n° 171

la coupure par auto-expansion

Georges Bernard

Est diplômé ingénieur IEG -Institut Electrotechnique de Grenoble- en 1960.
Entre la même année chez Merlin Gerin, d'abord au Service des Brevets, puis aux Services des Recherches.
En 1966, il soutient avec succès une thèse de Docteur ès Sciences sur la mesure du courant par voie optique.
Depuis 1961, il participe aux études relatives à la coupure dans le SF6, et oeuvre dans le domaine de la coupure statique et hybride.
En 1993, au sein de la Direction Recherche et Développement de Merlin Gerin, il conduit de nouvelles études sur la coupure, pour les disjoncteurs de l'avenir.

CT 171 édition décembre 1993

lexique

densité électronique	nombre d'électrons libres par unité de volume (≈ $10^{17}/cm^3$ dans les arcs de coupure)
HTA - HTB	ces termes sont utilisés dans ce document conformément à la législation française (décret du 14 novembre 1988). Ils correspondent aux niveaux de tension suivants : ■ HTA : 1 à 50 kV, ■ HTB : > 50 kV. Au niveau européen (Circulaire du 27 juillet 1992 du CENELEC -Comité Européen de Normalisation Electrotechnique-) sont aussi employés les termes MT et HT : ■ MT : 1 à 35 kV, ■ HT : > 35 kV.
GIS	Gas Insulated Switchgear : appareillage hermétiquement clos (cf. CEI 298)
interférométrie	méthode de mesure de très grande précision fondée sur les phénomènes d'interférence (interférence : phénomène résultant de la superposition d'oscillations ou d'ondes de même nature et de fréquences égales ou voisines).
organismes de certification	Les plus importants sont : ■ l'ASTA -Association of Short-circuit Testing Authority- en Angleterre, ■ le CESI -Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano- en Italie, ■ l'ESF -Ensemble des Stations d'essais à grande puissance Françaises-, ■ la KEMA -Keuring Elektrotechnische Materialen Arnhem- en Hollande. Ces organismes sont membres au niveau international du STL -Short-circuit Testing Liaison-.
strioscopie	méthode optique révélant les variations d'indice de réfraction d'un fluide (gaz). Elle permet d'observer les variations de pression ou de température d'un gaz contenu dans un volume, et d'en connaître ainsi les mouvements.
SF6	hexafluorure de soufre.
vide	pression inférieure à 10^{-1} Pascal.

la coupure par auto-expansion

sommaire

1. Historique des techniques de coupure	Les techniques de coupure en HTA et HTB	p. 4
	Les techniques particulières de coupure dans le SF6	p. 5
2. La coupure par auto-expansion	L'auto-expansion : un nouveau palier technique	p. 7
	La réalisation	p. 7
3. Disjoncteurs à auto-expansion dans le SF6	Le disjoncteur du RM6 200 A - 24 kV / 16 kA	p. 12
	Le disjoncteur SB6 2 000 A - 72 kV / 31,5 kA	p. 12
	Essais de développement et de certification	p. 13
4. Conclusion		p. 14
5. Bibliographie		p. 15

Le mot auto-expansion est attaché à différentes techniques, ou mode de coupure, selon les documents techniques et les constructeurs de disjoncteurs.

Dans ce Cahier Technique après avoir signalé les différences notables qui peuvent être cachées sous ce même terme, tant sur les principes de coupure que sur leurs particularités, l'auteur présente la coupure par auto-expansion dans le SF6. Elle est, à ce jour, seulement mise en pratique dans les disjoncteurs Merlin Gerin.

Pour terminer sont présentés deux modèles de disjoncteurs dont les performances montrent tout l'intérêt de ce mode de coupure.

1. historique des techniques de coupure

Dans le numéro de décembre 1992 de la Revue Générale de l'Electricité, J. CLADE, contrôleur général à l'EDF, écrivait :
«Les matériels électrotechniques, depuis maintenant une centaine d'années, sont à la base du développement des réseaux électriques.
En particulier, les postes seraient devenus monstrueux si des progrès, peu spectaculaires sur l'instant mais nombreux et constants, n'avaient permis d'augmenter en permanence les performances spécifiques de ces matériels».
L'appareillage de commande et de protection, qu'il soit du domaine Basse Tension -BT- ou Haute Tension -HT-, n'échappe pas à cette règle.

Si, en BT, la coupure magnétique dans l'air utilisée dès l'origine a encore de l'avenir, l'évolution de la coupure en Moyenne -MT- et haute tension s'est appuyée sur les changements du milieu diélectrique. En effet, chaque changement de fluide motivé par l'amélioration des trois critères :
■ performance,
■ sécurité,
■ fiabilité,
et par une diminution des coûts, a entraîné une modification radicale de la technique de coupure.

La technique de coupure, en elle-même, présente peu d'intérêt pour l'utilisateur mais elle intervient, en plus des critères ci-dessus, sur :
■ le coût global (appareil - installation - exploitation),
■ l'encombrement,
■ les contraintes électriques générées lors de la coupure.

En clair, pour un disjoncteur, la technique de coupure est déterminante sur le plan technico-économique.

L'histoire de l'appareillage est, de ce fait, intimement liée à celle des techniques de coupure et des milieux diélectriques utilisés.
Afin d'éclairer au mieux la situation actuelle, un rappel sur les techniques chronologiquement utilisées s'impose.

les techniques de coupure en HTA et HTB

Différentes techniques, dans l'air, l'huile, le SF6 et le vide, sont utilisées.

La coupure dans l'air
Avec la montée en tension et en puissance des réseaux cette coupure a

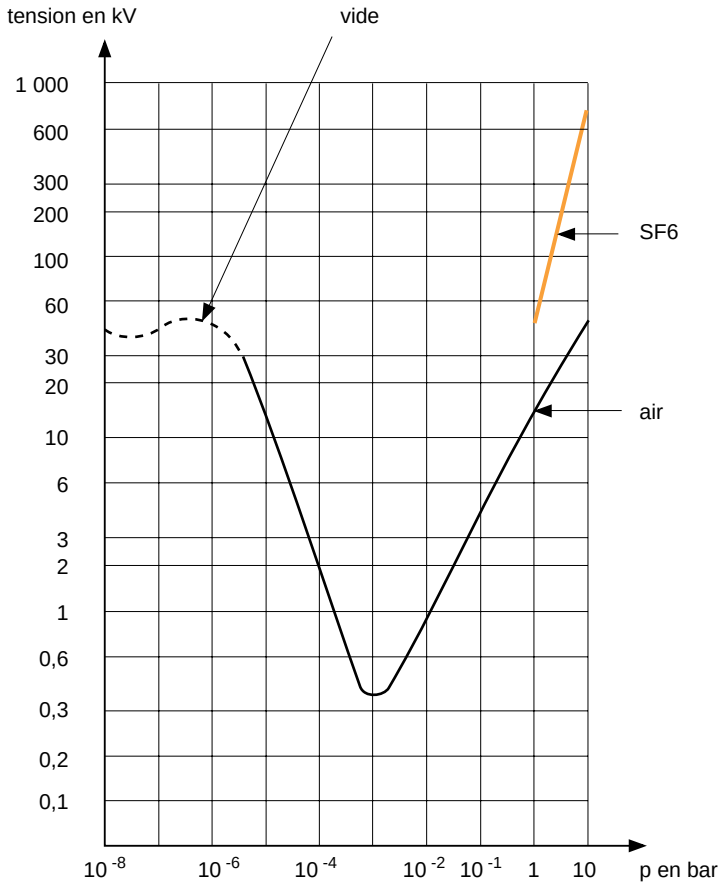


fig. 1 : évolution de la rigidité diélectrique de l'air et du SF6 en fonction de la pression, en champ faiblement inhomogène pour une distance de 12 mm entre électrodes.

fait appel successivement aux techniques :
■ des contacts auxiliaires d'arc,
■ du soufflage de l'arc,
■ de l'allongement de l'arc par effet magnétique (principe du SOLENARC). Cette technique, utilisée jusqu'à 20 kV, n'est pratiquement plus employée aujourd'hui en raison de l'encombrement important des appareils qui l'intègrent.
■ de l'air comprimé : l'exploitation des propriétés physiques de ce diélectrique (cf. fig. 1) a permis des progrès déterminants dans la réalisation de disjoncteurs pour les très hautes tensions. Mais, les appareillages qui utilisent cette technique sont assez complexes et coûteux, aussi ne sont-ils encore employés qu'en haute et très haute tension dans les pays froids car l'air présente l'avantage de conserver ses propriétés à très basse température.

La coupure dans l'huile

Ce mode de coupure est apparu au début du siècle. Il a permis les premières réalisations de disjoncteurs en HTB, puis une diminution importante de l'encombrement grâce à la technique VHR (à Volume d'Huile Réduit). Ces disjoncteurs équipent encore les postes HTA et HTB dans certains pays tels que le Brésil et ceux de la CEI (ex URSS). Ils sont en cours de substitution en Europe et aux USA par des disjoncteurs au SF6 ou vide. Leur disparition progressive est due essentiellement aux dangers inhérents à l'huile (inflammable, explosible), aux travaux de génie civil nécessaires à leur installation (bacs de rétention) et à la maintenance préventive.

La coupure dans le SF6 et le vide

Les techniques exploitant ce mode de coupure, dont l'émergence industrielle date du début des années 60, se caractérisent par l'utilisation de milieux (SF6 et vide) extincteurs d'arc aux propriétés exceptionnelles, dans des pôles de coupure scellés, étanches, de faibles dimensions, intégrant des pièces de contact simples.

En effet, le SF6 et le vide présentent deux avantages :
■ en régime transitoire, une constante de temps de désionisation qui peut être cent fois plus faible que celle de l'air comprimé. Ceci élimine le risque de réarmorçage sans nécessiter l'emploi d'artifices tels que résistances ou condensateurs d'amortissement ;
■ en régime établi, des propriétés diélectriques remarquables comme l'indique la courbe de Paschen représentée sur la figure 1.

Evolution et domaine d'emploi

A moyen terme, seules la coupure dans le SF6 et la coupure dans le vide devraient subsister.
En ce qui concerne les domaines d'emploi, le SF6 et le vide devraient se partager le marché en HTA, le SF6 étant seul en HTB (> 50 kV).
La variation de la tenue diélectrique entre électrodes (cf. fig. 2) montre en effet que si le vide est performant en HTA, il plafonne à 200 kV quelle que soit la distance entre électrodes.

les techniques particulières de coupure dans le SF6

L'objet de ce Cahier Technique étant de présenter le principe de la coupure par auto-expansion, il est nécessaire de situer ce principe parmi les autres techniques utilisant le SF6 comme fluide de coupure.
En 30 ans, celles-ci ont évolué, passant peu à peu d'un soufflage de l'arc provoqué mécaniquement (double pression, pistonnage) à un soufflage lié au courant lui-même (arc tournant, expansion).
Ces termes correspondent à des actions sur l'arc, différentes ou combinées, dont le but essentiel est de refroidir l'arc. En fait, ils n'ont pas toujours la même signification selon les constructeurs qui les utilisent. Le tableau de la figure n° 3 page 6 décrit, pour chaque technique comment l'arc est soufflé ou refroidi.

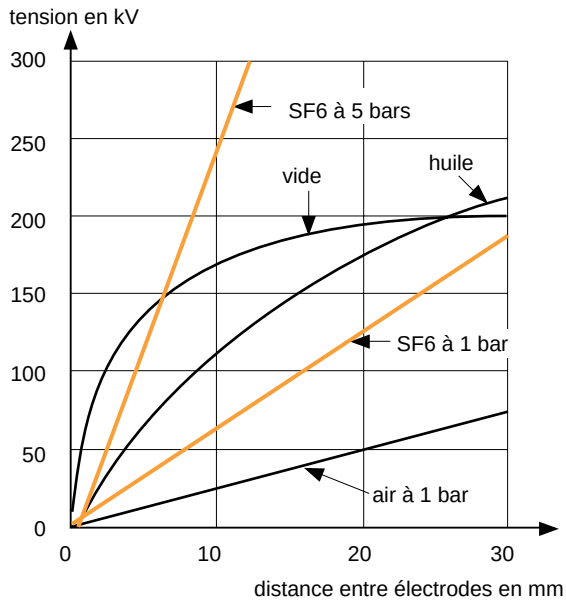


fig. 2 : influence de la distance inter-électrodes sur la rigidité diélectrique.

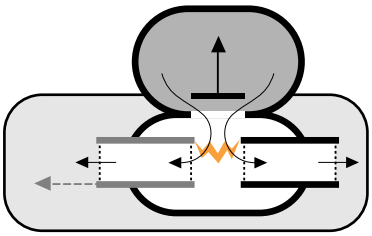
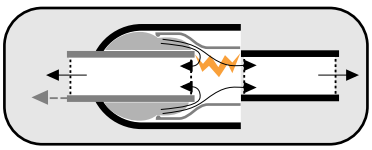
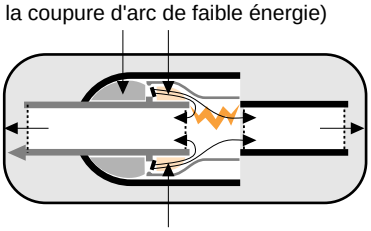
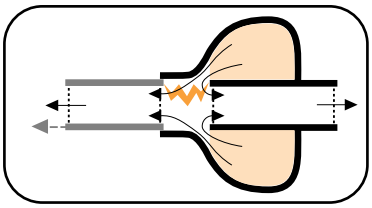
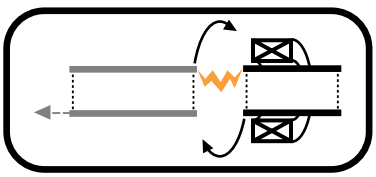
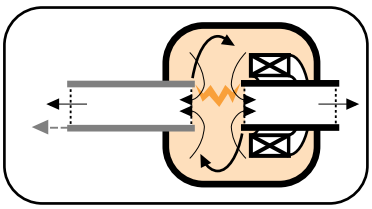
schéma	appellations :	dans ce Cahier	autres	description
		double pression	pneumatique	un gaz, préalablement comprimé dans un réservoir «haute pression» est libéré lors de la coupure par l'ouverture d'un clapet : il souffle l'arc en s'écoulant à travers les contacts tubulaires (tuyères) vers un réservoir «basse pression»
		pistonnage (puffer)	autocompression autopneumatique autosoufflage	un gaz est comprimé par le mouvement d'un piston, solidaire de l'ouverture des contacts, il souffle l'arc en s'écoulant à travers une buse.
volume total de compression (pour la coupure d'arc de faible énergie)  volume de compression réduit (pour la coupure d'arc de forts courants)		pistonnage et expansion thermique (puffer and self pressurerise)	autopneumatique et expansion thermique (autopuffer-thermal blast) auto-expansion	même principe que le cas précédent mais avec deux volumes de compression : ■ un volume donnant une pression réduite pour la coupure de petits courants, d'où une énergie de commande réduite ; ■ un volume «réduit» par la fermeture automatique de clapets provoquée par la pression élevée développée par une énergie d'arc importante (expansion thermique), d'où un renforcement du soufflage.
		expansion thermique	autosoufflage	l'arc est refroidi par un soufflage obtenu par l'écoulement de gaz à travers la buse, écoulement dû à l'élévation de pression d'origine thermique, produite par l'arc autour des contacts.
		arc tournant (rotating arc)		l'arc se refroidit en tournant sous l'action d'un champ magnétique radial produit par le courant à couper (forces de Laplace).
		auto-expansion	autosoufflage autopuffer self-blast	même principe que le cas précédent avec, en plus, un soufflage de l'arc obtenu par l'écoulement du gaz à travers les contacts, écoulement dû à l'élévation de pression d'origine thermique produite par l'arc autour des contacts.

fig. 3 : les techniques de coupure dans le SF6.

2. la coupure par auto-expansion

l'auto-expansion : un nouveau palier technique

Au début des années 80, pour améliorer les gammes existantes de disjoncteurs et anticiper les évolutions des matériels concurrents, les services de marketing de la société Merlin Gerin définirent un cahier des charges beaucoup plus exigeant que pour un simple renouvellement de gamme.
Les chercheurs et concepteurs de la société furent alors conduits à envisager un changement important des techniques de coupure employées. Dans ce but ils se fixèrent, outre une réduction significative des prix de revient, des objectifs précis :

■ augmenter la sûreté (fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité) par réduction du nombre de pièces en mouvement et diminution de l'énergie nécessaire à la commande. Il en découle :
□ un allègement global des structures électromécaniques,
□ une diminution de l'encombrement.

■ minimiser les perturbations induites lors des manœuvres normales et lors de la coupure des courants de défaut, ceci pour les diverses charges :
□ moteurs,
□ transformateurs,
□ condensateurs et lignes à vides.

■ employer une nouvelle technique de coupure, si possible la même en HTA et en HTB afin d'améliorer le cumul d'expérience.

Pour atteindre ces objectifs ambitieux, les concepteurs privilégièrent alors une technique à «propre courant» car :
■ l'énergie d'interruption (de soufflage) est prélevée sur le courant à couper lui-même,
■ le pouvoir de coupure s'adapte au courant à interrompre,
■ les propriétés exceptionnelles du SF6 sont bien exploitées.

La technique de l'auto-expansion s'avéra répondre à ce cahier des charges. Elle est actuellement mise en œuvre dans plusieurs disjoncteurs et correspond, dans les faits, à un nouveau palier technique dans le domaine des appareils de coupure.

la réalisation

L'auto-expansion associe :
■ le soufflage par expansion thermique du SF6,
■ le guidage de l'arc et son soufflage par effet électromagnétique.

Le soufflage par expansion

L'arc qui naît spontanément entre les contacts lors de leur ouverture dissipe une énergie :

$$W = \int_0^t (Ua \cdot i)\ dt$$

avec Ua = tension d'arc.
Cette énergie s'évacue, directement ou indirectement, par :
■ conduction,
■ rayonnement,
■ convection.
La figure 4 illustre cette dissipation.
Dans les appareils à auto-expansion c'est environ 1/4 de l'énergie d'arc qui est transmise au SF6 qui s'échauffe.
Si les contacts sont enfermés dans un volume étanche (volume amont, cf. fig. 5), l'augmentation de la

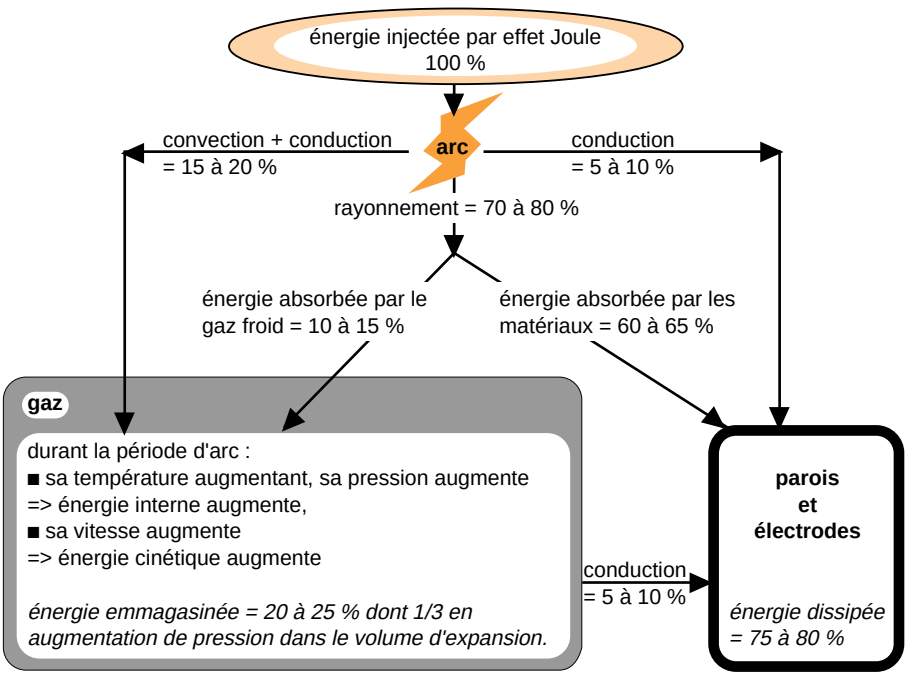


fig. 4 : flux énergétiques lors d'une coupure de courant d'après une modélisation.

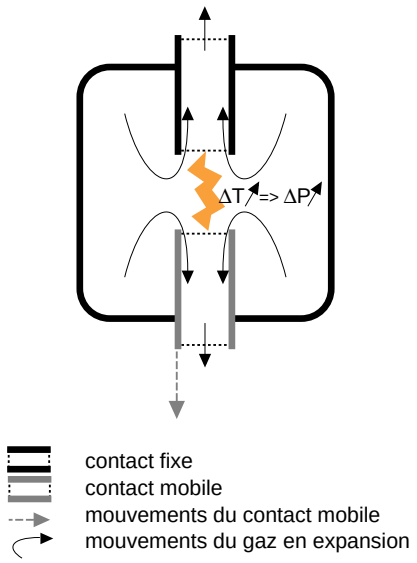


fig. 5 : principe de la coupure par expansion dans le SF6.

température provoque la montée en pression du gaz :

$$\Delta P = \frac{R}{V} \cdot \Delta T$$

R étant la constante thermodynamique des gaz parfaits.
Si au moins un des contacts est creux, la surpression provoque l'écoulement du gaz vers les zones restées froides dans l'ensemble de l'appareil (volume aval).
En s'écoulant, le gaz refroidit l'arc qui s'est établi entre les contacts creux servant de tuyères d'échappement.

Le guidage de l'arc

La description précédente montre une situation quelque peu idéalisée. Si des précautions ne sont pas prises, l'arc peut s'écarter de la position axiale, par exemple sous l'action des forces électrodynamiques (cf. fig. 6).
Il se trouve alors hors du trajet des gaz d'échappement, ou du moins dans une région où leur vitesse est trop faible pour avoir la moindre influence.
Pour palier ce défaut, il convient de guider l'arc.
Deux modes de guidage sont possibles : mécanique et magnétique.

■ le guidage mécanique

C'est le plus efficace, le plus sûr et le moins délicat à mettre en œuvre.
Il dérive directement (cf. fig. 7) des dispositions adoptées dans les disjoncteurs à pistonnage. Il présente néanmoins un certain nombre d'inconvénients sur le plan de la coupure :
□ la présence de la pièce isolante de guidage (buse) déforme le champ électrique et conduit à des distances d'ouverture et à des vitesses de contacts importantes, augmentant l'énergie nécessaire à la commande mécanique.
□ seule une faible partie de l'arc se situe dans le volume amont, dans une zone très excentrée, le reste de l'arc étant pour partie dans la buse.
Le rendement énergétique s'en trouve réduit d'autant, la surpression et le soufflage aussi, surtout pour les petits courants.

■ le guidage magnétique

L'arc, placé dans le champ magnétique d'un aimant ou d'une bobine, se centre avec la composante axiale et tourne sous l'action de la composante radiale (cf. fig. 8).

Comparé au guidage mécanique, il présente certaines difficultés d'étude et de mise au point :
□ la barrière magnétique est immatérielle, difficile à cerner, en particulier elle comporte des zones d'instabilité délicates à mettre en évidence. Elle ne s'appréhende qu'à travers des calculs, des mesures et des simulations.
□ les distances inter-contacts sont limitées (le champ magnétique diminue fortement avec l'éloignement de la bobine).
Mais en revanche il offre des avantages déterminants :
□ le champ électrique n'est pas perturbé par la présence d'une pièce isolante et les tenues diélectriques sont importantes dès les faibles courses, d'où :
- la possibilité d'utiliser le SF6 sous faible pression,
- une coupure facilitée des courants capacitifs,
- une minimisation possible des courses des contacts et donc une énergie de commande nécessaire réduite,
□ l'échange d'énergie arc-gaz est facilité.

■ la rotation de l'arc

Elle diminue considérablement l'usure des contacts, ce qui augmente le nombre de manœuvres (endurance électrique) ; cette technique fort intéressante est utilisée par les disjoncteurs/contacteurs Fluarc et Rollarc (cf. Cahier Technique n° 123). C'est une des conséquences importantes du guidage magnétique de l'arc.

L'association de ce guidage au soufflage par expansion permet

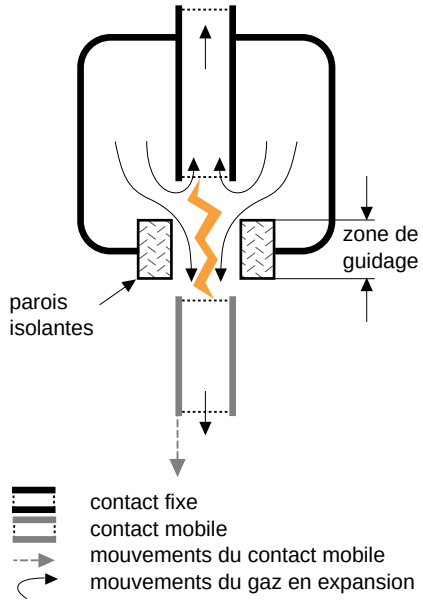


fig. 7 : guidage mécanique par paroi isolante.

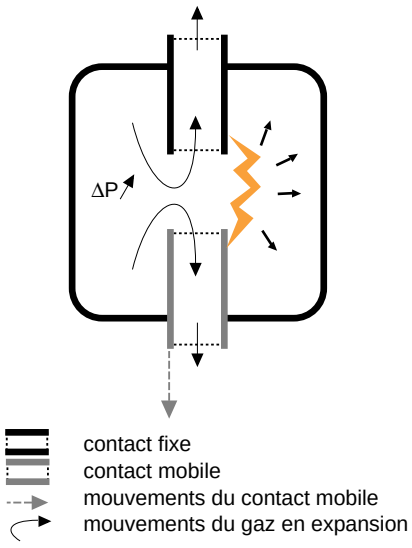


fig. 6 : exemple d'un arc non guidé.

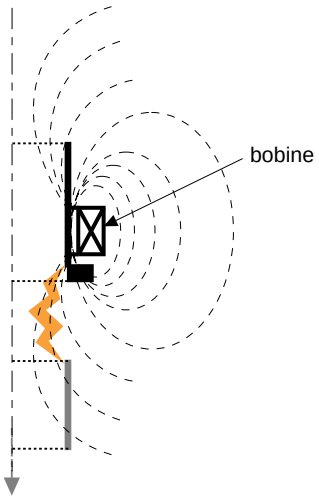


fig. 8 : guidage de l'arc par le champ magnétique d'une bobine (demi-coupe).

d'améliorer notablement les performances des appareils : les disjoncteurs à auto-expansion peuvent ainsi travailler en HTB contrairement à ceux qui n'utilisent que l'arc tournant.
En effet, l'expansion réalise un balayage efficace de la zone inter-contacts, car sous l'action du jet de gaz :
□ les particules métalliques provenant des électrodes sont évacuées dans les tuyères ;
□ à l'approche du zéro de courant les racines d'arc sont repoussées dans les électrodes tubulaires (tuyères) qui se refroidissent plus rapidement
(cf. fig. 9).

Les moyens de mise au point

La volonté de n'utiliser que l'énergie développée par l'arc lui-même et les forces magnétiques induites par le courant à couper a nécessité, lors de la mise au point, l'emploi d'outils sophistiqués.

A titre d'exemple :
■ pour l'étude des écoulements gazeux et la visualisation de l'arc, il a été fait appel à l'optique.
Les écoulements de gaz, en présence ou non d'arc électrique, ont été visualisés par strioscopie. Cette technique utilise la déviation apportée par un milieu d'indice de réfraction variable au trajet d'un faisceau lumineux qui le traverse.
De nombreux montages sont possibles, les concepteurs ont retenu celui de la figure 10.
Le modulateur acousto-optique en sortie du laser à argon permet d'augmenter artificiellement les performances d'une caméra mécanique à prisme tournant. Celle-ci est utilisée sans son prisme, le modulateur commandant directement le temps d'exposition et la cadence des prises de vues (typiquement 0,5 et 20 µs respectivement). De cette manière il est possible d'observer le centrage de l'arc et son allongement dans les tuyères à l'approche du zéro de courant (cf. fig. 9).

L'étude strioscopique en gaz froids (sans arc électrique) a mis en évidence les zones de turbulence, de décollement, d'ondes de choc et, comme le montre la figure 11, les filets d'écoulement gazeux.

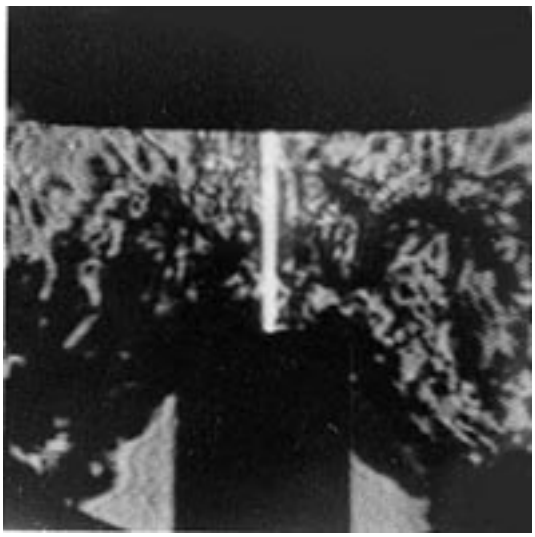
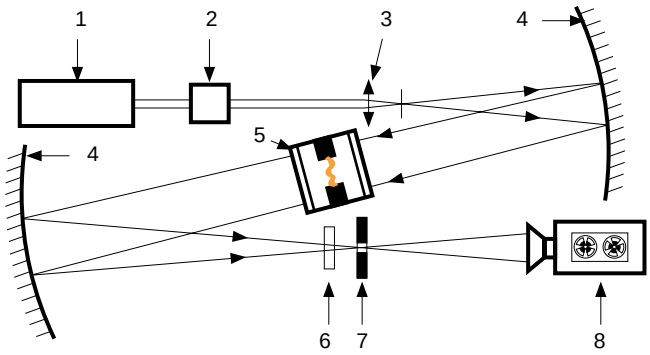


fig. 9 : centrage de l'arc à l'approche du zéro de courant.



1 : laser
2 : modulateur acousto-optique
3 : filtre spatial
4 : miroirs sphériques ø 200 mm
5 : disjoncteur
6 : filtres
7 : diaphragme
8 : caméra ultra-rapide

fig. 10 : dispositif optique de strioscopie.

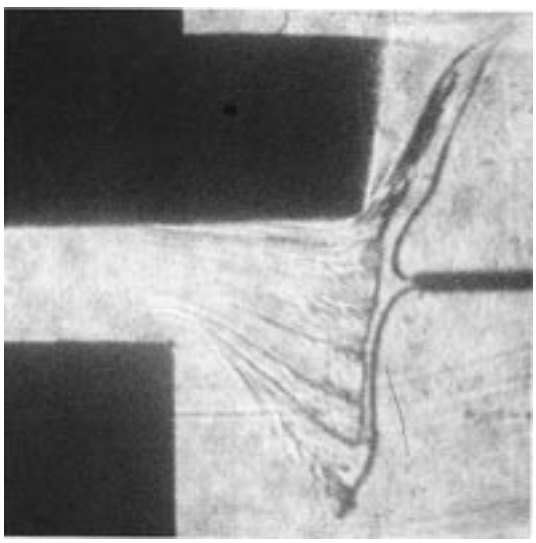


fig. 11 : visualisation de l'écoulement des gaz lors de l'ouverture des contacts (à droite de la photographie se trouve des fils résistants destinés à chauffer le gaz ambiant).

La méthode d'interférométrie différentielle, beaucoup plus souple d'emploi que les montages classiques (Michelson, Mach-Zender...) et moins sensible aux défauts d'alignement et aux vibrations, permet de comparer les vitesses d'écoulement des gaz dans diverses géométries, symétriques et dissymétriques (cf. fig. 12).

La présence d'un arc diminue beaucoup l'intérêt de certaines méthodes précédentes, en particulier l'interférométrie, en raison de l'apparition de régions fortement turbulentes. Les franges d'interférences se déforment, s'estompent, ou même disparaissent complètement.
D'autres observations directes sur l'arc deviennent en revanche possibles : la mesure de son rayonnement ou de sa température par spectrographie. La remarquable reproductibilité obtenue sur la maquette d'étude a conduit aux résultats des figures 13 et 14. Ces expériences ont permis d'observer la température et la densité électronique jusqu'au voisinage du passage par zéro du courant.

■ pour optimiser certains paramètres thermodynamiques influant sur la coupure, l'informatique scientifique a été utilisée.
En effet, les différentes mesures ou observations réalisables ne peuvent pas rendre compte de l'ensemble des phénomènes, en raison même de leur complexité. En outre, la plupart de ces mesures sont lourdes, et ne peuvent être mises en œuvre que sur des maquettes conçues à cet effet. Elles ne se prêtent pas à l'étude avec variation de paramètres.
Un modèle thermodynamique a donc été conçu pour exprimer les grandeurs principales : vitesse, pression des gaz, température,... en fonction de la géométrie de l'appareil et du courant qui le parcourt. Les mesures, tant en gaz froid qu'en présence d'arc, servent à «caler» le modèle (et aussi à améliorer la compréhension des phénomènes physiques en jeu !).

Les résultats de calcul peuvent être vérifiés indirectement et éventuellement recalés par des comparaisons avec l'expérience, lorsque celles-ci sont possibles. C'est le cas pour la tension d'arc et la pression, grandeurs toutes

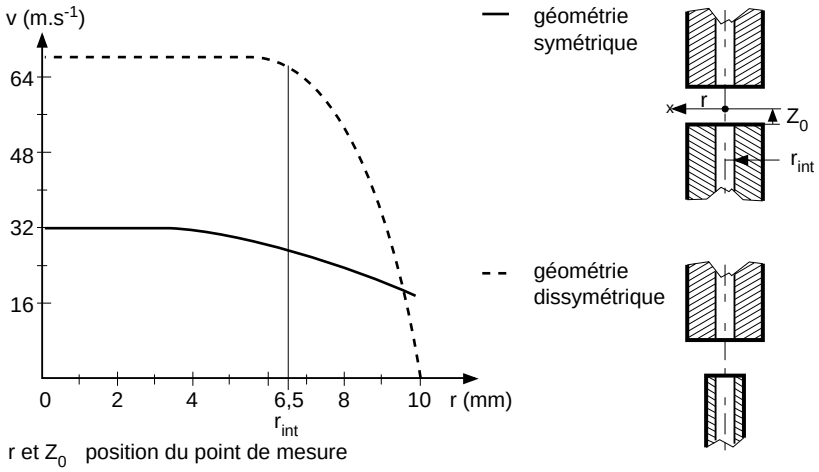


fig. 12 : vitesse radiale d'écoulement du SF6, mesurée par interférométrie différentielle.

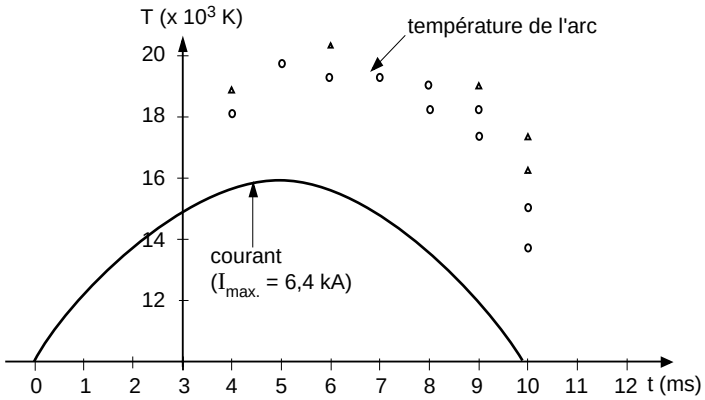


fig. 13 : température de l'arc.

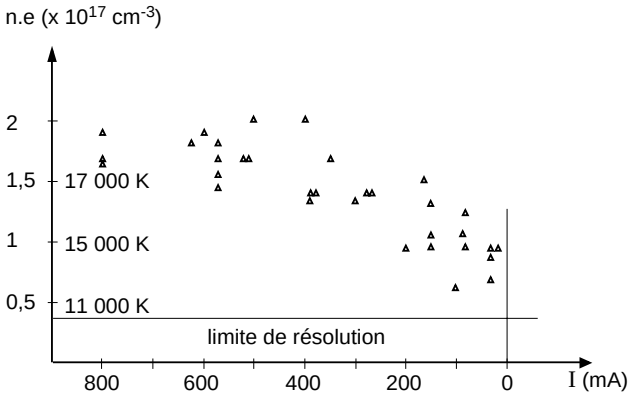


fig. 14 : densité électronique n de l'arc à l'approche du zéro de courant.

deux calculables et mesurables (cf. fig. 15 et 16).
La concordance entre mesures et calculs permet d'atteindre un degré de confiance suffisant lorsque les résultats se rapportent par exemple aux champs de vitesse ou aux débits, pratiquement inaccessibles par expérimentation.
Cette modélisation induit, en outre, une réduction sensible des temps et coûts de développement.

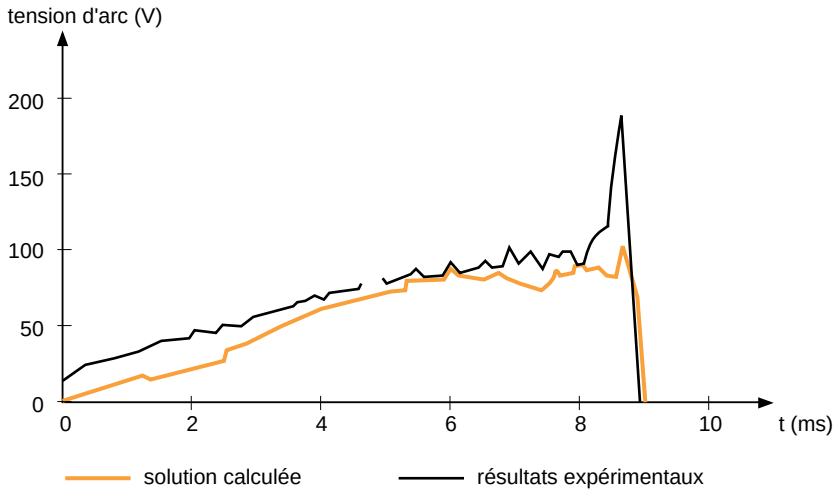


fig. 15 : comparaison entre les résultats d'expériences et de calculs scientifiques (logiciel NS2) sur la tension d'arc.

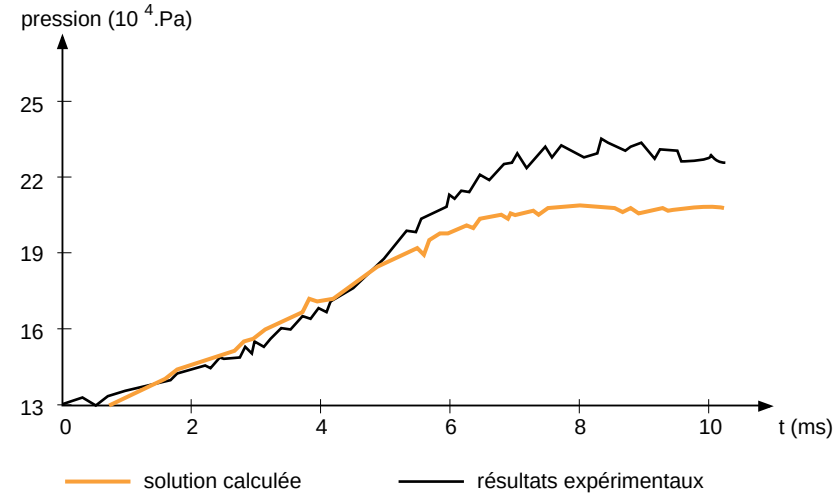


fig. 16 : comparaison entre les résultats d'expériences et de calculs scientifiques (logiciel NS2) sur la montée en pression dans le volume amont.

3. disjoncteurs à auto-expansion dans le SF6

La maîtrise de la technique de l'auto-expansion a permis la commercialisation tant en HTA qu'en HTB, de produits adaptés aux besoins.
Le disjoncteur du RM6 et le disjoncteur SB6 en sont l'illustration.

le disjoncteur du RM6 200 A - 24 kV / 16 kA

Le RM6 est un équipement «tout SF6» (appareillage GIS au sens de la norme CEI 298), à fonctions intégrées, de dimensions réduites. Il est conçu pour permettre une continuité de service maximale des réseaux de distribution en boucle.
Il comporte deux interrupteurs de boucle et un disjoncteur (ou un interrupteur-fusible) dont la fonction est de réaliser une dérivation sur la boucle et/ou d'assurer le branchement et la protection d'un transformateur HTA/BT, (cf. fig. 17).

Le disjoncteur intégré dans le RM6 a pour grandeurs assignées 200 A, 24 kV. L'application de la technique de l'auto-expansion lui apporte des avantages techniques déterminants :

- il est placé, comme les interrupteurs de boucle, dans une enceinte remplie de SF6 à la pression atmosphérique (cf. fig. 17),
- le nombre de pièces est très limité, par exemple une pièce unique assure les fonctions :
  - passage du courant,
  - interruption (contact mobile du disjoncteur),
  - isolement et mise à la terre (disjoncteur ouvert),
- l'énergie totale de commande (F-O) n'atteint pas 100 joules,
- volume inférieur à celui de l'interrupteur + fusible. Il s'installe à la place de l'interrupteur «départ».

Les buts recherchés, (cf. chapitre 2), ont été atteints dans le cadre de cette application HTA avec un disjoncteur simple, compact, économique, ayant un pouvoir de coupure de 16 kA en 24 kV ou 20 kA en 17,5 kV.

En ce qui concerne l'objectif «minimum de surtension de manœuvre», la performance obtenue lors de la mise hors tension d'un transformateur faiblement chargé est bien meilleure que ne l'exige la norme CEI 298 (cf. fig. 18) et place le disjoncteur du RM6 parmi les meilleurs produits du marché.

le disjoncteur SB6 2 000 A - 72 kV / 31,5 kA

Ce disjoncteur, destiné à l'équipement des postes HTB, peut être utilisé dans les postes classiques d'extérieur (cf. fig. 19) ou être intégré dans un poste sous enveloppe métallique (poste «blindé»).
Ici encore, la simplicité de ce disjoncteur se traduit à titre d'exemple :

- sur le plan électromécanique par une énergie de commande (F-O) de 520 joules, (niveau traditionnel en HTA), résultant de la faible course et de la légèreté de son équipage mobile d'un intérêt évident pour la fiabilité.
- sur le plan de la coupure par une mise hors tension très «propre» des lignes à vide comme le montre la figure 20 sur laquelle aucune

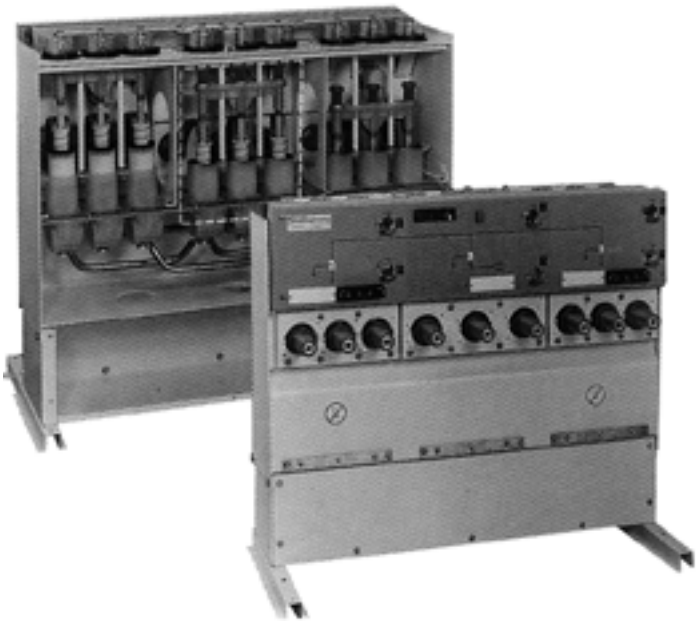


fig. 17 : équipement à protection par disjoncteur, pour la distribution HTA, et dans l'encadré une vue capot enlevé montrant le disjoncteur placé au centre (RM6 - Merlin Gerin).

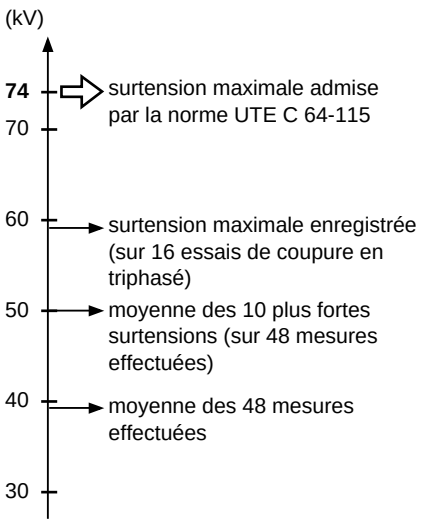


fig. 18 : résultat de tests effectués selon la norme UTE C 64-115 avec un disjoncteur à auto-expansion dans le SF6 (disjoncteur d'un équipement RM6 - Merlin Gerin).

surtension transitoire n'est visible, ceci malgré le choix de l'instant d'ouverture le plus défavorable (0,5 ms avant le zéro de courant). C'est la croissance très rapide de la rigidité diélectrique entre contacts, avec la distance d'ouverture qui est déterminante. La distribution du champ électrique ainsi que l'absence de pièces isolantes (pas de buse de soufflage) dans l'espace inter-contacts permet d'atteindre ce résultat.
Cet essai de coupure d'une ligne à vide fait partie des tests de certification prévus par les normes pour un disjoncteur.

essais de développement et de certification

Avant de commercialiser un disjoncteur, son constructeur doit :

■ réaliser de nombreux essais lors du développement. Ceci malgré la modélisation et la simulation des phénomènes physiques qui contribuent efficacement à la mise au point et ainsi à la réduction du nombre d'essais.

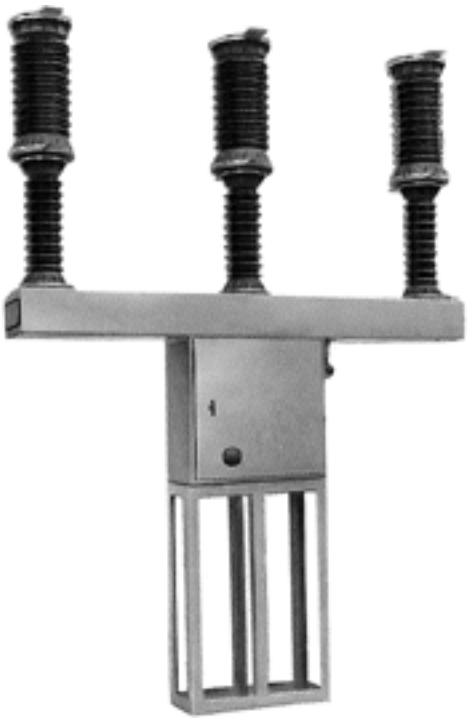


fig. 19 : disjoncteur destiné à l'équipement des postes en HTB (disjoncteur SB6 - Merlin Gerin).

■ faire vérifier par des essais le respect des normes, ceci par une station d'essais accréditée par un ou des organismes nationaux (cf. lexique).

Ces essais permettent d'obtenir un certificat de conformité aux différentes normes.

En HTA et HTB les normes de référence sont les CEI 56 et 694 et ANSI C37-04 et suivantes. EDF exige en outre des essais supplémentaires selon ses propres spécifications.

A titre d'exemple pour la mise sur le marché du disjoncteur SB6, les rapports d'agréments ont nécessité, une centaine d'essais de coupure.

■ au delà des certificats officiels, le cumul d'expérience conduit les constructeurs sérieux à effectuer de nombreux essais complémentaires. Ils doivent vérifier que pour des configurations particulières de réseaux ou pour certaines charges, le comportement du disjoncteur soit sans faille.
Lorsqu'il s'agit d'une nouvelle technique de coupure ces essais sont encore plus nombreux.

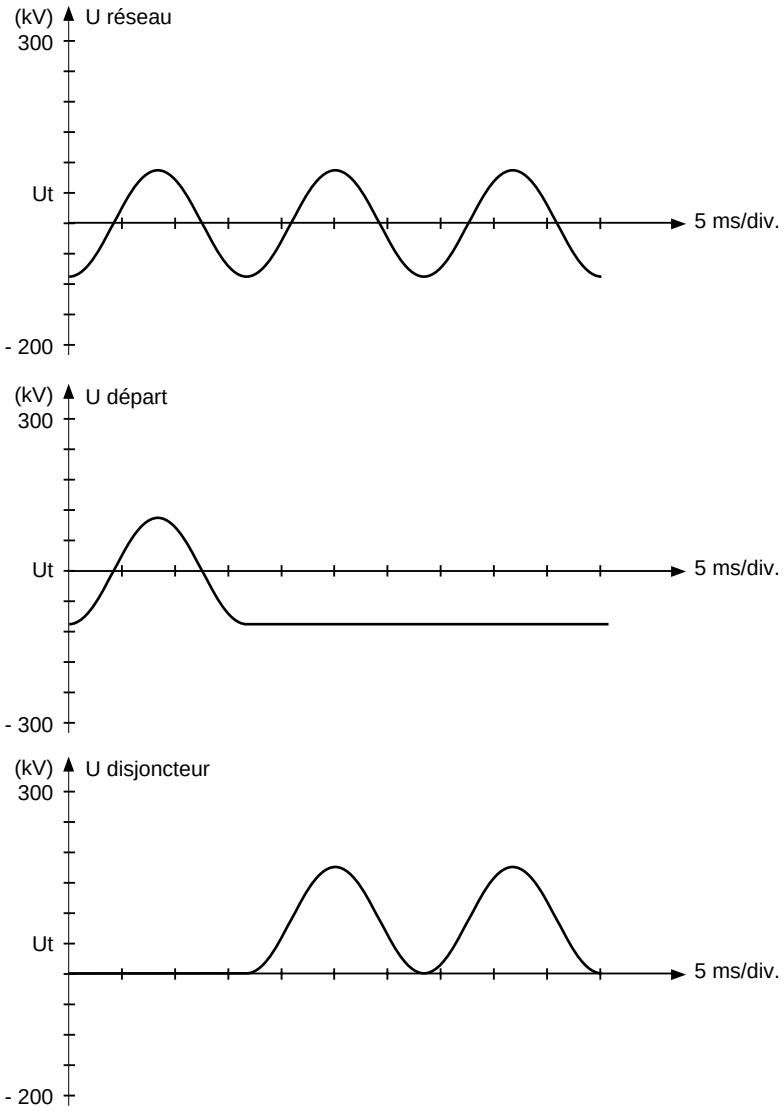


fig. 20 : test de coupure d'une ligne non chargée réalisé avec un disjoncteur à auto-expansion dans le SF6, la chaîne de mesure ayant une bande passante de 10 MHz (disjoncteur SB6 - Merlin Gerin).

4. conclusion

La technique de coupure par auto-expansion du SF6 permet la réalisation de disjoncteurs à coupure douce et auto-adaptative simples et fiables.
Le principe du «propre courant» et la non utilisation d'artifices supplétifs tels que parasurtenseur, résistance, condensateur, font de l'auto-expansion la technique de coupure qui fait oublier le disjoncteur.

Rappelons ses qualités :
- coupure propre (toutes charges),
- bonne fiabilité (peu de pièces en mouvement et faible énergie de commande),
- entretien réduit et faible pression de SF6,
- endurance électrique élevée,
- faible encombrement.

Aucune limitation théorique ou technologique ne s'oppose aujourd'hui à l'utilisation de cette technique en HTA et HTB. Le principal frein à sa généralisation est la durée et le coût du développement et des tests.

Les disjoncteurs à SF6 utilisant le principe de l'auto-expansion associé aux systèmes numériques de protection et contrôle-commande des réseaux sont, et seront demain, encore plus les garants de la meilleure disponibilité de l'énergie électrique.

5. bibliographie

Normes

■ ANSI C37 : Circuits-breakers switchgear substations and fuses standards.

■ CEI 56 : Disjoncteurs à courant alternatif à haute tension.

■ CEI 298 : Appareillage sous enveloppe métallique pour courant alternatif de tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV (≈ NF C 20-312).

■ CEI 694 : Clauses communes pour les normes de l'appareillage à haute tension (NF C 64-010).

■ UTE C 64-115 : Disjoncteurs tripolaires : règles complémentaires spéciales pour la coupure des courants de transformateurs à vide.

Cahiers Techniques Merlin Gerin

■ Le processus de coupure avec un disjoncteur Fluarc ou un contacteur Rollarc par arc tournant dans le SF6.
Cahier Technique n° 123 - C. DUPLAY

Publications diverses

■ Pressure transients in a self-blown circuit-breaker. Eight International Conference on gas discharges.
Oxford, september 1985.
H. DELECROIX et A. GLEIZES.

■ L'expansion : une technique d'avenir pour les disjoncteurs à SF6.
Journées d'études SEE sur l'appareillage de coupure HT et MT.
mars 1987.
G. BERNARD et P. MALKIN.

■ An SF6 circuit-breaker using the auto-expansion principle.
IEEE trad. PWRD, Vol. 3, n°4, october 1988.
G. BERNARD, P. MALKIN et W. LEGROS.

■ Use of an auto-expansion circuit-breaker in a Ring Main Unit.
IEE Proc. Vol. 135, Part. C, n° 3, 1988.
G. BERNARD, G. PERISSIN et J. MARZOCCA.

■ An SF6 auto-expansion breaker : the correlation between magnetic arc control and critical current.
IEEE Summer meeting, july 1989.
G. BERNARD, A. GIRARD, P. MALKIN et P. SCARPA.

■ La coupure par auto-expansion en Haute Tension. Une nouvelle approche vers la réduction de poids et la fiabilité.
CIGRE, 1990.
M. BARRAULT, G. BERNARD, A. GIRARD, A. DELAHOUSSE, O. FILLEAU et J.C. HENRY.

■ Simulation numérique de l'interaction arc électrique - écoulements gazeux dans les disjoncteurs MT et HT.
Thèse de doctorat.
INPG, Grenoble, 1990.
P. CHEVRIER.

■ Les disjoncteurs à auto-expansion sont le fruit d'études approfondies.
RGE, n° 11, décembre 1992.
M. BARRAULT, G. BERNARD, P. CHEVRIER, O. FILLEAU, J.P. KERSUSAN, J. MAFTOUL, S. ROWE, et P. SCARPA.

■ Post-arc current measurements down to the ten milliamperes range.

Réal. : Illustration Technique Lyon - Photo. : Merlin Gerin
DTE - 12/93 - 3500 - Imp. : Léostic Seyssinet-Pariset