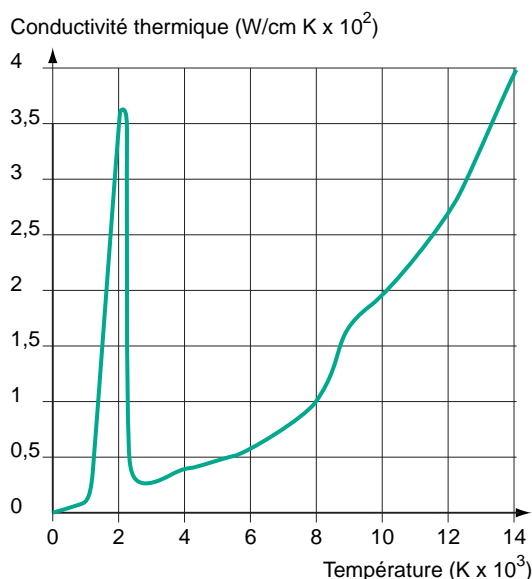


Fig. 30 : courbe de conductivité thermique du SF₆ en fonction de la température.

□ Propriétés diélectriques

Le SF₆ a une rigidité diélectrique très élevée grâce aux propriétés très électronégatives du fluor (cf. fig. 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 (cf. fig. 19).

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. (cf. fig. 31)

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) et sont données dans les paragraphes traitant de chacun de ces types de coupure.

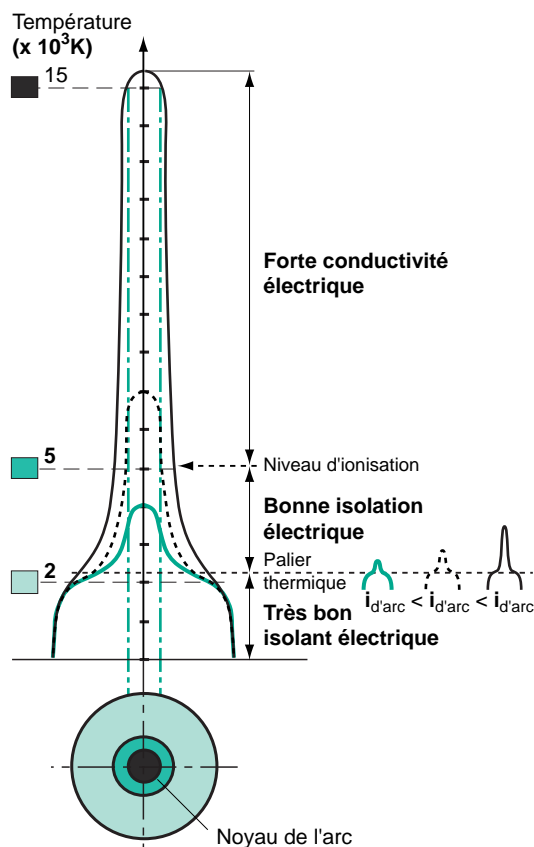


Fig. 31 : courbe de répartition de la température d'un arc contenu dans un tube cylindrique rempli de SF₆.

■ Passage au zéro de 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 et leur domaines d'application

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 (cf. fig. 32a). 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 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.

□ 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.

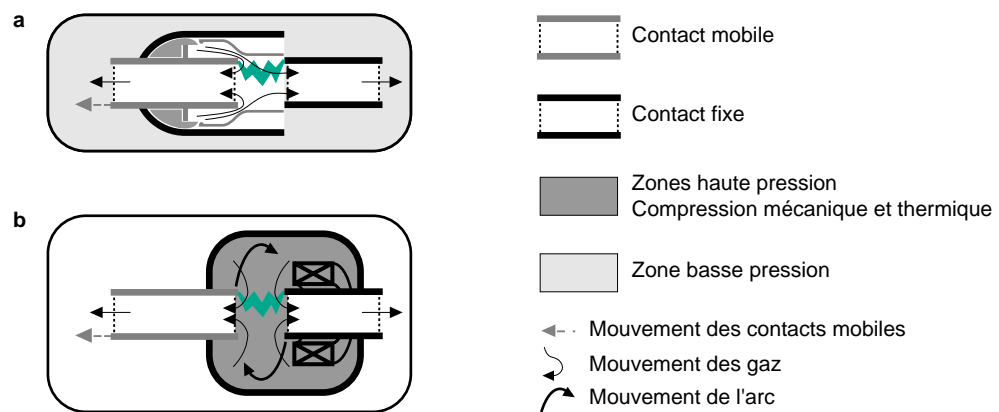


Fig. 32 : principes de la coupure par autocompression [a], et par arc tournant [b].

- 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 auto-compression

Le principe d'auto-compression 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 auto-compression 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

Avec cette technologie l'arc se refroidit par son propre déplacement relatif dans le SF₆. Un mouvement de rotation de l'arc à très grande vitesse (qui peut dépasser celle du son à la pression atmosphérique -P_{at}-) est engendré par le champ magnétique créé par une bobine parcourue par le courant de défaut.

A l'ouverture des contacts principaux, le courant est commuté sur la bobine et le champ magnétique axial apparaît. La force de Laplace résultante accélère l'arc dans un mouvement circulaire. Les contacts d'arc ont une forme de pistes circulaires qui peuvent être soit concentriques (arc radial et champ axial) soit face à face comme représentés sur la **figure 32b**

(arc axial et champ radial). L'arc est ainsi refroidi d'une manière homogène dans le SF₆.

La puissance de refroidissement de l'appareil dépend donc directement de la valeur du courant de court-circuit ce qui confère à ces appareils une coupure en douceur ne nécessitant qu'une faible énergie de manœuvre : l'énergie nécessaire à la coupure est entièrement fournie par l'arc et les faibles courants sont coupés sans arrachement ni surtensions.

Grâce au mouvement rapide des racines d'arc, les points chauds dégagant des vapeurs métalliques sont évités et l'érosion des contacts est minimale en particulier dans le cas de la géométrie axiale.

Il faut noter qu'à l'approche du zéro de courant, le champ magnétique diminue. Il est important qu'il garde une valeur non nulle de manière à ce que l'arc soit maintenu en mouvement dans du SF₆ froid au moment de l'apparition de la TTR, et qu'ainsi soit évitée l'existence de courants critiques. Ceci est obtenu en insérant des anneaux de court-circuit qui forcent le champ magnétique à être en léger déphasage avec le courant.

□ Grandeurs caractéristiques

En MT, 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

La technologie de coupure par arc tournant 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).

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

Elle 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 (cf. **fig. 33a**). 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.

□ Deux méthodes de guidage de l'arc, le guidage mécanique et le guidage magnétique, ont été développées qui permettent de stabiliser l'arc dans la zone de soufflage et en plus de supprimer les courants critiques.

- Le guidage mécanique (type autocompression) (cf. **fig. 33b**)

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) (cf. **fig. 33c**)

Un champ magnétique judicieusement dimensionné 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.

□ 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

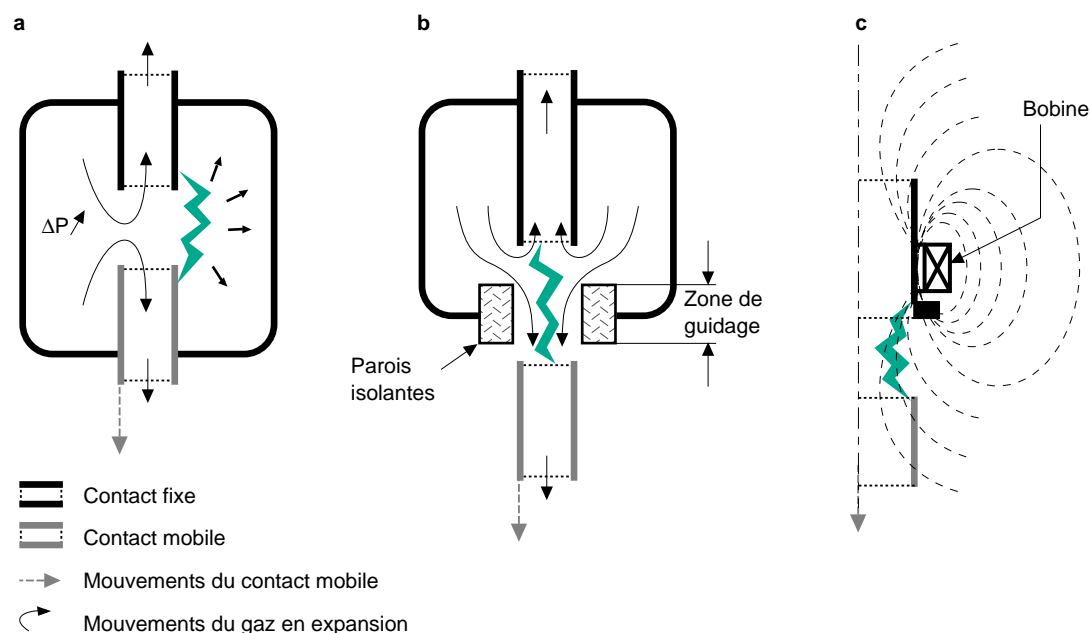


Fig. 33 : l'auto-expansion, son principe [a] et les deux méthodes de guidage de l'arc, mécanique [b] et magnétique [c].

des énergies de commande faibles, donc avec une très grande fiabilité.

□ Domaines d'application

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'autocompression 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.

3.6 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 (cf. fig. 34), et celles dans l'huile pour des raisons de fiabilité, de sécurité et de réduction de maintenance (cf. fig. 35).

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.

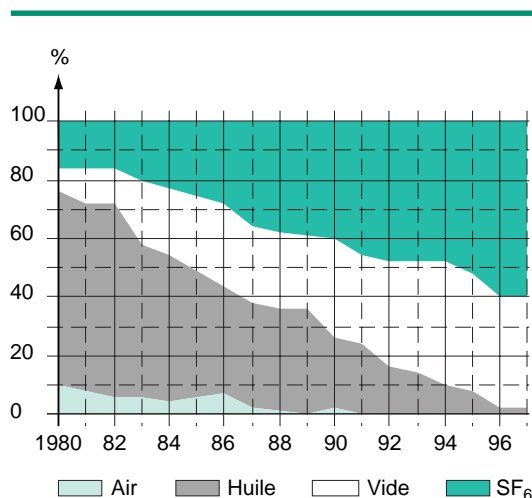


Fig. 34 : évolution du marché des disjoncteurs MT, en Europe.

	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 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.

Fig. 35 : performances comparées des différentes techniques de coupure.

Le tableau suivant de la **figure 36** résume les qualités respectives de chacune de ces deux techniques.

□ Les disjoncteurs au SF₆ et au vide sont des disjoncteurs à usage général et peuvent être adaptés à toutes les applications.

Les progrès technologiques dans les moyens de production des ampoules à vide ont permis d'obtenir des appareils très fiables et compétitifs au même titre que les appareils au SF₆.

La technique du vide est plus facile à mettre en œuvre aux tensions basses (tension inférieure à 7,2-12 kV). En revanche, celle au SF₆ permet d'atteindre plus facilement des performances de

coupe élevées (tension ou courant de court-circuit).

□ Dans les fonctions de commande (contacteur) (tension et courant modérés, grande endurance requise), la technique du vide est très répandue malgré les précautions à prendre concernant les surtensions. Par contre, elle est quasi inexistante dans les fonctions d'ouverture (interrupteur) pour des raisons économiques ; en particulier, l'excellente tenue diélectrique du SF₆ après coupe permet d'intégrer dans un seul appareil les fonctions d'ouverture et de sectionnement, ce qui est proscrit avec le vide.

La plupart des grands constructeurs utilisent aujourd'hui, dans leurs appareillages, les deux techniques de coupe selon leurs spécificités.

		SF ₆	Vide
Applications	Moteurs, fours, lignes...	Toutes. Plutôt adapté aux performances de coupe élevées (I et U).	Toutes. Plutôt adapté aux tensions faibles et aux TTR très rapides.
	Disjoncteurs, contacteurs...	Toutes.	Les fonctions sectionnement sont proscrites.
Caractéristiques	Endurance	Satisfaisantes pour toutes les applications courantes.	Peuvent être très élevées pour certaines applications courantes.
	Surtension	Pas de risque sur les faibles courants capacitifs. Très faible probabilité de réamorçage sur les courants capacitifs.	Parasurtenseur recommandé pour la manœuvre des moteurs et des gradins de condensateurs.
	Isolation entrée-sortie	Très reproductibles permettant des fonctions de sectionnement.	
	Dimension		Très compact dans les tensions basses.
Sûreté de fonctionnement	Pertes d'étanchéité	Jusqu'à 80% des performances maintenues à P _{atm} . Surveillance possible en continu.	
	Maintenance	Réduite sur le dispositif de commande. Contrôle permanent possible de la pression du gaz.	Réduite sur le dispositif de commande. Contrôle occasionnel possible du vide.
	Nombre de défaillances	Très bas (< 4/10 000), principalement dues aux auxiliaires.	Très bas si le procédé de fabrication des ampoules est bien maîtrisé.

Fig. 36 : qualités comparées des techniques de coupe dans le SF₆ et dans le vide.

3.7 Quelles possibilités pour d'autres techniques ?

Depuis plusieurs dizaines d'années, les ingénieurs cherchent à développer des disjoncteurs sans arc ni pièce en mouvement, en utilisant notamment des composants électroniques.

Les thyristors permettent de réaliser des appareils de coupe dont le comportement peut être proche de l'interrupteur idéal puisqu'ils coupent le courant à son passage à zéro, de plus, leur endurance est exceptionnelle aux conditions normales d'emploi. Malheureusement, outre leur coût, les composants statiques ont quelques inconvénients :

- dissipation thermique importante,
- grande sensibilité aux surtensions et surintensités,
- courant de fuite à l'état bloqué,
- limitation en tension inverse.

Ces particularités font qu'il est nécessaire de leur associer :

- des radiateurs,
- des parasurtenseurs,
- des fusibles ultra-rapides,
- des interrupteurs ou sectionneurs,
- et bien sûr une électronique de commande.

Les semi-conducteurs (thyristors, GTO, IGBT) ont fait d'énormes progrès et sont largement utilisés en BT dans des applications diverses, par exemple pour réaliser des contacteurs chaque fois que la cadence de manœuvres est très importante.

En HT, les thyristors sont placés dans des automatismes de régulation d'impédances composés de selfs et de condensateurs, dans les FACTS -Flexible Alternative Courant Transmission System-, dont le rôle est d'optimiser et de stabiliser les réseaux de

transport, et dans les Custom Power pour les réseaux de distribution.

En MT, les applications sont très rares et les disjoncteurs statiques restent à l'état de prototypes, car, outre leurs points faibles cités ci-dessus, pour tenir la tension assignée, ils nécessitent plusieurs composants en série. En conclusion, sauf pour des applications très particulières, la coupure statique n'a pas aujourd'hui un grand développement. Couper grâce à l'arc électrique reste actuellement **la** solution incontournable.

4 Conclusion

De toutes les techniques de coupure en MT la coupure dans le SF₆ et la coupure dans le vide s'imposent par leurs performances.

Le choix entre le vide et le SF₆ dépend surtout du domaine d'application et des choix technologiques des constructeurs, mais aussi des pays : d'où des disparités dans la répartition géographique des appareils utilisant le SF₆ ou le vide.

Actuellement aucune autre technique capable de supplanter la coupure dans le vide ou le SF₆ n'est envisageable. Car ces deux techniques par rapport aux anciennes ont de nombreux avantages :

- La sécurité : pas de risque d'explosion, d'incendie et de manifestations extérieures lors de la coupure.
- La compacité : le vide et le SF₆ sont de très bons isolants, les appareils sont donc moins volumineux.
- La fiabilité : peu de pièces en mouvement avec une énergie de commande faible, d'où une

maintenance réduite, une disponibilité importante, et une durée de vie très longue.

■ La mise sous enveloppe plus facile de ces appareils et la réalisation de tableaux MT préfabriqués très compacts est un autre avantage important puisque le PdC n'est pas influencé par la présence de cloisons métalliques.

Grâce aux moyens de calcul actuels qui permettent la modélisation et la simulation, l'appareillage s'améliore sans cesse.

Cependant, les gains les plus importants en terme de sûreté de fonctionnement des installations (fiabilité, sécurité, maintenabilité) sont liés à l'emploi, qui se généralise, d'équipements sous enveloppe préfabriquée, testés en usine. De tels équipements rassemblent les appareils de coupure associés aux systèmes intégrés de protection et de commande.

Bibliographie

Normes

- CEI 60034 : Machines électriques tournantes.
- CEI 60056 : Disjoncteurs à courant alternatif haute tension.
- CEI 60909 : Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif.
- Rapport CEI 61233 : Disjoncteurs haute tension à courant alternatif - Etablissement et coupure de charge inductive.
- Rapport CEI 61634 : Appareillage à haute tension - Utilisation et manipulation de gaz hexafluorure de soufre (SF_6) dans l'appareillage à haute tension.

Cahiers Techniques Schneider

- Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'aide des composantes symétriques. B. DE METZ-NOBLAT, Cahier Technique n°18.
- Le processus de coupure avec un disjoncteur SF_6 à autocompression, type Fluarc. J. HENNEBERT, Cahier Technique n°112.
- Le processus de coupure avec un disjoncteur Fluarc ou un contacteur Rollarc par arc tournant dans le SF_6 . C. DUPLAY, Cahier Technique n°123.
- La maîtrise des surtensions de manœuvre avec les appareils SF_6 . O. BOUILLIEZ, Cahier Technique n°125.
- Calcul des courants de court-circuit. B. DE METZ-NOBLAT & G. THOMASSET, Cahier Technique n°158.
- Contrôle-commande et protection des moteurs HT. J.-Y. BLANC, Cahier Technique n°165.
- La coupure par auto-expansion. G. BERNARD, Cahier Technique n°171.
- SF_6 properties, and use in MV and HV switchgear. D. KOCH, Cahier Technique n°188.
- Manœuvre et protection des batteries de condensateurs. D. KOCH, Cahier Technique n°189.

Ouvrages divers

- High Voltage Circuit Breakers-Design and Applications-. RUBEN, D. GARZON.
- Disjoncteurs HAUTE TENSION : Comparaison des différents mode de coupure. B. JOYEUX-BOUILLON (GEC ALSTHOM) & J.-P. ROBERT (Merlin-Gerin)
- Disjoncteurs SF_6 : Evolution de 1959 à 1994. D. DUFOURNET, (GEC ALSTHOM- T&D).
- Manœuvre des courants capacitifs - Etat de l'art -. ELECTR n°155, Août 1994.
- Etude des technologies existantes des disjoncteurs de distribution. IREQ, Avril 1991.
- Guide technique du disjoncteur. P. POLO & P. ATTIER, 1993.

Schneider

Direction Scientifique et Technique,
Service Communication Technique
F-38050 Grenoble cedex 9
Télécopie : (33) 04 76 57 98 60

Réalisation : AXESS - Saint-Péray (07).
Photographies : Merlin Gerin et Telemecanique.
Impression : Clerc-Fontaine - 1500.
- 100 FF-