

Le disjoncteur

Chronique d'une réussite technologique

Fritz Pinnekamp



En un siècle, l'électricité s'est imposée comme la source d'énergie la plus flexible et la plus fiable au monde. La demande énergétique mondiale ne cesse d'augmenter et, dans nombre de pays, la consommation électrique est directement liée au PIB.

Si la fiabilité et la sécurité des infrastructures de distribution ne sont plus à démontrer, l'extension incessante des réseaux et l'avènement de nouveaux générateurs posent des défis sans précédents. Dans cet article, nous revenons sur l'évolution des disjoncteurs, éléments incontournables des réseaux électriques, et sur le rôle de pionnier d'ABB et de ses deux sociétés fondatrices, ASEA et Brown Boveri.



Indispensables à la sûreté du réseau électrique, les disjoncteurs sont présents dans les centrales de production pour établir ou interrompre les gigawatts (GW) produits ainsi que dans les postes électriques des réseaux de transport qui acheminent des tensions supérieures à 1500 kV. Ils sont tout aussi fondamentaux sur les réseaux de distribution où les très hautes tensions sont abaissées à des niveaux de moyenne tension. Un disjoncteur, quel que soit son emplacement dans le système électrique, remplit deux fonctions : commuter quotidiennement les lignes en régime normal et les couper en cas de surcharge ou de court-circuit. Il est capable d'interrompre plusieurs GVA en quelques fractions de seconde.

L'importance de cet appareil simple est telle que des dizaines de milliards de dollars ont été consacrées à son développement en un siècle.

Rôle et évolution des disjoncteurs

L'énergie électrique est acheminée des centrales de production aux consommateurs par des câbles métalliques conducteurs, dont les plus visibles sont les lignes aériennes. Le courant peut être interrompu en coupant tout simplement le câble : cette manœuvre, facile en l'absence de courant, l'est beaucoup moins lorsque la ligne est sous tension. En effet, si vous coupez une partie d'un câble sous tension, vous obligez l'électricité à circuler sur une section de plus en plus réduite, provoquant son échauffement, suivi éventuellement de l'évaporation du

Note

¹⁾ Des disjoncteurs sans formation d'arcs électriques (dispositifs à électronique de puissance) offrent d'excellentes performances aux faibles puissances, mais exigent des développements supplémentaires pour élargir leur domaine d'application.

ABB, ÉTERNEL PIONNIER

métal. Même si le câble est complètement coupé, le courant peut continuer de circuler à travers un arc électrique composé des gaz ionisés (plasma) présents entre les contacts ouverts. Seul un disjoncteur capable d'éteindre cet arc peut alors interrompre le courant. Si la vitesse de déplacement des contacts métalliques a donné lieu à nombre de solutions ingénieuses, cet article traite plus particulièrement des progrès réalisés dans la maîtrise de l'arc électrique.

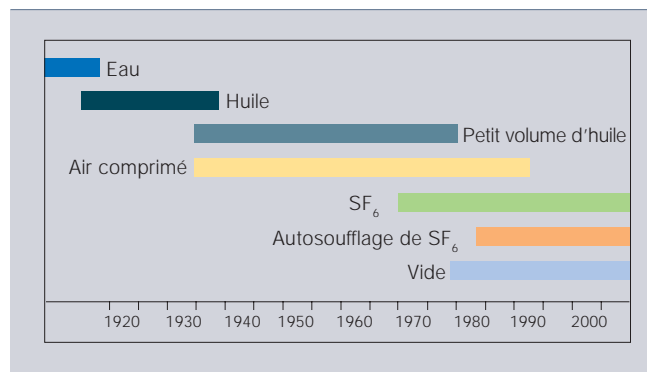
Le disjoncteur est capable d'interrompre plusieurs GVA en quelques fractions de seconde.

Les arcs électriques génèrent énormément d'énergie : leur température peut dépasser les 50 000 °C et leur pression les 100 MPa dans un volume inférieur à un litre. Au fil du temps, différents milieux d'extinction de l'arc ont été utilisés (eau, huile, gaz inertes et air comprimé), la chaleur pouvant être dissipée par un gaz sous haute pression ou par soufflage du gaz résultant de la vaporisation du milieu d'extinction, suite à la formation de l'arc.

La structure interne du disjoncteur contribue également pour beaucoup à l'efficacité de l'appareil, notamment en dirigeant l'écoulement des gaz chauds. Diverses techniques ont été adoptées pour améliorer la dissipation thermique, y compris l'utilisation de matériaux partiellement destructibles. **1** illustre l'évolution des différents types de disjoncteurs utilisés ces cent dernières années par ASEA, Brown Boveri et, plus récemment, ABB¹⁾.

Les premiers disjoncteurs à l'eau et à l'huile fonctionnaient à des niveaux de courant et de tension très bas. Leurs contacts étaient immergés dans une grande cuve remplie d'eau ou d'huile **2**. Sous l'action de l'arc, l'ionisation du milieu provoquait la formation d'hydrogène. À l'approche du zéro de courant (ex., toutes les 10 ms

1 Principaux types de disjoncteurs de puissance



dans un réseau alternatif 50 Hz), l'hydrogène sous pression comprimait le canal d'arc rempli de gaz entraînant une perte de conductivité de la zone entre les contacts et donc l'extinction de l'arc. Hélas, l'important volume d'huile requis par ces appareils les rendait peu maniables et, en cas de défaillance, l'élévation de la pression interne présentait un risque notable d'explosion et d'incendie **2**. Malgré ces inconvénients, ce milieu d'extinction a longtemps dominé et les lourds disjoncteurs à petit volume d'huile, dont le principe de fonctionnement est illustré en **3**, furent utilisés jusque dans les années 80. Succinctement, lors de la formation de l'arc, l'huile se vaporise et une bulle de gaz sous pression, formée à près de 80 % d'hydrogène, entoure l'arc. Ce gaz neutralise l'ionisation et se déplace autour de l'arc en favorisant la convection dans l'huile et le refroidissement de l'arc au voisinage du zéro de courant. Ce principe de convection

2 Disjoncteur unipolaire à l'huile d'extérieur fabriqué à partir de 1923 (110 kV, 350 A)



par l'arc fut, par la suite, repris dans les disjoncteurs à autosoufflage.

Les disjoncteurs à petit volume d'huile offrent les meilleures performances aux courants forts qui engendrent une brusque élévation de pression et une forte convection. Pour des courants plus faibles, en régime normal, l'autosoufflage ne peut être total sans un piston mobile qui favorise, par exemple, la convection **4**.

À l'ouverture de ce type de disjoncteur, un arc se forme et la pression dans la chambre de coupure supérieure s'élève considérablement, provoquant le déplacement du piston à la jonction des deux chambres. Lorsque le piston est au niveau du contact mobile, un fort écoulement axial d'huile remonte de la chambre inférieure et refroidit l'arc.

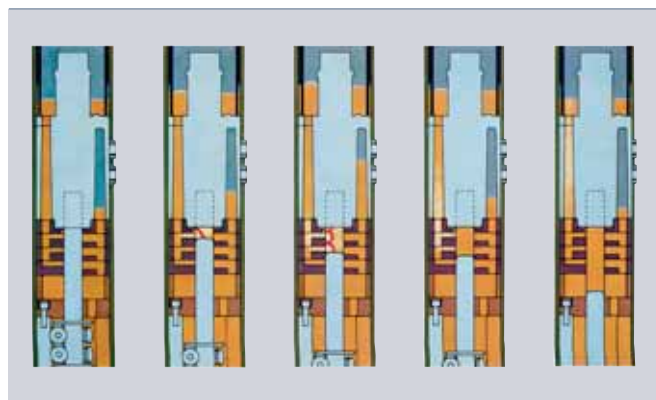
Forts de leurs atouts, les disjoncteurs à petit volume d'huile ont rapidement supplanté les disjoncteurs à gros volume d'huile traditionnels, ce que confirme le graphique des ventes dans les années 40 **5**.

Bon isolant électrique, l'huile est capable de couper la tension réseau entre les contacts d'un disjoncteur ouvert. L'air donne des résultats semblables, mais uniquement s'il est comprimé à plusieurs MPa. L'utilisation de tels niveaux de pression dans les disjoncteurs à air comprimé imposait de concevoir une nouvelle chambre de coupure, dont le développement s'est fait parallèlement à celui des disjoncteurs à l'huile au cours des premières décennies de l'électricité.

Dans les disjoncteurs à air comprimé, l'arc est refroidi par la convection causée par les fortes différences de pression entre les parties internes du disjoncteur et l'air ambiant ; une soupape s'ouvre et l'air comprimé s'échappe à grande vitesse de la chambre de coupure. La conception du composant critique garantissait le positionnement correct de l'arc par rapport au fort écoulement d'air. Plusieurs modèles de buse furent

ABB, ÉTERNEL PIONNIER

3 Séquence d'ouverture des contacts dans un disjoncteur à petit volume d'huile sur courant de court-circuit (1976)



testés avant d'adopter, au final, un soufflage axial semblable à celui de la chambre de compression.

Les modèles à air comprimé et à petit volume d'huile avaient chacun leurs atouts et inconvénients. Les disjoncteurs à l'huile, surtout à autosoufflage, étaient de conception simple et nécessitaient peu d'énergie mécanique. Cependant, l'huile présentait un risque d'incendie et était délicate à manipuler. Les disjoncteurs à air comprimé, quant à eux, exigeaient de puissants compresseurs et étaient très bruyants. Plus propres et plus faciles à entretenir que leurs homologues à l'huile, leur gaz sous pression pouvait également servir à actionner les contacts.

Les disjoncteurs à air comprimé furent bien accueillis par le marché, les ventes croissant de 20 % par an entre 1967 et 1971. Mais le développement concomitant des deux technologies créa un clivage entre les défenseurs de chacune, y compris chez les constructeurs eux-mêmes. Si en 1955, certains ingénieurs affirmaient que *le disjoncteur à autosoufflage était imbattable pour les hautes tensions jusqu'à 380 kV*, d'autres déclaraient en 1978 que *le disjoncteur à faible volume d'huile lui avait «soufflé» la première place et qu'il ne serait certainement pas «étouffé» par le SF₆ [hexafluorure de soufre]*. Le marché en a décidé autrement et, contre toute attente, le SF₆ s'est imposé face à ses deux prédécesseurs.

Le SF₆ est un gaz inerte aux excellentes propriétés isolantes, même à une

pression relativement faible (0,5 MPa); aux pressions plus élevées, il se liquéfie et ne peut souffler l'arc. Le principe de fonctionnement du disjoncteur au SF₆ est illustré en 4.

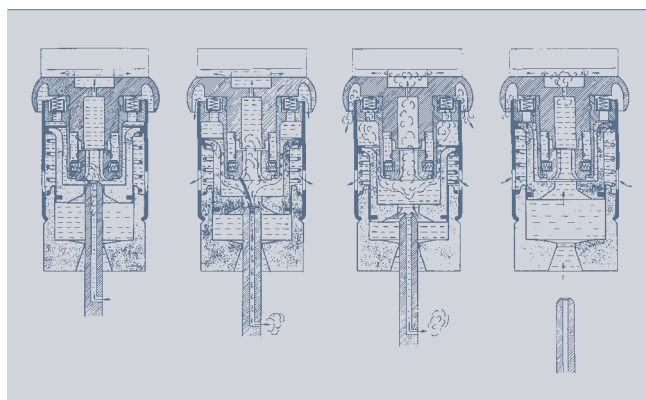
Les arcs électriques génèrent énormément d'énergie : leur température peut dépasser les 50000 °C et leur pression les 100 MPa dans un volume inférieur à un litre.

Le contact mobile intègre un piston (formé d'une buse et d'un cylindre) qui comprime le SF₆ lors du déplacement des contacts. Pendant la formation de l'arc, le SF₆ froid, provenant de la partie inférieure en compression, entre en contact avec l'arc dans un écoulement axial et diffuse son énergie.

Cette technique offre de nombreux avantages : maintenance minimale, fonctionnement propre, absence de compression externe et de bruit de pompage. Le SF₆ comme milieu de coupure a aujourd'hui les faveurs des clients et des ingénieurs ; depuis 1970, son développement a capté d'importants investissements.

Capitalisant sur les atouts du SF₆, les ingénieurs d'ABB l'ont associé à la technologie de l'autosoufflage utilisée dans les disjoncteurs à petit volume d'huile. Les premières applications de cette association ont toutefois pris une autre direction, à l'image de celle des

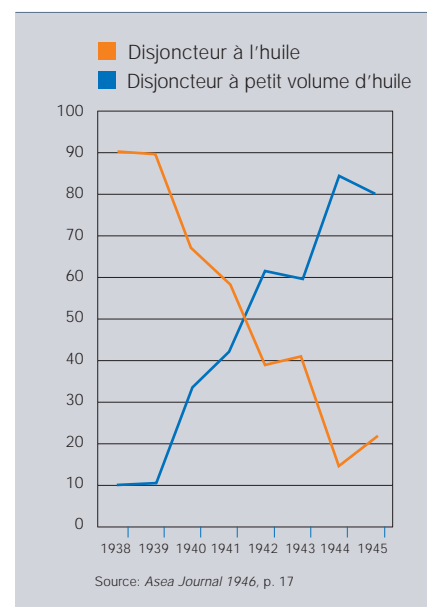
4 Fonctionnement de la chambre de compression à l'ouverture



disjoncteurs à vide : l'utilisation d'un champ magnétique pour maîtriser l'arc. Lorsque les contacts sont ouverts et qu'un arc se forme, les électrodes en spirale créent un champ magnétique qui imprime à l'arc un mouvement de rotation à grande vitesse. L'arc se mélange alors au SF₆ froid qui l'éteint rapidement.

Quelques années plus tard, le savoir-faire accumulé dans le refroidissement de l'arc, l'écoulement du gaz, l'ablation des matériaux et l'isolation dans le gaz aboutirent à un disjoncteur au SF₆ innovant et plus simple, avec moins de pièces en mouvement et une zone intercontacts réduite. Cette technologie fut aussitôt associée à celle du soufflage forcé pour débou-

5 Volume comparé des ventes de disjoncteurs à l'huile ASEA dans les années 40



ABB, ÉTERNEL PIONNIER

cher sur les disjoncteurs de dernière génération d'ABB, capables de commuter des courants de plus de 25 GVA dans une seule chambre de coupure, soit des performances multipliées par 100 en l'espace de 80 ans **7**.

Le SF₆ est un gaz inerte aux excellentes propriétés isolantes, même à une pression relativement faible (0,5 MPa).

8 présente un disjoncteur moderne à cuve sous tension. Dans cet appareil, l'énergie nécessaire à la coupure du courant de court-circuit est en partie fournie par l'arc lui-même, ce qui fait qu'il nécessite une énergie de manœuvre inférieure de moitié à celle d'un disjoncteur au SF₆ à soufflage forcé. Cette moindre consommation énergétique limite les contraintes imposées au disjoncteur, qui gagne ainsi en fiabilité.

Tous ces disjoncteurs sont tributaires d'un milieu propice à la formation d'arcs électriques. Les disjoncteurs à coupure dans le vide opèrent différemment. Lorsque les contacts sous tension se séparent dans le vide, les

vapeurs métalliques provenant des électrodes fournissent un milieu conducteur à la colonne d'arc. Les électrodes en spirale génèrent un champ magnétique dans lequel l'arc tourne. Ce dernier s'éteint lorsque les vapeurs métalliques recondensent sur les électrodes et les parois de la chambre de coupure.

Depuis le début des années 80, ABB a fabriqué plus d'un million de chambres de coupure sous vide, produit de haute technologie sur un marché très demandeur. La gamme destinée aux disjoncteurs s'échelonne de 12 à 40,5 kV avec des courants de court-circuit atteignant 63 kA.

Les disjoncteurs de demain

Dans tous les types de disjoncteur, la maîtrise de l'arc électrique a donné lieu à de nombreuses études et découvertes au cours des cent dernières

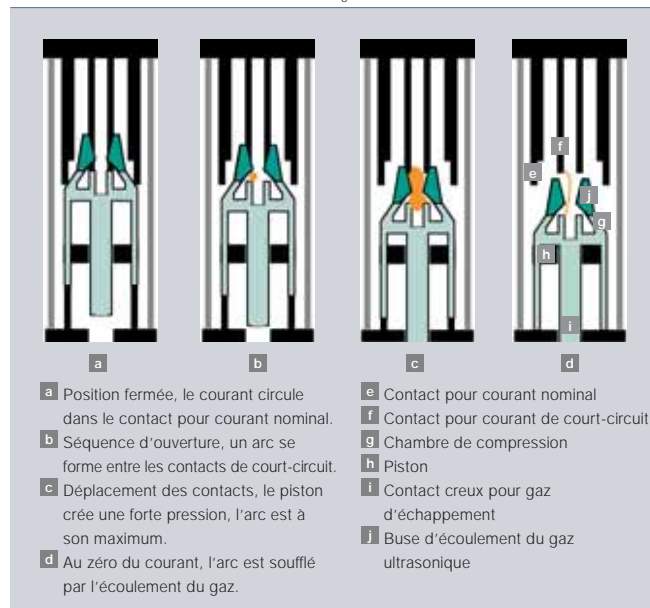
années. Or ne serait-il pas plus judicieux d'empêcher toute formation d'arc par une nouvelle technique de commutation à base de semi-conducteurs de puissance?

L'industrie électrique fait largement appel à l'électronique de puissance et le transport en courant continu à haute tension (CCHT) – activité phare d'ABB – met en œuvre le *ne plus ultra* de cette technologie. Pour l'appliquer aux disjoncteurs, ses performances doivent être considérablement améliorées. Si l'état de l'art dans le domaine des semi-conducteurs de puissance permet, en théorie du moins, de concevoir des disjoncteurs, la solution serait extrêmement complexe et hors de prix. Un disjoncteur 100 % électronique ne serait d'ailleurs pas compétitif sur le marché actuel.

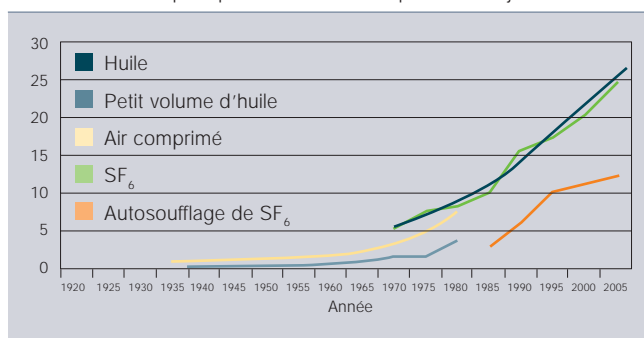
L'évolution des disjoncteurs montre, néanmoins, que l'association de diverses technologies éprouvées dans de nouveaux produits est une démarche fructueuse. ABB s'inscrit dans cette tradition, désireux de faire converger les

disjoncteurs classiques et les dispositifs à électronique de puissance. Les développements dans ce domaine vont se poursuivre avec des gains de performances en perspective.

6 Manœuvre d'un disjoncteur au SF₆



7 Pouvoir de coupure par chambre de coupure des disjoncteurs ABB



8 Disjoncteur à cuve sous tension pour un pouvoir de coupure de 40 kA sous 170 kV maxi



Friedrich Pinnekamp
Group R&D and Technology
Zurich (Suisse)
Friedrich.pinnekamp@ch.abb.com