



Collection technique

Cahier technique n° 198

La coupure du courant
électrique dans le vide

P. Picot



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 Electric.

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

Rubrique : **Le rendez-vous des experts**

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

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

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 Electric n° (à préciser) ».

n° 198

La coupure du courant électrique dans le vide



Philippe PICOT

Ingénieur civil des mines (ENSMP)

Entré en 1982 chez Merlin Gerin, a assumé différentes responsabilités, principalement dans la fonction technique de la division Moyenne Tension.

Depuis 1995 il participe au développement des gammes d'ampoules à vide Schneider Electric.

Il est actuellement responsable de l'anticipation technologique de l'appareillage MT.

La coupure du courant électrique dans le vide

Ce Cahier Technique constitue une présentation générale des notions de base relatives au fonctionnement et à l'utilisation des appareils à coupure dans le vide.

La première partie, intitulée Théorie et Pratique de la coupure dans le vide, est une description rapide des phénomènes physiques associés à la coupure dans le vide, puis de leur mise en œuvre. Elle comporte aussi une présentation des différentes options technologiques qui s'offrent aux concepteurs d'ampoule à vide.

La deuxième partie est consacrée aux interactions entre l'appareil de coupure dans le vide et le réseau électrique, dans le cas des circuits inductifs pour lesquels la coupure dans le vide est susceptible de provoquer des surtensions, et aux moyens de se protéger contre les surtensions.

Dans la troisième partie, l'auteur explique comment les caractéristiques propres à la coupure dans le vide présentées dans les deux parties précédentes déterminent les domaines préférentiels d'application de cette technique, selon les niveaux de tension et les types d'appareillage.

Ce Cahier Technique est complété d'une large bibliographie d'ouvrages ou documents auxquels pourra se référer le lecteur qui souhaiterait approfondir un point particulier.

Sommaire

1 Introduction : utilisation du vide comme milieu de coupure dans l'appareillage électrique		p. 4
2 Théorie et pratique de la coupure dans le vide	2.1 Les propriétés diélectriques du vide	p. 5
	2.2 L'arc électrique dans le vide	p. 7
	2.3 Phénomènes associés à la coupure au zéro de courant	p. 9
	2.4 Conception pratique des ampoules interrupteurs sous vide	p. 12
3 Coupure dans le vide et surtensions lors de la commande de circuits inductifs	3.1 Les phénomènes générateurs de surtension	p. 19
	3.2 Les mesures de protection contre les surtensions	p. 22
4 Les principaux domaines d'application de la coupure dans le vide		p. 24
	4.1 Les applications de la technique de coupure dans le vide en Moyenne Tension	p. 25
	4.2 Les applications de la coupure dans le vide en Basse Tension	p. 28
	4.3 Les applications de la coupure dans le vide en Haute Tension	p. 29
5 Conclusion		p. 30
Bibliographie		p. 31

1 Introduction : utilisation du vide comme milieu de coupure dans l'appareillage électrique

Le SF6 et le vide sont les deux techniques de coupure modernes dans les domaines de la Moyenne Tension (de 1 à 52 kV) et de la Haute Tension (> 72,5 kV). Apparues dans les années 60 elles se sont développées rapidement à partir des années 70 et ont aujourd'hui supplanté les anciennes techniques de coupure dans l'air et dans l'huile (cf. **fig. 1**).

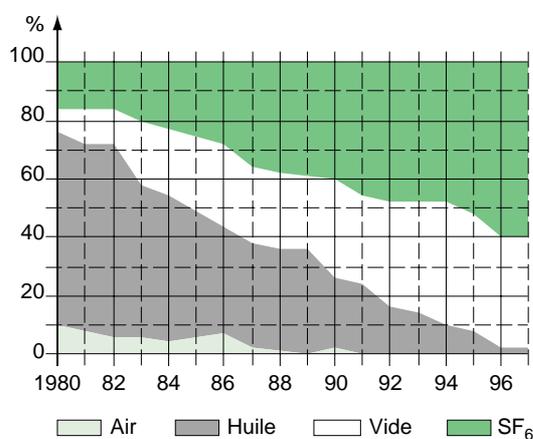


Fig. 1 : évolution des marchés des disjoncteurs MT en Europe.

Alors que le SF6 est utilisé dans l'ensemble des gammes moyenne tension et haute tension, le vide s'est essentiellement développé dans le domaine de la moyenne tension, avec des incursions limitées en basse tension et en haute tension : les deux techniques ne sont donc concurrentes que dans le domaine de la moyenne tension.

La notion de concurrence entre les deux techniques est en fait maintenant dépassée : s'il y a bien eu une concurrence commerciale entre

des constructeurs ayant opté pour l'une ou l'autre de ces techniques, aujourd'hui tous les grands constructeurs proposent l'une et l'autre afin d'être en mesure d'offrir à chaque utilisateur une solution satisfaisant au mieux ses besoins. En effet, chaque technique a ses points forts et ses points faibles. Même si chacune est largement polyvalente et est susceptible d'offrir une solution fiable et compétitive à la plupart des problèmes d'interruption en moyenne tension, les utilisateurs souhaitent être en mesure de choisir en fonction de leurs applications, de leurs politiques d'exploitation et de maintenance, de leurs priorités ... et de leurs habitudes !

Historiquement la technique de coupure dans le vide a été développée d'abord par des constructeurs américains et anglais (les pionniers sont General Electric et VIL), suivis des japonais et des allemands : leurs pays ont en commun d'utiliser pour la distribution de l'énergie électrique en moyenne tension des réseaux de tension nominale relativement basse (de 7,2 à 15 kV). Par contre dans les pays, comme la France et l'Italie, qui distribuent leur électricité à des niveaux de tension proches de 24 kV, les constructeurs ont opté pour la technique de coupure dans le SF6.

Il est remarquable de constater, 30 ans après, la justesse de ces choix technologiques par rapport à l'application envisagée. En effet aujourd'hui encore, une évaluation technico-économique globale des deux techniques montre un point d'équivalence situé entre 12 et 24 kV, avec un avantage relatif au SF6 au-dessus de ce niveau de tension, et au vide en dessous. Les écarts de coûts restent cependant faibles, ce qui explique que peuvent coexister les deux offres, vide et SF6, sur l'ensemble des niveaux de la moyenne tension, de 7,2 à 36 kV.

2 Théorie et pratique de la coupure dans le vide

2.1 Les propriétés diélectriques du vide

Tout milieu de coupure doit d'abord être un bon isolant puisqu'il s'agit de s'opposer au passage du courant. Le vide ne fait pas exception à la règle : il présente des propriétés diélectriques intéressantes mais particulières par rapport aux isolants gazeux qui sont habituellement utilisés à des pressions supérieures ou égales à 1 bar.

Le vide, qualifié de « poussé » (plage de pression de 10^{-1} à 10^{-5} Pa, soit 10^{-3} à 10^{-7} mbar) des ampoules d'interrupteurs sous vide (cf. **fig. 2**) est en fait un gaz à faible pression : typiquement 10^{-6} mbar dans une ampoule neuve.



Fig. 2 : une ampoule à vide 17,5 kV de Schneider Electric.

A cette pression un volume de 1 mm^3 contient encore $27 \cdot 10^6$ molécules de gaz, mais celles-ci s'ignorent largement puisque leur libre parcours moyen entre deux collisions est de l'ordre d'une centaine de mètres : le terme de vide est donc approprié puisque chaque molécule se comporte à peu près comme si elle était seule.

Rappel sur le comportement diélectrique des gaz

Aux niveaux habituels de pression (pression atmosphérique et au-delà) le comportement diélectrique des gaz est représenté par la branche droite de la courbe de Paschen (cf. **fig. 3**) : la tension de claquage V est une fonction croissante du produit $p \cdot d$ (p = pression, d = distance entre les électrodes). Cette relation caractérise le mécanisme d'ionisation en chaîne

(avalanche de Townsend) responsable du claquage : les électrons doivent acquérir entre deux collisions une énergie suffisante (proportionnelle à $\frac{V}{p \cdot d}$) pour ioniser les molécules du gaz et créer ainsi d'autres électrons.

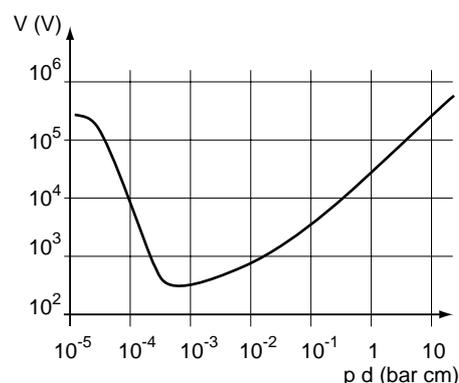


Fig. 3 : évolution de la rigidité diélectrique de l'air en fonction de la pression (courbe de Paschen).

Aux basses valeurs de pression, ce mécanisme ne fonctionne plus. En effet, les électrons peuvent acquérir beaucoup d'énergie pendant leur libre parcours moyen, mais la probabilité qu'ils rencontrent des molécules à ioniser avant d'atteindre l'électrode devient faible : le processus d'avalanche et de multiplication des porteurs de charge ne peut plus se produire et la tenue diélectrique s'améliore. C'est ce que traduit la courbe de Paschen qui présente un minimum de tenue diélectrique pour un produit $p \cdot d$ de l'ordre de 1 Pa m pour l'azote. En deçà de cette valeur, la tenue diélectrique s'améliore rapidement (branche gauche de la courbe de Paschen) jusqu'à atteindre un palier pour les valeurs de $p \cdot d$ inférieures à 10^{-2} Pa m . C'est ce palier qui caractérise le comportement diélectrique dans les ampoules sous vide (pression inférieure à 10^{-3} mbar, soit 10^{-1} Pa, distances de l'ordre de 1 à 10 cm). Il correspond à un niveau de tenue élevé comparable à celui du gaz SF6 à environ 2 bars pour des intervalles de l'ordre du cm. Dans ce domaine ce ne sont plus les mécanismes d'ionisation du gaz résiduel qui limitent la tenue diélectrique mais des phénomènes liés à l'état de surface des électrodes, tels que l'émission électronique de champ et la présence de particules détachables.

c Emission électronique de champ

L'émission électronique consiste en l'extraction des électrons du métal des électrodes. Cela peut se faire en élevant suffisamment la température du métal : c'est l'émission thermoélectronique qui se produit au niveau des cathodes chauffées des tubes électroniques. Un autre moyen est d'appliquer un champ électrique suffisamment fort au niveau de la surface du métal. Ce dernier phénomène, l'émission électronique de champ, est susceptible d'être rencontré dans des ampoules sous vide. Il est régi par l'équation de Fowler-Nordheim qui, sous sa forme simplifiée, s'écrit :

$$j_e = \frac{AE^2}{\phi} \exp\left(-\frac{B\phi^{1,5}}{E}\right), \text{ où}$$

j_e est la densité de courant électronique en Am^{-2}
 $A = 1,54 \cdot 10^{-6} \text{ AJV}^{-2}$

E est le champ électrique en Vm^{-1}

ϕ est le travail d'extraction en eV (4,5 eV pour le cuivre)

$B = 6,83 \cdot 10^9 \text{ VJ}^{-1,5} \text{ m}^{-1}$

Comme on le constate à partir des valeurs numériques indiquées précédemment, l'émission électronique de champ ne devient appréciable que pour des valeurs de champ à la surface des métaux comprises entre quelques 10^9 Vm^{-1} et 10^{10} Vm^{-1} . Il s'agit de valeurs très élevées, nettement plus élevées que les valeurs de champ macroscopique appliquées dans les ampoules sous vide (de l'ordre de $10^7 \text{ Vm}^{-1} = 100 \text{ kV/cm}$). Pourtant l'émission électronique de champ est bien observée dans les ampoules sous vide : il faut donc en conclure que localement, au niveau de sites microscopiques, le champ électrique est renforcé par un facteur d'intensification β de l'ordre de quelques 10^2 ou 10^3 . Les phénomènes pouvant expliquer ces fortes valeurs de β ne sont pas encore complètement élucidés par les chercheurs qui mettent généralement en avant soit l'effet de pointes microscopiques, soit l'effet d'inclusions ou de particules isolantes à la surface des métaux.

v Conditionnement en tension

L'existence de sites microscopiques d'émission actifs se traduit en général par une mauvaise tenue diélectrique des ampoules neuves (quelques 10 kV/cm) ; par contre, on constate expérimentalement que les claquages diélectriques répétés détruisent ces sites ou au moins réduisent la valeur du facteur d'intensification qui les caractérise de manière très sensible. La tenue diélectrique satisfaisante (par rapport aux valeurs assignées) n'est donc obtenue qu'à l'issue d'un processus de conditionnement en tension consistant en l'application d'une tension élevée (de l'ordre de grandeur de la tenue escomptée) pendant quelques minutes : les multiples claquages qui se produisent élèvent progressivement la tenue entre électrodes. Ce phénomène est illustré par la **figure 4** montrant l'évolution dans le temps de

la tension de claquage au fil des décharges : un plafonnement de l'amélioration de la tenue diélectrique apparaît à un niveau proche de 10^8 Vm^{-1} , ce qui correspond encore à un β microscopique «irréductible» de l'ordre de 100.

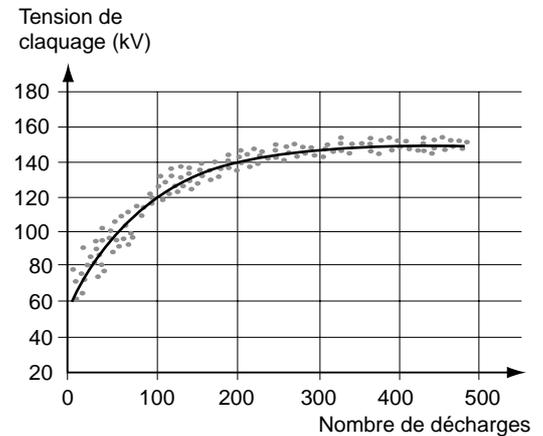


Fig. 4 : évolution dans le temps de la tension de claquage entre deux électrodes dans le vide au fil des décharges.

v Mécanismes de claquage

Les claquages diélectriques qui ont leur origine dans le courant d'émission électronique mettent en œuvre des mécanismes complémentaires : en effet, des courants d'émission électronique stables (pour des valeurs maximales de quelques mA) ne dégèrent pas forcément en claquage si la tension appliquée n'est pas augmentée, ils peuvent même diminuer d'eux-mêmes par effet de conditionnement. Le claquage proprement dit est lié à la création d'un plasma (gaz ionisé) localisé, suffisamment dense pour que se produise le phénomène d'avalanche des décharges gazeuses.

Le plasma peut être produit du côté de la cathode par l'explosion du site émissif microscopique provoquée par l'échauffement intense dû à la densité de courant localement très élevée (effet Joule) : le claquage se produit dans la vapeur métallique générée par la destruction du site émissif.

Le plasma peut aussi être produit du côté de l'anode bombardée par un faisceau d'électrons fortement énergétiques (ce qui se traduit, par ailleurs, par l'émission de rayons X). Cet afflux localisé d'énergie provoque la désorption des gaz absorbés en surface et la vaporisation du métal de l'anode : le gaz généré est alors ionisé par les électrons du faisceau, et le claquage se produit.

c Influence des particules détachables

Un deuxième facteur est susceptible de provoquer des claquages diélectriques dans le vide : il s'agit des particules détachables

présentes à la surface des parois d'une ampoule sous vide. Libérées, soit par un choc, soit par l'effet des forces électrostatiques, ces particules chargées acquièrent de l'énergie en traversant l'espace inter-électrodes. Au moment de leurs impacts sur l'électrode qui les attire, elles sont alors susceptibles de déclencher un claquage de deux manières éventuellement complémentaires :

- ✓ par augmentation locale de la densité de gaz due à la désorption des molécules de gaz absorbées ;
- ✓ par le déclenchement du phénomène d'émission électronique et la vaporisation partielle de la particule ou de l'électrode sous l'effet du faisceau qui les bombarde.

Une confirmation de l'importance pratique des particules est la constatation expérimentale que la tenue diélectrique dans le vide entre deux électrodes croît approximativement en proportion de la racine carrée de la distance qui les sépare. Cette relation peut s'expliquer par l'hypothèse que les particules doivent atteindre une énergie suffisante (proportionnelle à V^2/d) pour pouvoir provoquer un claquage. Pour cette même raison, les grosses particules, susceptibles de porter une charge électrique plus importante, sont plus gênantes que les petites.

De l'influence défavorable des particules détachables sur la tenue diélectrique des ampoules sous vide, deux conséquences sont à retenir :

- il est difficile d'atteindre des tenues très élevées, même avec un écartement important des électrodes (cf. **fig. 5**),
- la tenue diélectrique d'une ampoule sous vide présente un caractère aléatoire : le claquage peut intervenir avec retard par rapport à l'application de la tension et pour une tension inférieure à celle supportée auparavant sans défaillance.

Synthèse

- Le vide présente des propriétés diélectriques intéressantes à condition de se limiter à des

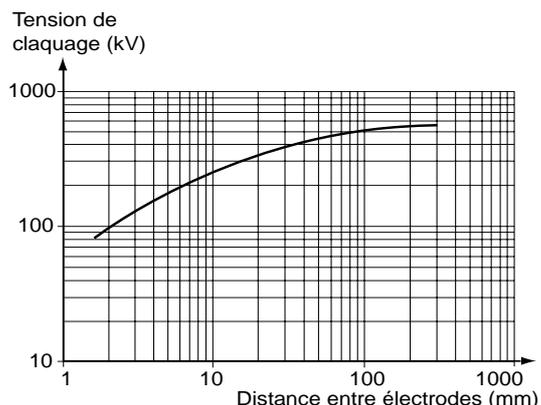


Fig. 5 : tenues accessibles pour des distances entre électrodes très importantes.

tensions appliquées de l'ordre de 100 à 200 kV, ce qui correspond aux niveaux d'isolement requis pour les tensions assignées à 36 kV pour lesquelles des distances de quelques centimètres entre électrodes suffisent. Au-delà l'atteinte de la tenue diélectrique nécessaire devient laborieuse et moins efficace qu'avec une isolation gazeuse au SF6.

- La tenue diélectrique de tout dispositif de coupure dans le vide évolue dans le temps. En effet, les manœuvres mécaniques et l'effet de l'arc électrique modifient l'état de surface des contacts et génèrent des particules : le niveau de tenue atteint à l'issue du conditionnement en tension ne peut donc pas être considéré comme définitivement acquis. Le vide n'est donc pas le milieu isolant idéal lorsque la fiabilité de la tenue diélectrique est primordiale, par exemple pour une application sectionneur.

2.2 L'arc électrique dans le vide

Bien que, comme décrit dans la section précédente, le vide soit un excellent diélectrique, un arc peut très bien « vivre » dans le « vide ». En fait, les tensions d'arc dans le vide sont généralement nettement inférieures à celles des arcs développés dans d'autres milieux, ce qui constitue un avantage au regard de l'énergie dissipée dans l'arc. L'arc dans le vide peut se présenter, en simplifiant volontairement, sous deux formes principales : le mode diffus et le mode concentré.

Un mode diffus, caractéristique du milieu «vide»

Le mode diffus est spécifique de l'arc dans le vide : il présente des particularités remarquables qui le différencient nettement des arcs dans les

milieux gazeux. C'est le mode qu'adopte naturellement un arc dans le vide pour une plage de courant s'étendant de quelques ampères à quelques kA.

Les principales caractéristiques du mode diffus sont les suivantes :

- la cathode émet dans l'espace inter-électrodes, par l'intermédiaire d'un ou de plusieurs spots cathodiques, un plasma globalement neutre constitué d'électrons et d'ions à forte vitesse dirigés principalement normalement à la surface de la cathode ;
- l'anode, baignée par ce plasma sur toute sa surface, agit en collecteur passif de charges. Les spots cathodiques et le plasma sont les spécificités de l'arc en mode diffus.

c Le spot cathodique

Le spot cathodique est une zone de très petite dimension (rayon de l'ordre de 5 à 10 μm), capable d'émettre un courant pouvant atteindre une centaine d'ampères.

Au niveau du spot cathodique règnent des conditions de température et de champ électrique extrêmes (typiquement 5000 K et 5 10^9 V/m) permettant l'émission électronique par la combinaison des mécanismes d'émission thermoélectronique et de champ (en anglais T.F. : thermo-field emission) capable de produire des densités de courant très élevées (de l'ordre de 10^{11} à 10^{12} A/m²).

Au-delà de 100 A, ce spot se subdivise et plusieurs spots coexistent sur la cathode, en nombre suffisant pour transiter le courant à raison d'une centaine d'ampères chacun. Ils se repoussent mutuellement, ce qui a fait qualifier leur mouvement de « rétrograde » car il est en contradiction avec l'effet habituel des forces électromagnétiques. Ainsi un arc en mode diffus tend à occuper toute la surface disponible de la cathode (même si à un instant donné les sites émissifs ne représentent qu'une toute petite fraction de la cathode).

c Le plasma

A l'échelle macroscopique, le spot cathodique (cratère et plasma proche qui lui est associé) apparaît comme le point de production d'un plasma de faible densité émanant du spot et remplissant l'espace inter-électrodes. Ce plasma, globalement neutre (densités égales de charges + et -), est constitué d'électrons et d'ions typiquement doublement chargés (pour un arc sur des électrodes à base de Cu). Une des caractéristiques de ce plasma est la grande vitesse des ions qui présentent des énergies supérieures à la tension d'arc (ce qui témoigne des phénomènes hautement énergétiques se produisant dans la zone du spot cathodique). Ces ions qui émanent du spot avec une distribution de vitesse approximativement en cos (angle / normale) n'ont donc pas de difficulté à atteindre l'anode et créent un courant ionique de sens opposé au courant principal électronique qui représente typiquement 10 % du courant d'arc. La vitesse dirigée de ces ions est de l'ordre de 10^4 m/s, supérieure à leur vitesse d'agitation thermique.

Une des conséquences importantes de la vitesse élevée des ions créés par les spots cathodiques est leur faible temps de transit dans l'espace inter-électrodes (typiquement de l'ordre de 1 μs). Le plasma, créé par un spot cathodique, étant constitué de particules très mobiles (électrons et ions rapides, pratiquement pas de neutres) disparaît donc très rapidement lorsque le spot cesse de fonctionner (au zéro de courant).

L'anode baigne dans le plasma émanant des spots cathodiques. Elle se comporte comme une électrode passive collectant les charges et extrayant le courant imposé par le circuit en ajustant son potentiel : il est négatif par rapport à celui du plasma tant que le courant est inférieur

à celui correspondant aux impacts liés à l'agitation thermique des électrons.

La répartition des potentiels dans l'arc est la suivante :

v un saut cathodique de l'ordre de 20 V au voisinage immédiat de la cathode ;

v une chute de tension de quelques volts dans le plasma qui croît avec la distance et le courant (caractéristique positive permettant la coexistence de plusieurs arcs en parallèle, contrairement aux arcs dans le gaz) ;

v un saut anodique négatif dans le cas considéré ci-dessus (courant modéré soutiré par l'anode).

Dans ce mode, l'érosion de la cathode est faible : elle correspond au flux d'ions quittant la cathode, soit environ 40 $\mu\text{g/C}$. Une part importante de ces ions se dépose sur l'anode ce qui, en courant alternatif, fait que l'érosion nette est beaucoup plus faible : approximativement divisée par un facteur 10 pour les contacteurs qui opèrent dans ce mode avec des courants limités et des électrodes à faible écartement.

Un mode concentré analogue à celui de l'arc dans un milieu gazeux

Lorsque le courant augmente, la situation décrite précédemment tend à évoluer tout d'abord du côté de l'anode. Plusieurs phénomènes concourent à cette évolution.

c D'abord une contraction de la colonne de plasma généralement expliquée par l'effet Hall (déviations des charges par le champ magnétique azimuthal créé par les autres lignes de courant, d'où l'apparition d'une composante radiale tendant à resserrer les lignes de courant vers l'axe) : le courant se concentre sur une région plus limitée de l'anode.

c Par ailleurs l'anode devant attirer de plus en plus d'électrons, la neutralité du plasma n'est plus assurée : les ions positifs manquent pour équilibrer la charge d'espace des électrons au voisinage de l'anode. Ceci entraîne la formation d'un saut de tension anodique positif nécessaire pour attirer les électrons en dépit de la charge d'espace. L'énergie reçue par l'anode augmente et tend à se concentrer sur une zone réduite : l'anode s'échauffe et commence à émettre des particules neutres qui sont ionisées par les électrons incidents. Il apparaît au voisinage de l'anode un plasma secondaire formé d'électrons secondaires et d'ions moins énergétiques que ceux émis par les spots cathodiques.

Ces phénomènes se traduisent par l'apparition d'une tache anodique lumineuse, de dimensions nettement plus importantes (de l'ordre de grandeur du cm^2) que celle des spots cathodiques, faite de métal fondu déversant dans l'espace inter-électrodes des quantités de vapeur conséquentes qui s'ionisent dans le flux en provenance de la cathode.

Cet effet de contraction du côté de l'anode finit par entraîner également une contraction du côté de la cathode car il se crée un cheminement

préférentiel grâce au plasma généré par l'anode : une tache cathodique s'établit en correspondance de la tache anodique et l'arc prend le mode concentré caractéristique des arcs dans un milieu gazeux. Il s'agit alors d'un arc dans une atmosphère de vapeurs métalliques dense, pour lequel les mécanismes

de fonctionnement reposent maintenant sur l'ionisation du milieu gazeux.

Cet arc en mode concentré est donc caractérisé par un plasma formé d'électrons (pour la plupart secondaires), de neutres et d'ions dont l'énergie est proche de celle des neutres, donc relativement lents.

2.3 Phénomènes associés à la coupure au zéro de courant

Principes généraux de la coupure

Tous les disjoncteurs moyenne tension mettent à profit le passage naturel par zéro du courant alternatif (2 fois par période, soit toutes les 10 ms pour du courant 50 Hz) pour interrompre le courant.

ⓐ L'inévitable phase d'arc

Lorsqu'un courant de défaut est établi dans un circuit, la séparation des contacts du disjoncteur n'a pas de répercussion immédiate sur la circulation de ce courant. Au niveau des derniers points de contact, la densité de courant devient très élevée, ce qui provoque une fusion locale et l'apparition d'un pont métallique liquide. Les contacts continuant à s'éloigner, ce pont échauffé par le courant devient instable et sa rupture se traduit par l'apparition d'un arc concentré dans les vapeurs métalliques provenant de l'explosion du pont liquide. La tension d'arc qui apparaît est, dans le cas du vide, faible par rapport aux forces électromotrices des générateurs des réseaux BT ou HT : le courant circulant dans le circuit n'est donc pas sensiblement affecté, ni limité, par cette tension d'arc.

Cet arc va adopter le mode diffus ou le mode concentré décrit dans la section précédente, éventuellement évoluer de l'un à l'autre, et se maintenir jusqu'au zéro de courant.

ⓑ La phase de rétablissement après le zéro de courant

Si le plasma, qui permettait jusqu'alors le passage du courant, met à profit ce répit pour se dissiper très rapidement, le courant peut être empêché de s'établir pour l'alternance suivante. Une tension transitoire de rétablissement (TTR), imposée par le circuit, apparaît alors aux bornes de l'élément passé de l'état conducteur à l'état isolant. Dans le cas d'un court-circuit, cette TTR est provoquée par les oscillations entre les capacités locales et les inductances du réseau. Elle présente approximativement, dans sa phase initiale, une forme en (1-cosinus) avec une fréquence propre pour des réseaux MT de l'ordre de quelques dizaines de kHz et atteint une valeur crête supérieure à la tension normale du réseau, ce qui correspond à des vitesses moyennes d'augmentation de quelques kV/μs. Si le milieu nouvellement isolant supporte la contrainte diélectrique qui lui est alors appliquée, l'interruption de courant est réussie (cf. **fig. 6**).

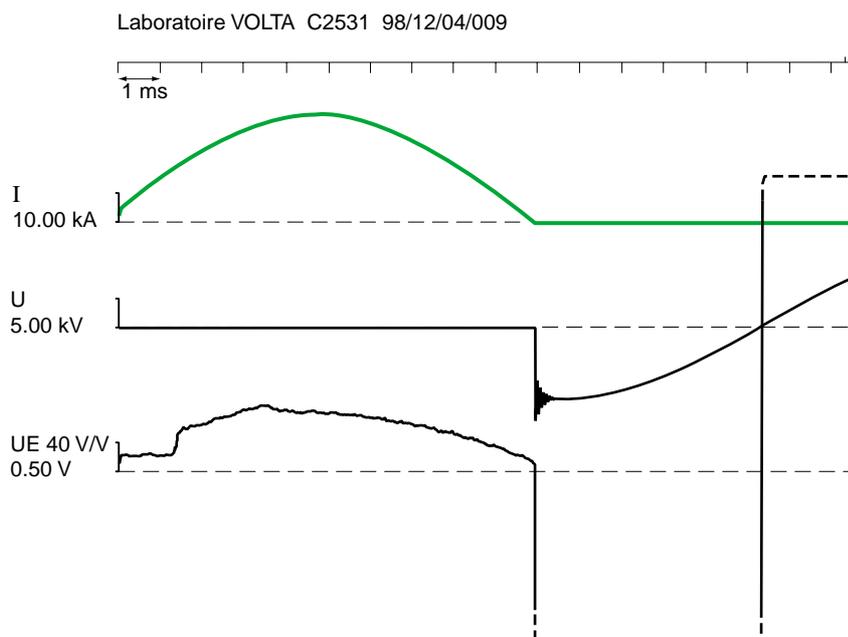


Fig. 6 : une interruption de courant réussie (source Merlin Gerin).

Cas de la coupure dans le vide

Pour déterminer les conditions de réussite de l'interruption du courant, il est nécessaire d'étudier les phénomènes intervenant au voisinage du zéro de courant dans le plasma de l'arc dans le vide.

c Courant post-arc

Lorsque approche la fin de l'alternance, le courant décroît d'autant plus rapidement que le courant crête a été élevé et que la fréquence du réseau est grande ($di/dt = \omega \hat{I}$). L'arc dans le vide repasse en mode diffus et, au voisinage du zéro de courant, il ne subsiste plus qu'un seul spot cathodique. Par contre l'espace inter-contacts est encore rempli d'un plasma résiduel globalement neutre, constitué d'électrons, d'ions et de neutres provenant de l'arc précédent.

Au moment du zéro de courant, le dernier spot cathodique s'éteint en raison de la disparition de la tension d'arc. Il n'existe donc plus de site émissif créant les particules chargées (électrons et ions) nécessaires au transport du courant électrique.

À partir de cet instant une tension de polarité opposée à la tension d'arc précédente (la TTR), commence à apparaître entre les deux contacts : l'ex-anode devient négative par rapport à l'ex-cathode et repousse les électrons. Le courant circulant dans le circuit n'est plus constitué que par le courant ionique que l'ex-anode extrait du plasma résiduel qui se raréfie : ce courant de polarité opposée à celle du courant d'arc est dénommé courant post-arc.

L'ex-anode n'est plus alors en contact avec le plasma neutre encore présent dans l'espace inter-contacts : elle en est séparée par une gaine (en anglais "sheath") d'où sont absents les électrons repoussés par la tension négative de l'ex-anode et où n'existent plus que des ions positifs qui franchissent la frontière du plasma neutre et sont alors accélérés vers l'ex-anode. La tension qui apparaît entre ex-cathode et ex-anode n'est donc appliquée que sur l'épaisseur de la gaine séparant le plasma neutre de l'ex-anode. De plus, la présence de charges d'espace positives dans cette gaine renforce le champ électrique à la surface de l'ex-anode qui est plus élevé que le champ moyen correspondant à la valeur de la TTR divisée par l'épaisseur de la gaine (cf. **fig. 7**).

L'épaisseur de la gaine entourant l'ex-anode est proportionnelle à la tension appliquée entre le plasma neutre et l'électrode et inversement proportionnelle à la densité des ions positifs : elle augmente donc selon l'évolution de la TTR et d'autant plus vite que le plasma se raréfie. Lorsque la limite de la gaine atteint l'ex-cathode, le plasma résiduel a disparu, l'ensemble de ses charges ayant été utilisées par le courant post-arc qui devient nul.

Ces phénomènes se déroulent sur une échelle de temps très réduite : la durée totale du courant post-arc est typiquement de 1 à 10 μ s (cf. **fig. 8**).

c Les causes de non-coupure

Pour que le courant puisse se maintenir, il faut que des mécanismes de création de charges

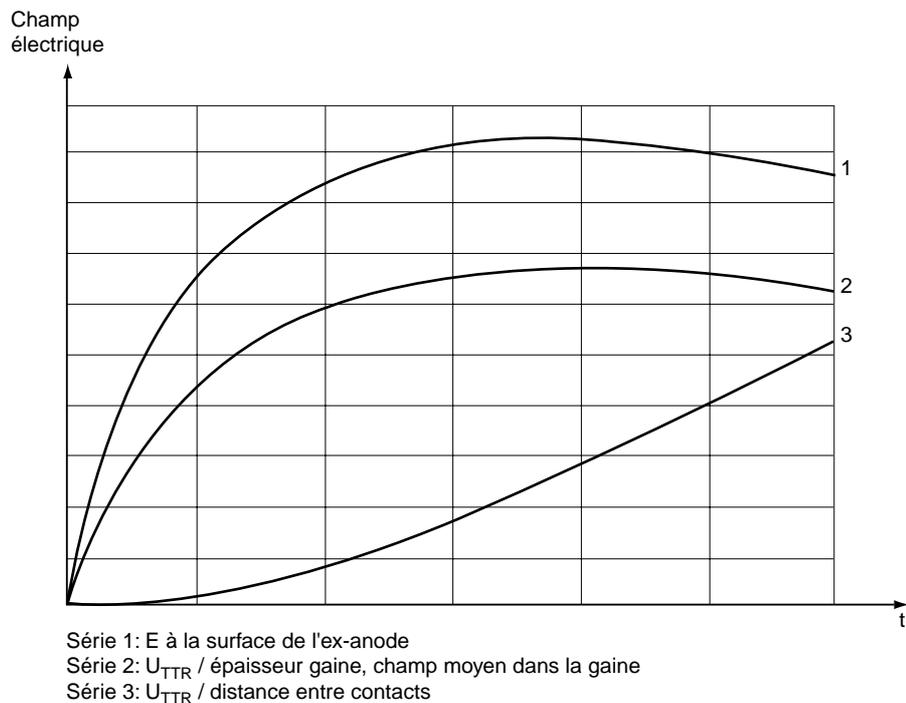


Fig. 7 : champ électrique à la surface de l'ex-anode et champ moyen correspondant entre les électrodes.

électriques prennent le relais des spots cathodiques éteints de l'ex-cathode.

Un premier mécanisme possible est l'ionisation de la vapeur métallique neutre présente dans l'espace inter-contacts. Cette ionisation est d'autant plus facile que la densité de particules neutres est importante. Si la densité de vapeur est très importante (zones très chaudes sur les contacts produisant des vapeurs métalliques en abondance), le courant ne s'interrompt pas du tout : il n'y a pas d'augmentation de la TTR, il s'agit d'une «non-coupure thermique».

Si la densité de particules neutres est suffisamment forte pour que la tenue diélectrique du vide soit réduite (à proximité du minimum de la courbe de PASCHEN), le courant peut être interrompu, mais l'espace inter-contacts ne peut pas supporter la TTR appliquée et un claquage se produit pendant la montée de TTR, il s'agit d'une «non-coupure diélectrique».

Un deuxième mécanisme possible est l'apparition de spots cathodiques sur l'ex-anode. Pour cela les conditions de l'émission électronique doivent être localement réunies à la surface de l'ex-anode :

- ✓ émission thermo-électronique si des points très chauds subsistent, c'est le cas lorsque l'anode contient un métal réfractaire (W) ;
- ✓ émission de champ ou combinée T.F. si le champ électrique appliqué à la surface est important au niveau de certains sites à facteur d'intensification β élevé.

Or on a vu précédemment que le champ électrique appliqué à la surface de l'ex-anode apparaît avec des valeurs élevées dès le début de l'application de la TTR car l'épaisseur de la

gaine est alors faible, et d'autant plus faible que la densité d'ions est élevée. Par ailleurs l'ex-anode est bombardée par les ions accélérés dans la gaine par la TTR, ce qui provoque des échauffements localisés. La probabilité d'apparition de spots cathodiques sur l'ex-anode est donc d'autant plus élevée que la densité d'ions dans le plasma résiduel est importante, ce qui va de pair avec une importante densité de particules neutres qui freinent, par collision, les ions rapides émis par les spots cathodiques, les thermalisent (énergie moyenne proche de la température du plasma) et ralentissent leur diffusion au moment du zéro de courant.

Si la densité de plasma est suffisamment faible au moment du zéro de courant, les conditions de réussite de la coupure sont probablement remplies : le courant est interrompu et l'espace inter-contacts tient la tension de rétablissement jusqu'à sa valeur de crête.

Dans le cas des disjoncteurs à vide, le succès n'est cependant pas entièrement assuré lorsque cette étape a été franchie. En effet, pendant quelques millisecondes après la coupure, la situation à l'intérieur de l'ampoule reste évolutive et des claquages diélectriques peuvent se produire :

- ✓ des particules générées lors de la phase d'arc peuvent se détacher des parois sous l'effet des vibrations et/ou des forces électrostatiques ;
- ✓ les zones en fusion des contacts peuvent émettre des gouttelettes sous l'effet des forces électrostatiques ;
- ✓ la solidification du métal liquide peut modifier la surface du contact ou libérer des gaz dissous.

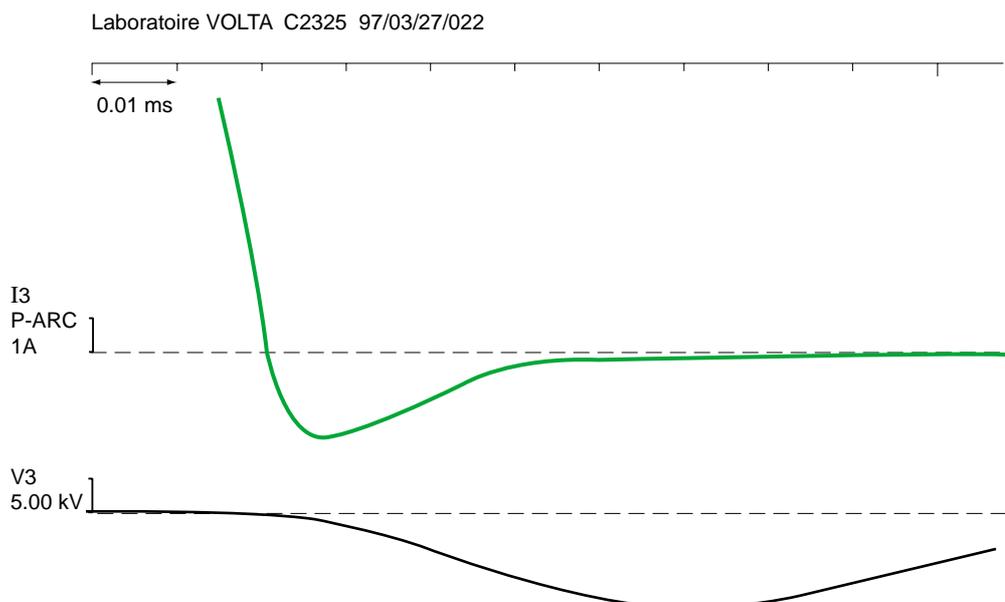


Fig. 8 : courant post-arc d'une durée particulièrement longue d'environ 40 μ s, essai à la limite du pouvoir de coupure de l'ampoule.

Aussi lorsqu'une ampoule à vide est essayée à la limite de son pouvoir de coupure, après une coupure apparemment réussie il n'est pas rare d'observer des défaillances diélectriques tardives (cf. **fig. 9**) qui peuvent être :

✓ soit fugitives (durée de quelques μs) car l'ampoule parvient à couper le courant HF consécutif à la décharge. Si ces claquages fugitifs se produisent plus d'un quart de période de la fréquence industrielle après le zéro de courant, ils sont considérés comme des

décharges disruptives non maintenues (NSDD) et interprétés comme un signe de faiblesse de l'appareil (pour cette raison le nombre maximal de NSDD toléré est de trois pour une série complète d'essais de coupure d'un disjoncteur selon la CEI 60056) ;

✓ soit complètes et, dans ce cas, il y a réapparition du courant de puissance après une période plus ou moins longue (de l'ordre de 0,1 à 1 ms) d'interruption.

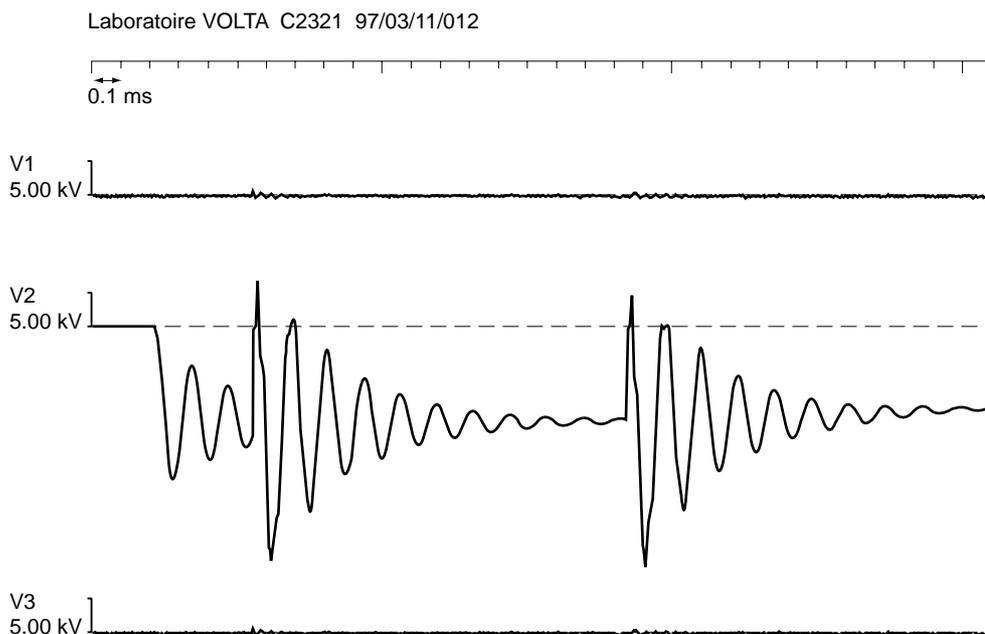


Fig. 9 : exemple de défaillances diélectriques tardives.

2.4 Conception pratique des ampoules interrupteurs sous vide

Choix de la technique de coupure

La section précédente a mis en lumière les conditions qui doivent être remplies pour réussir la coupure. Ces conditions sont pratiquement toujours réunies lorsque l'arc reste en mode diffus, c'est le cas avec des courants à couper qui ne dépassent pas quelques kA. Il en est ainsi pour les interrupteurs et contacteurs qui peuvent donc utiliser des contacts bout à bout très simples.

Lorsque l'arc passe en mode concentré, l'énergie est dissipée sur une surface d'électrode réduite, et elle provoque un échauffement localisé et une vaporisation considérable. Si cet arc reste immobile la coupure n'est plus assurée. Deux méthodes sont employées pour surmonter les difficultés engendrées par le passage de l'arc en mode concentré.

✓ La première consiste à provoquer un mouvement circulaire rapide de l'arc concentré afin que l'énergie soit répartie sur une grande

partie du contact et que l'échauffement reste limité en tous points : ceci est obtenu par l'application d'un champ magnétique radial dans la zone d'arc.

✓ La deuxième consiste à empêcher le passage en mode concentré par l'application d'un champ magnétique axial : lorsque le champ atteint une valeur suffisante, l'arc est stabilisé dans un mode qualifié de colonne diffuse et ne se concentre pas ; bien qu'immobile l'arc utilise la majeure partie de la surface des contacts et l'échauffement reste donc dans ce cas aussi limité.

Ⓢ Technique à champ radial \vec{B}_r
L'arc concentré peut être assimilé à un conducteur traversé par un courant dont la direction est parallèle à l'axe des contacts. Si un champ magnétique radial est appliqué à ce conducteur, la force électromagnétique résultante aura une direction azimutale et

provoquera la rotation de l'arc autour de l'axe des contacts.

Le champ B_r est provoqué par le cheminement imposé au courant dans les contacts. Deux types de structure de contact sont utilisés pour obtenir ce résultat (cf. **fig. 10**) :

- ✓ les contacts du type spirale,
- ✓ les contacts en coupe du type « cup » ou « contrate ».

Le bon fonctionnement des ampoules à champ radial est lié à l'obtention d'un compromis satisfaisant au niveau de la géométrie des contacts et, en particulier, de la largeur des fentes pour les contacts de type spirale :

- ✓ si la largeur est excessive l'arc a du mal à « sauter » d'une portion de contact à l'autre, ce qui peut l'amener à rester stationnaire en bout de piste et donc à échauffer excessivement une portion de contact (car l'arc est en mode concentré) ;
- ✓ si la largeur est insuffisante, la fente peut être comblée par la fusion du matériau de contact, et le cheminement du courant ainsi modifié entraîne la disparition du champ radial et l'immobilisation de l'arc.

Bien que mobile, l'arc tournant reste concentré et exerce donc une action énergétique sur la portion d'électrode qui le porte, les pressions élevées régnant dans les racines d'arc entraînent une expulsion du matériau de contact fondu sous forme de gouttelettes. Ce processus est un moyen efficace de limiter l'échauffement du reste de l'électrode (ou de faciliter son refroidissement), car l'énergie apportée par l'arc

est emportée avec le matériau expulsé qui se condense sur les parois environnantes ; en contrepartie, il entraîne une érosion relativement importante des contacts.

c Technique à champ axial B_a
 Lorsqu'un plasma d'arc est soumis à un champ magnétique axial suffisant, les électrons sont contraints de suivre des trajectoires parallèles aux lignes de champ qui sont des hélices d'axe parallèle à celui des contacts car B_a est combiné avec le champ azimutal généré par le courant lui-même.

Les ions positifs du plasma, beaucoup plus lourds, ne sont pas contrôlés de manière aussi efficace par le champ, mais ils sont retenus par l'effort électrostatique développé par la charge d'espace négative des électrons piégés par le champ axial : ce sont ces forces électrostatiques qui font que le plasma tend à rester globalement neutre. En conséquence, le confinement des électrons se traduit par un confinement de l'ensemble du plasma dans une colonne correspondant au tube de champ intercepté par la cathode : si ce tube est parallèle à l'axe des électrodes, l'essentiel du plasma produit par la cathode arrive à l'anode. L'arc dans ces conditions conserve l'essentiel des caractéristiques du mode diffus bien qu'à un niveau de densité de courant nettement supérieur :

- ✓ la tension d'arc reste modérée car le plasma conserve sa neutralité jusqu'au voisinage de l'anode (pas de phénomène de « manque » d'ions) ;

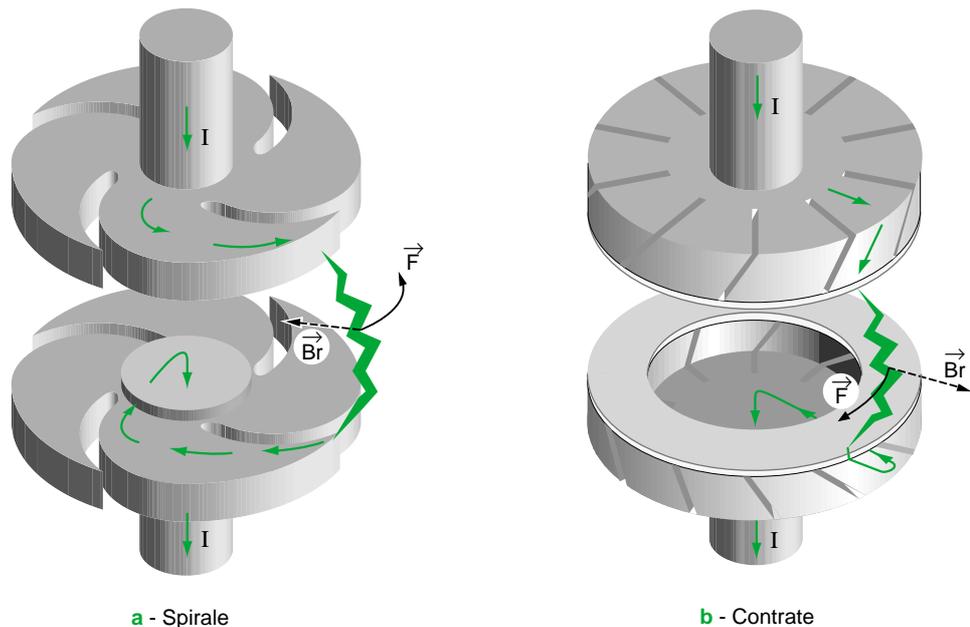


Fig. 10 : structures de contact utilisées pour créer le champ radial (spirale et « contrate »).

✓ la tendance de l'arc à se concentrer du côté de l'anode par effet Hall est contrecarrée par le champ axial qui force les électrons à maintenir une trajectoire essentiellement parallèle à l'axe ;
 ✓ si la surface des électrodes, en particulier de l'anode, sous-tendue par la colonne d'arc est suffisante pour le courant, la densité d'énergie et donc l'échauffement restent limités. La vaporisation du matériau de contact est suffisamment réduite pour que la nature du plasma ne soit pas modifiée par l'ionisation des particules neutres.

Deux conditions principales sont à remplir pour que l'arc reste dans ce mode de colonne diffuse propice à la coupure :

✓ B_a doit être suffisamment élevé. Le champ axial critique nécessaire pour empêcher la formation d'une tâche anodique est donné par la formule expérimentale :

$$B_{a_{crit}} = 3,9 (I_p - 10)$$

(B_a en mT, avec I_p valeur du courant crête en kA),

✓ la surface d'électrode doit être suffisante pour une valeur de courant donnée : la densité de courant à ne pas dépasser est de l'ordre de 17 A/mm^2 (formule de RENTZ). En fait, cette limite en densité de courant n'est valable qu'en première approximation et le pouvoir de coupure des ampoules à champ axial n'évolue pas en proportion directe de la surface des contacts. En effet, il faut tenir compte de l'arc concentré initial généré à la séparation des contacts et du temps nécessaire pour qu'il occupe la totalité de la surface disponible des électrodes : le pouvoir de coupure en fonction du diamètre des contacts suit approximativement une variation en $d^{1,4}$.

L'arc dans une ampoule à champ axial est beaucoup moins mobile que dans une ampoule

à champ radial. Même si la densité de courant est suffisamment élevée pour provoquer la fusion du matériau de l'anode, les projections restent limitées. L'érosion des contacts est donc plus faible qu'en champ radial, par contre le matériau fondu reste en place et retarde le refroidissement de la surface de l'électrode. De ce fait, bien qu'en principe l'utilisation de la surface disponible du contact paraisse plus efficace en champ axial qu'en champ radial, ceci n'est pas toujours vérifié et, en particulier, pour des courants importants et des tensions faibles, il est possible d'atteindre en champ radial des pouvoirs de coupure supérieurs pour une surface donnée, au prix toutefois d'une érosion importante.

Diverses solutions peuvent être utilisées pour obtenir le champ axial entre les contacts en utilisant le courant à couper :

✓ spires intégrées derrière les contacts (cf. **fig. 11**) ;

✓ circuit magnétique canalisant le champ azimuthal créé par les amenées de courant et le redressant en champ axial dans la zone inter-contacts ;

✓ spire extérieure à l'ampoule enveloppant la zone inter-contacts (cf. **fig. 12**).

D'une manière générale, le chemin imposé au courant, pour créer un champ axial suffisant dans l'espace inter-contacts, est plus long que celui nécessaire pour créer un champ radial local. Pour un volume donné, la résistance des contacts est donc plus faible avec la technique à champ radial, ce qui est un avantage pour les disjoncteurs de forts calibres.

Par contre, les formes nécessaires pour les contacts à champ radial sont plus tourmentées que celles des contacts à champ axial et donc

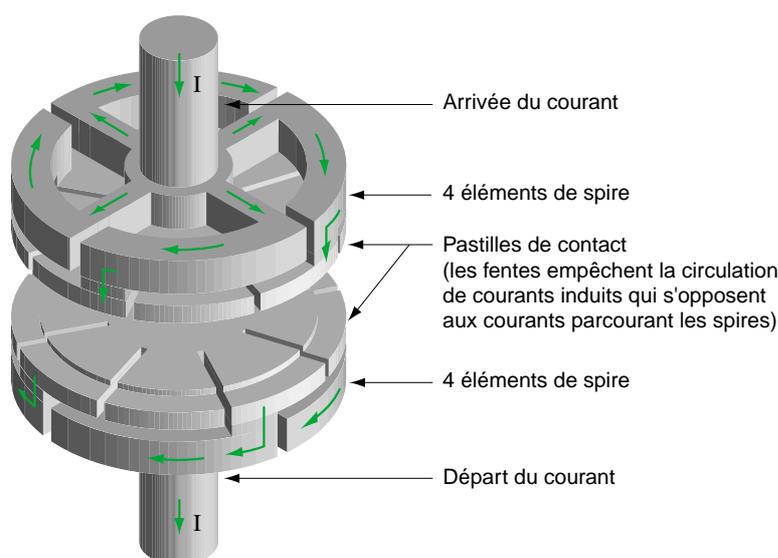


Fig. 11 : exemple de contacts à champ magnétique axial.

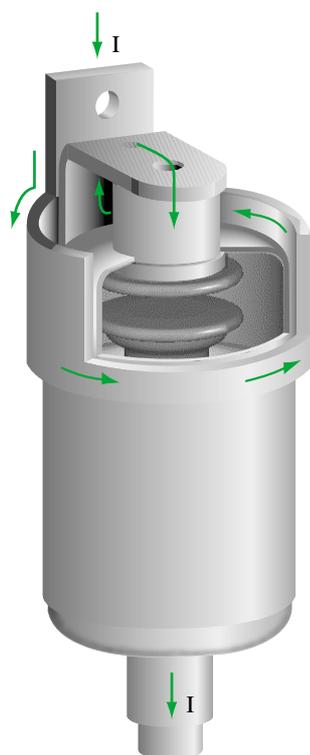


Fig. 12 : ampoule à champ magnétique axial à spire extérieure.

moins favorables sur le plan diélectrique : le champ axial sera donc avantageux pour des tensions élevées.

Le concepteur choisit donc l'une ou l'autre technique en fonction de leurs avantages respectifs selon l'application envisagée (cf. **fig. 13**).

Choix d'architecture

c Constitution d'une ampoule sous vide
Une ampoule sous vide ne comporte que peu de constituants (cf. **fig. 14**).

Sur cette figure sont visibles :

✓ deux ensembles de contacts électriques du type bout à bout (car, dans le vide, des contacts glissants se souderaient) ; l'un est fixe, l'autre mobile. Chaque ensemble comporte une

Aptitude :	Technique à champ radial	Technique à champ axial
Courant permanent élevé	+++	+
Tension assignée élevée	+	+++
Endurance électrique	+	+++
Pouvoir de coupure	++	++

légende : +++ = très bon ++ = bon + = moyen

Fig. 13 : tableau comparatif des deux techniques de coupure

électrode cylindrique conduisant le courant aux pastilles de contact ;

✓ une enveloppe étanche comportant un isolateur assurant l'isolation électrique entre contact fixe et mobile ;

✓ un écran protégeant la face interne de l'isolateur contre la condensation des vapeurs métalliques générées par l'arc ;

✓ un soufflet métallique permettant le déplacement du contact mobile tout en maintenant l'étanchéité de l'enveloppe.

Il s'agit là des constituants de base présents dans toute ampoule. En plus, dans les ampoules pour disjoncteurs, il y a des dispositifs générateurs du champ magnétique (radial ou axial) nécessaire à la coupure de l'arc de puissance.

C'est essentiellement au niveau de l'écran et des dispositifs de création du champ magnétique que des variantes sont possibles.

c Configurations d'écran

Les choix principaux au niveau de l'écran concernent :

✓ son mode de fixation qui détermine son potentiel : le potentiel est fixe (celui de l'électrode fixe) si l'écran est relié à cette extrémité de l'ampoule, il est flottant si l'écran est fixé en un point intermédiaire de l'isolateur sans liaison électrique avec l'un ou l'autre des contacts.

✓ sa position qui peut être interne ou externe à l'enveloppe, dans le dernier cas l'écran fait partie de l'enveloppe et doit être étanche.

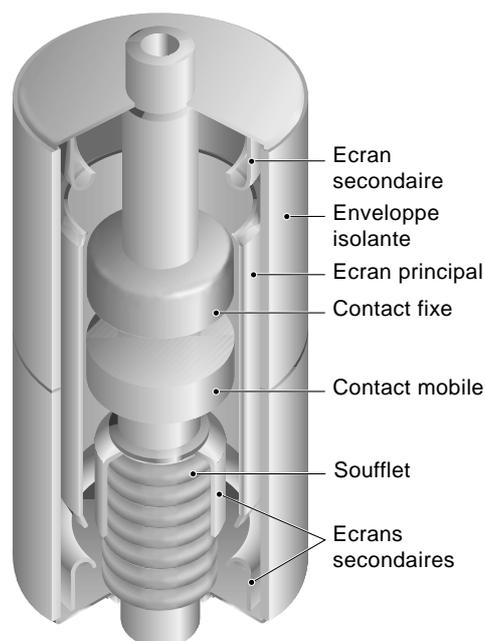


Fig. 14 : constitution d'une ampoule de coupure dans le vide.

Les combinaisons de ces différentes options aboutissent à quatre configurations possibles qui sont toutes utilisées selon les caractéristiques recherchées.

En règle générale :

✓ un écran à potentiel fixe est choisi lorsqu'un coût bas est recherché et un écran à potentiel flottant lorsque des performances élevées sont visées.

✓ un écran externe est choisi pour la compacité en diamètre et un écran interne pour la simplicité de réalisation.

○ Dispositifs générateurs de champ radial ou de champ axial

Les dispositifs produisant le champ radial nécessaire à la rotation de l'arc doivent être positionnés au plus près de l'arc : ils sont donc intégrés à la structure même des contacts à l'intérieur de l'ampoule. Les deux géométries les plus courantes ont été décrites dans le chapitre précédent : il s'agit des contacts « spirale » et des contacts de type « cup » ou « conrate ». Le choix de l'une ou de l'autre solution ne modifie pas l'architecture d'ensemble de l'ampoule.

Pour les ampoules à champ axial en revanche deux choix d'architecture sont possibles.

En effet, le dispositif générant le champ axial (le plus souvent des éléments de spire circulaire d'axe parallèle à celui de l'ampoule) peut être logé dans la structure des contacts internes comme pour les ampoules à champ radial, ou à l'extérieur de l'ampoule. Dans ce dernier cas, il s'agit d'une spire entourant la zone de séparation des contacts. La spire est en série avec le contact fixe et est traversée par le courant du circuit. La **figure 15** représente une réalisation d'une telle configuration : on notera que, pour réduire la puissance dissipée dans le dispositif, la spire est constituée de trois éléments en parallèle. L'un des inconvénients de cette architecture est la longueur du cheminement imposé au courant pour créer un champ axial suffisant dans un volume important. Ceci entraîne donc des pertes plus importantes qui ne se traduisent toutefois pas forcément par des échauffements supérieurs, les spires dans l'air étant mieux refroidies (par convection) que celles qui sont intégrées dans les contacts des ampoules.

Par ailleurs, la présence d'une spire au potentiel du contact fixe, autour des contacts, impose pratiquement le choix d'un écran à potentiel fixe pour ce genre d'ampoule.

On pourrait penser que la présence d'une spire extérieure présente un inconvénient au niveau de l'encombrement de l'ampoule en augmentant son diamètre extérieur. En fait, la possibilité d'utiliser l'intégralité de la surface des contacts soumise au champ axial relativement uniforme créé par la spire extérieure (ce qui n'est pas le cas pour les contacts comportant des spires intégrées) compense ce désavantage et les encombrements sont comparables.

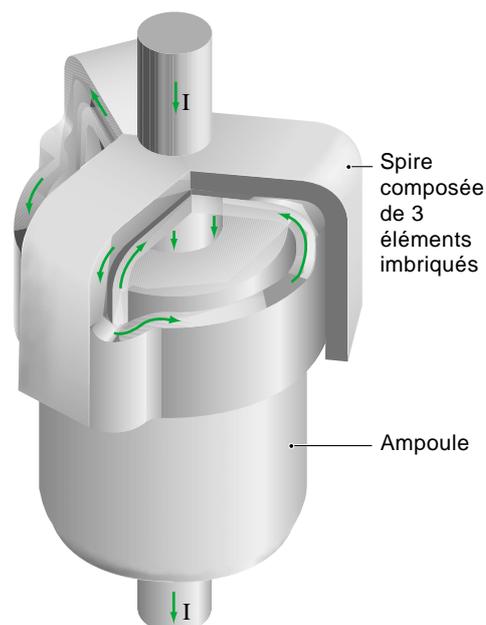


Fig. 15 : Exemple d'une spire, entourant la zone de séparation des contacts, constituée de trois éléments en parallèle.

Le principal avantage de l'architecture champ axial à spire extérieure est la possibilité de réaliser une ampoule compacte, simple et donc économique. Les inconvénients sur les plans échauffement et diélectrique (en raison de la conception à écran fixe) font préférer les architectures à dispositifs intégrés aux contacts (champ axial ou champ radial) pour les niveaux de tension élevés (u à 24 kV) ou les courants nominaux élevés (i à 3150 A).

Choix des matériaux et technologies de fabrication

Pour les ampoules d'interrupteurs sous vide, le choix des matériaux et des technologies de fabrication sont guidés par la nécessité :

✓ de garantir le maintien du vide poussé ($< 10^{-3}$ mbar) nécessaire au fonctionnement de l'ampoule pendant sa durée de vie (30 ans),

✓ d'assurer la tenue des performances assignées et en particulier le pouvoir de coupure.

○ Choix relatifs aux exigences de qualité du vide
Toute enceinte sous vide est soumise à une dégradation de son niveau de vide liée aux phénomènes de dégazage qui apparaissent lorsque la pression atteint des valeurs suffisamment basses. Le dégazage est tout d'abord un phénomène de surface qui correspond au détachement des molécules de gaz adsorbées sur les parois. Ce gaz est assez facilement et rapidement éliminé par un chauffage relativement modéré (de l'ordre de 200 °C) des parois de l'enceinte pendant le

pompage. Ensuite apparaît un dégazage volumique correspondant à la diffusion, vers la surface des matériaux métalliques, des gaz dissous tels que l'hydrogène.

Pour éviter que le dégazage, provenant essentiellement des pièces massives, ne dégrade progressivement le niveau de vide d'une ampoule, il est important :

- ✓ d'utiliser des matériaux à teneur en gaz aussi faible que possible (par exemple cuivre Cu-OFE exempt d'oxygène) ;

- ✓ de procéder à un dégazage poussé de ces matériaux en effectuant un pompage, de longue durée, de l'ampoule à température suffisamment élevée (typiquement une dizaine d'heures à une température de l'ordre de 500 °C).

Les gaz liés dans les métaux (sous forme de composés chimiques) ne sont pas susceptibles de dégazer, par contre ils peuvent être libérés sous l'effet de l'arc. Il faut donc que les matériaux utilisés pour les contacts d'arc soient élaborés sous vide pour avoir une teneur en gaz aussi basse que possible.

L'étanchéité de l'enveloppe de l'ampoule doit être parfaite, ce qui implique absence de fuite et absence de perméation dans les conditions de service. Pour ces raisons, les enveloppes sont réalisées en matériaux métalliques et céramiques : les isolateurs en céramique d'alumine ont en effet supplanté le verre car ils peuvent supporter des températures plus élevées et permettent donc un meilleur dégazage.

Les liaisons entre les pièces métalliques de l'enveloppe sont réalisées par soudage ou brasage fort. Les liaisons céramique-métal sont aussi réalisées par brasage fort, soit brasage réactif permettant une liaison directe sur la céramique, soit brasage traditionnel avec une métallisation préalable (Mo-Mn + Ni) de la céramique.

Les opérations de brasage finales sont réalisées dans un four, sous vide pour assurer le dégazage des matériaux. De plus en plus fréquemment, le scellement de l'ampoule est également réalisé pendant l'opération de brasage sous vide, ce qui permet d'éliminer l'opération de pompage.

Compte tenu du niveau d'étanchéité nécessaire pour permettre le mouvement du contact mobile, le soufflet métallique est la seule solution utilisée. Il est généralement réalisé en acier inoxydable austénitique de faible épaisseur (typiquement 0,1 à 0,2 mm). Sa conception et celle des liaisons par brasage avec le reste de l'enveloppe doivent être soigneusement étudiées en vue d'assurer une endurance mécanique élevée malgré l'effet défavorable des cycles thermiques imposés par les opérations de brasage.

Enfin, il faut mentionner des matériaux utilisés en petite quantité, mais jouant un rôle important dans l'obtention et le maintien dans le temps d'un vide poussé. Il s'agit des getters à base de métaux (Baryum, Zirconium, Titane, etc.) très actifs chimiquement avec la plupart des gaz susceptibles d'être rencontrés dans les enceintes sous vide. Les getters sont activés, sous vide poussé, par chauffage à une température suffisante pour provoquer la diffusion de la couche superficielle passivée dans la masse, et la régénération d'une surface métallique active capable d'absorber les molécules de gaz présentes dans l'ampoule. Cette opération d'activation est réalisée lors du pompage ou lors du scellement de l'ampoule par brasage sous vide : c'est en particulier grâce aux matériaux getters qu'a pu se développer ce dernier procédé plus industriel que le pompage, tout en assurant une qualité de vide satisfaisante.

C Choix du matériau de contact

Un bon matériau de contact, pour une ampoule sous vide, doit répondre à un certain nombre d'exigences :

- ✓ être bon conducteur de l'électricité, afin d'offrir une résistance de contact réduite ;

- ✓ présenter une bonne résistance mécanique aux chocs répétés que subissent les contacts lors des fermetures ;

- ✓ ne pas former de soudures solides lors des fermetures en charge ou sur court-circuit afin que le mécanisme d'ouverture puisse séparer les contacts et que la rupture de la zone soudée ne crée pas de dommages excessifs à leur surface ;

- ✓ produire peu de vapeurs métalliques pendant la phase d'arc afin de permettre une régénération diélectrique rapide de l'espace inter-contacts après coupure, ce qui implique :
 - une pression de vapeur peu élevée,
 - une production réduite de gouttelettes pendant la phase de fusion du matériau ;

- ✓ de présenter de bonnes caractéristiques diélectriques pendant la phase d'application de la TTR, ce qui implique :

- surface suffisamment lisse, sans aspérité notable (β peu élevé),

- pas de points surchauffés émettant par effet thermoélectronique (cas des matériaux réfractaires à conductibilité thermique réduite),
- pas de propension à former des particules facilement détachables.

- ✓ permettre l'existence de spots cathodiques stables jusqu'à de faibles valeurs de courant afin de minimiser le courant arraché et les surtensions associées à ce phénomène, ce qui implique en particulier une pression de vapeur suffisamment élevée.

Il s'avère que ces nombreuses qualités requises sont parfois contradictoires. Il faut donc réaliser un compromis acceptable pour l'application

envisagée en fonction des propriétés privilégiées qui sont :

✓ pour les disjoncteurs, le rétablissement diélectrique après la phase d'arc à courant élevé (bon pouvoir de coupure) ;

✓ pour les contacteurs, une érosion faible et un courant arraché minimal (endurance électrique et réduction des surtensions) ;

✓ pour les interrupteurs, la résistance à la soudure et la tenue diélectrique sous des tensions élevées (absence de reclaquage).

Actuellement, les meilleurs compromis sont obtenus avec des matériaux composites et les trois familles de matériaux les plus utilisés sont :

✓ pour l'application disjoncteur les CuCr ;

✓ pour l'application contacteur les AgWC ;

✓ pour les applications interrupteur, et en particulier ceux destinés à la commande de condensateurs à tension élevée, les WCu.

Les CuCr se sont affirmés comme les meilleurs matériaux pour l'application disjoncteur et ne paraissent pas pouvoir être détrônés à court terme, même si des évolutions ne peuvent pas être exclues.

Les proportions utilisées varient entre 80 et 50 % pour le Cu, le solde pour le Cr.

Une proportion élevée de Cu est favorable pour la conductivité électrique (basse résistance de

contact) et thermique (bonne évacuation de l'énergie d'arc).

Une proportion élevée de Cr est, elle, favorable pour la résistance à la soudure et la tenue diélectrique sous tension élevée.

La teneur en gaz du matériau de contact doit être la plus faible possible car, lors de sa fusion ou vaporisation, ces gaz sont libérés dans l'espace inter-contacts et nuisent à la coupure. L'effet à long terme sur le niveau de vide est moins gênant qu'on pourrait le penser à priori, car le Cr condensé sur les parois de l'ampoule joue un rôle de getter et réabsorbe ces gaz.

Il faut noter enfin que l'arc modifie la couche superficielle du matériau et améliore ses qualités par :

✓ l'élimination des gaz inclus et des oxydes de surface,

✓ l'obtention d'une granulométrie très fine (précipitation du Cr fondu dans la matrice de cuivre),

✓ l'homogénéisation du matériau.

Cet effet est parfois qualifié de «conditionnement en courant» (par analogie avec le conditionnement en tension) : en général le comportement des contacts et la performance en coupure s'améliorent après quelques coupures.

3 Coupure dans le vide et surtensions lors de la commande de circuits inductifs

Les appareils à coupure dans le vide (contacteurs, disjoncteurs, interrupteurs) sont susceptibles de générer des surtensions lors de la coupure de circuits inductifs (transformateur à vide, moteurs non chargés ou en phase de démarrage). En raison des propriétés particulières du vide, ces surtensions peuvent être de nature différente de celles générées dans les mêmes conditions par des

appareillages de coupure utilisant un autre milieu (air, SF6, huile...). En général ces surtensions ne posent pas de problème et ne nécessitent pas de disposition particulière. Cependant dans le cas de récepteurs sensibles (moteurs par exemple) il est recommandé de prévoir des dispositifs limiteurs de surtension.

3.1 Les phénomènes générateurs de surtension

Surtension associée à une coupure idéale

Même dans le cas théorique de la coupure parfaite par un disjoncteur idéal, un certain niveau de surtension est inhérent à l'interruption du courant dans un circuit inductif. En effet, les valeurs de tension aux bornes des différents éléments du circuit doivent atteindre un nouvel état d'équilibre correspondant à l'état ouvert. La transition par rapport à l'état fermé précédant l'instant de coupure (zéro de courant) entraîne des oscillations autour du nouvel équilibre et produit des surtensions par rapport à la tension maximale normale du réseau (cf. **fig. 16**).

Dans le cas d'une coupure triphasée, le fait que la coupure ne soit pas simultanée sur les trois phases introduit en plus un régime transitoire générateur de surtensions. À titre d'exemple, en cas de coupure d'un courant de court-circuit dans un réseau à neutre non mis directement à la terre, la tension de rétablissement aux bornes du premier pôle qui coupe atteint environ 2,1 à 2,2 p.u. (TTR normalisées CEI) et 2,5 p.u. pour la coupure d'une batterie de condensateurs à neutre isolé.

Arrachement de courant

Le phénomène le plus connu et le plus répandu, car il concerne toutes les techniques de coupure, est celui de l'arrachement de courant : interruption prématurée du courant alternatif avant son passage naturel par zéro. Ce phénomène concerne surtout les disjoncteurs, qui sont dimensionnés pour interrompre les courants de court-circuit, lorsqu'ils coupent de faibles courants.

Si I_a est la valeur du courant arraché, courant circulant dans la charge d'inductance L immédiatement avant l'interruption, l'énergie électromagnétique stockée dans la charge est transférée sous forme d'énergie électrostatique dans la capacité C située aux bornes de la charge ($1/2 L I_a^2 = 1/2 C V^2$). Il apparaît une

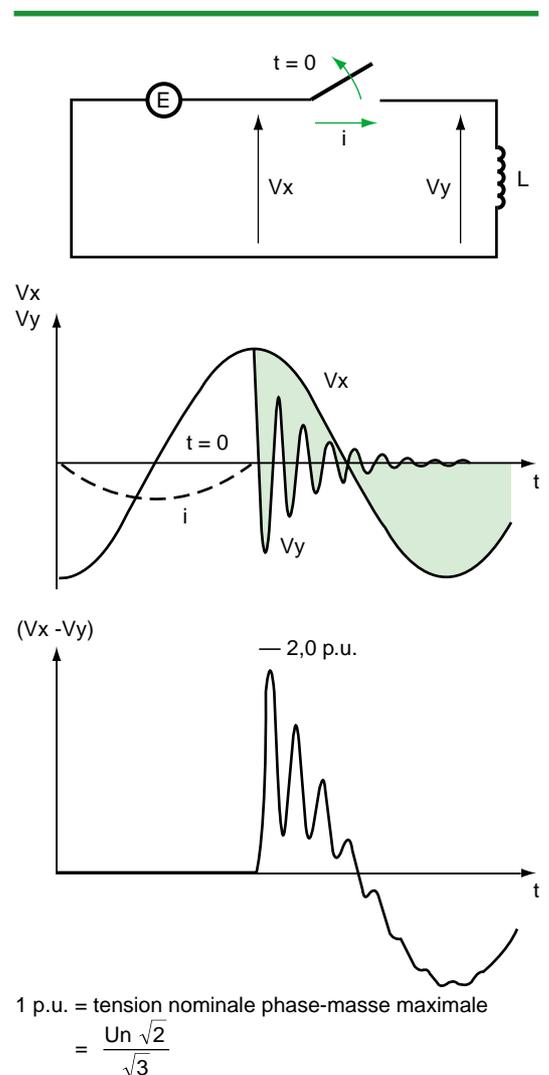


Fig. 16 : surtensions par rapport à la tension maximale normale du réseau lors de la coupure d'un circuit inductif.

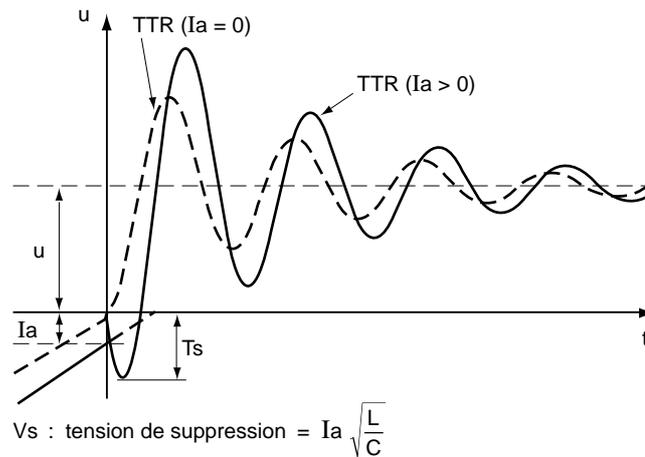


Fig. 17 : surtensions associées à la coupure d'un circuit avec arrachement de courant.

augmentation de tension côté charge qui accentue l'écart par rapport à la situation d'équilibre «circuit ouvert» et amplifie les surtensions associées à la coupure (cf. **fig. 17**).

Ces surtensions sont donc proportionnelles au courant arraché et à l'impédance caractéristique

(surge impedance) $\sqrt{\frac{L}{C}}$ de la charge.

Dans le cas d'une coupure dans le vide, l'arrachement de courant correspond à l'extinction prématurée du dernier spot cathodique en raison de son instabilité aux faibles courants : cette caractéristique dépend principalement de la nature du matériau de contact. Les valeurs moyennes de courant arraché pour quelques matériaux usuels sont indiquées dans le tableau suivant (cf. **fig. 18**).

En pratique les valeurs de courant arraché de quelques ampères, caractéristiques du matériau CuCr, ne posent pas de problème. Par contre les valeurs obtenues avec le cuivre pur sont excessives et expliquent, avec d'autres considérations, que ce matériau ne puisse pas être utilisé tel quel.

Préamorçages et réallumages multiples

Il y a amorçage entre les contacts lorsque la tension appliquée est supérieure à la tenue diélectrique de l'intervalle. Ce phénomène est inévitable lorsque cet intervalle est très réduit (en fin de fermeture et en début d'ouverture).

Le préamorçage à la fermeture est donc systématique lorsque la manœuvre se fait sous tension : l'intervalle de temps entre le préamorçage et l'instant où les contacts se touchent (temps de pré-arc) dépend de la vitesse de fermeture et de la valeur de la tension appliquée au moment où les contacts se rapprochent.

Le réallumage à l'ouverture ne se produit que si le temps d'arc (intervalle de temps entre la séparation des contacts et l'interruption du

Matériau	$I_{\text{arraché moy}}$	$I_{\text{arraché max}}$
Cu	15	21
CuCr	4	8
AgWC	1	1,1

Fig. 18 : valeurs moyennes de courant arraché pour quelques matériaux usuels (Cu, CuCr, AgWC).

courant) est faible : dans ce cas l'écartement des contacts est insuffisant pour supporter la TTR et il y a reclaquage diélectrique.

Lors d'un préamorçage ou réallumage, la décharge oscillante des capacités locales se traduit par un courant HF (dizaines de kHz) circulant entre les contacts en superposition avec le courant à fréquence industrielle qui s'établit progressivement (puisqu'il est nul avant l'amorçage).

Ces phénomènes, inévitables, concernent tous les types d'appareillage. La particularité des appareillages à coupure dans le vide est leur capacité à interrompre le courant HF consécutif à l'amorçage, alors que les autres techniques de coupure en sont généralement incapables en raison des di/dt élevés au moment des passages par zéro de ce courant.

L'interruption du courant HF génère une nouvelle TTR appliquée entre les contacts dont l'écartement n'a que peu varié, car ces phénomènes se produisent à une échelle de temps petite par rapport à la durée du mouvement des contacts, ce qui entraîne donc un nouvel amorçage et la répétition des mêmes phénomènes (cf. **fig. 19**). Il y a une succession d'amorçages multiples associés à des ondes de tension d'amplitude variable selon l'évolution de l'écartement des contacts :

✓ à la fermeture l'amplitude du train de surtensions décroît linéairement jusqu'à ce que les contacts se touchent,

✓ à l'ouverture les amplitudes sont croissantes jusqu'à ce que l'écartement des contacts soit

finalement suffisant pour tenir la tension de rétablissement qui, du fait d'un processus d'escalade de tension, est toujours plus élevée que la tension correspondant à une coupure normale. Les trains de surtensions à front raide, générés par ces phénomènes d'amorçages

multiples, sont donc toujours limités par la tenue de l'espace inter-contacts qui joue un rôle d'éclateur. Cependant cette limitation n'est réellement efficace qu'à la fermeture et par contre, à l'ouverture, les valeurs atteintes peuvent être élevées (cf. **fig. 20**).

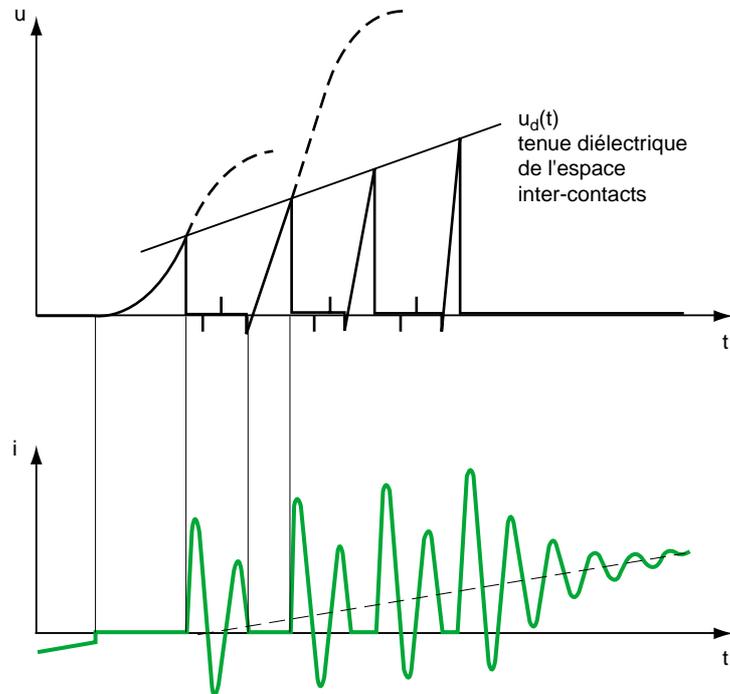


Fig. 19 : succession d'amorçages multiples associés à des ondes de tension d'amplitude variable.

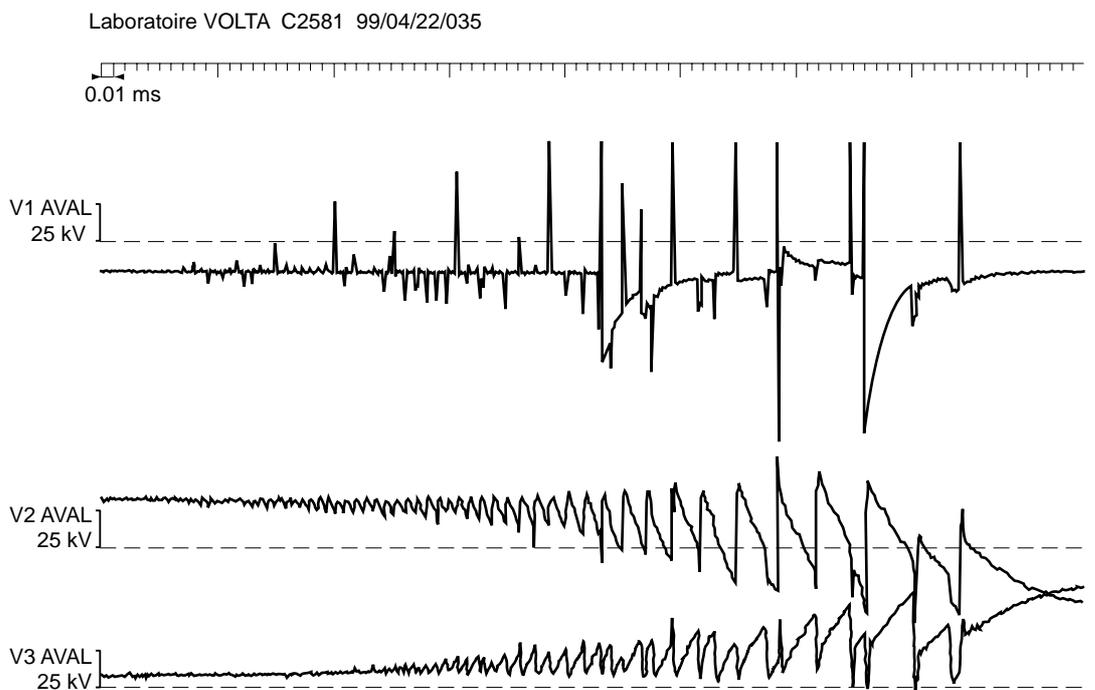


Fig. 20 : phénomènes d'amorçages multiples lors de la séparation des contacts et la coupure de faible courant inductif.

Les caractéristiques de ces deux types de phénomènes voisins sont résumées dans le tableau de la **figure 21**.

L'inconvénient de ces trains de surtensions tient davantage à leur front raide qu'à leur amplitude. En effet, ces ondes de tension à faible temps de montée (de l'ordre de 0,2 à 0,5 μ s) ne se répartissent pas de manière homogène dans les enroulements des transformateurs et des moteurs, mais sollicitent essentiellement les premières spires (cf. **fig. 22**). Elles peuvent donc provoquer une dégradation et un vieillissement accéléré de l'isolation entre ces spires.

Arrachement de courant virtuel

Dans des configurations particulières (rarement rencontrées en pratique) caractérisées par un fort couplage capacitif / inductif entre les phases du circuit, les phénomènes de réallumages multiples sur la première phase qui tente de couper conduisent non seulement à des oscillations de courant HF appréciables dans la phase concernée, mais aussi dans les phases voisines alors parcourues par un courant encore notable, car éloigné de son zéro naturel.

Si les courants HF induits atteignent une amplitude du même ordre que le courant à fréquence industrielle, des zéros de courant («artificiels» mais bien réels, et non pas virtuels...) se produisent. L'appareil peut en profiter pour interrompre le courant bien avant son zéro naturel. Dans de tels cas, les courants arrachés se chiffrent en dizaines, voire centaines d'ampères et les surtensions associées sont très élevées. Une parade proposée est de décaler en avance l'ouverture d'un des pôles de l'appareil de façon que, pendant l'intervalle de temps où les réallumages multiples sont susceptibles de

se produire, les deux autres phases soient encore fermées et donc insensibles aux perturbations induites. En pratique, cette solution n'a pas été appliquée du fait des problèmes qu'elle pose (contrainte non uniformément répartie entre les pôles lors de la coupure de courant de court-circuit) et du caractère exceptionnel du phénomène.

Type d'amorçage multiple	Occurrence	Amplitude des surtensions
Préamorçage à la fermeture	Systématique	Faible
Réallumage à l'ouverture	Occasionnelle	Elevée

Fig. 21 : caractéristiques des surtensions liées au phénomènes d'amorçages multiples.

Fraction de la surtension appliquée à la 1^{ère} spire d'enroulement

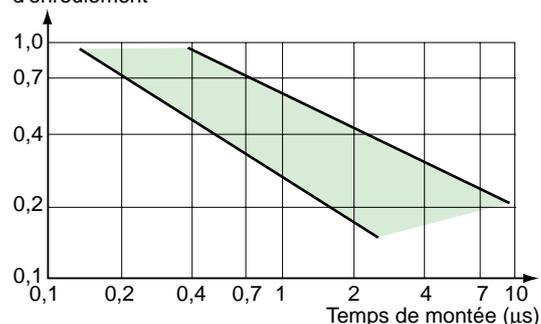


Fig. 22 : pourcentage de la surtension appliqué à la première spire d'enroulement selon son temps de montée.

3.2 Les mesures de protection contre les surtensions

Matériaux de contact «doux»

Des matériaux de contact (ex : AgWC, CuBi) présentant une très faible valeur de courant arraché ont été mis au point pour l'application contacteur. Cette performance a été atteinte en associant faible conductivité thermique et forte pression de vapeur afin d'obtenir des spots cathodiques stables jusqu'à de très faibles valeurs de courant.

Ces caractéristiques vont à l'encontre du pouvoir de coupure : ce qui est acceptable pour une application contacteur ne l'est pas pour une application disjoncteur.

De plus l'emploi de ces matériaux n'est efficace que pour réduire les surtensions liées au courant arraché, qui ne posent pas de problème en pratique lorsque celui-ci n'excède pas quelques ampères (cas du CuCr).

Les matériaux de contact «doux» n'apportent pas d'amélioration par rapport aux matériaux classiques «durs» (CuCr) sur le plan des amorçages multiples. En effet ces matériaux sont aussi capables d'interrompre des courants ayant des di/dt élevés et se caractérisent par une vitesse de rétablissement diélectrique plus lente après séparation des contacts (cf. **fig. 23**) : en conséquence les trains de surtensions à front raide ne sont pas éliminés mais, au contraire, ils ont tendance à durer plus longtemps qu'avec un matériau plus performant en coupure.

Coupure synchronisée

Une solution théorique pour éliminer ces phénomènes de réallumages multiples serait de contrôler l'instant d'ouverture des contacts par rapport à l'onde de courant afin d'éviter les temps d'arc courts. En pratique elle pose des

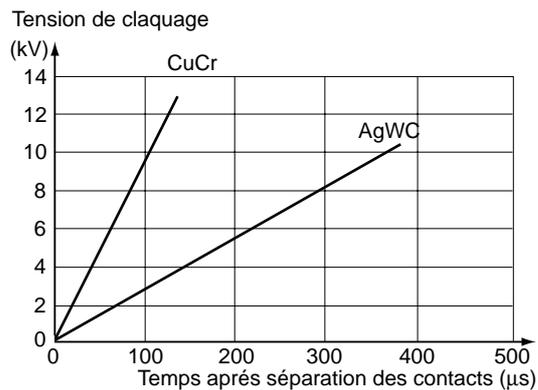


Fig. 23 : évolution de la tenue diélectrique entre contacts à partir de l'instant de leur séparation selon leurs matériaux.

problèmes complexes de fiabilité du temps de réponse du mécanisme de commande, aussi n'est-elle utilisée que dans le domaine de la Très Haute Tension où la maîtrise des surtensions de manœuvre peut justifier le surcoût induit au niveau de l'appareillage. Dans le domaine de la Moyenne Tension il est plus économique de faire appel à des dispositifs parasurtenseurs lorsqu'un récepteur doit être protégé.

Dispositifs de protection par limitation des surtensions

Comme indiqué précédemment le phénomène le plus sévère est celui des amorçages multiples

qui sollicitent principalement les premières spires des enroulements de transformateur ou de moteur.

Ces deux types de récepteurs doivent être considérés séparément.

En effet, les transformateurs sont conçus pour supporter les contraintes diélectriques générées par les chocs de foudre qui sont des surtensions à front raide, ils présentent donc un bon niveau d'isolation des premières spires d'enroulement. Par ailleurs les courants inductifs à interrompre sont faibles (transformateur à vide) et les surtensions associées restent limitées. En règle générale il n'est pas nécessaire de prévoir de protection spécifique pour des transformateurs manœuvrés par de l'appareillage à coupure dans le vide, sauf éventuellement pour des transformateurs à isolation solide moins résistants que ceux isolés dans l'huile .

Les moteurs ont une tenue diélectrique inférieure à celle des transformateurs, alors que les courants à interrompre peuvent être élevés (coupure en phase de démarrage ou rotor bloqué) et donc les surtensions sévères. En règle générale il est recommandé de placer des dispositifs de protection aux bornes d'un moteur quel que soit son dispositif de commande, contacteur ou disjoncteur, et le matériau de contact utilisé. Ces dispositifs peuvent être des condensateurs réduisant la pente du front de montée des surtensions, des circuits RC (typiquement C de l'ordre de 0,1 à 0,5 μ F et R de 10 à 50 Ω) et/ou des parafoudres ZnO.

4 Les principaux domaines d'application de la coupure dans le vide

Les propriétés du vide en tant que milieu de coupure pour l'appareillage électrique sont résumées dans le tableau de la **figure 24**.

Domaine	Caractéristiques	Points forts	Points faibles
Pouvoir de coupure	Régénération diélectrique très rapide.	Coupure des courants de défaut avec di/dt TTR sévères.	Coupure des courants HF lors de re-claquages : génération de surtensions, protections nécessaires dans certains réseaux.
	Tension (énergie) d'arc faible.	Endurance électrique élevée.	Pas d'effet limiteur en BT.
	Capacité de couper même sans déplacement des contacts.	Interruption du courant en cas d'amorçage entre contacts ouverts (compense en partie le manque de fiabilité de la tenue diélectrique).	
Tenue diélectrique	Influencée par l'état de surface des électrodes et la présence de particules.		Tenue diélectrique intrinsèque limitée en HT et susceptible d'évolution dans le temps.
	Influencée par la phase d'arc immédiatement précédente.		Tenue diélectrique post coupure aléatoire : risque de réamorçage après coupure capacitive si l'ampoule est non adaptée.
Passage du courant	Contacts de type bout à bout non compensés.		Nécessité d'une pression de contact élevée pour éviter la répulsion par effort électromagnétique.
	Contacts dans le vide.	résistance de contact constante (pas d'oxydation et pas de dégradation à la coupure).	Tendance à souder à la fermeture.
	Mêmes contacts pour la coupure et le passage du courant permanent.		Résistance de contact élevée : dissipation thermique importante pour les forts calibres.
Milieu de coupure	Vide < 10 ⁻³ mbar.	Pas de produits de décomposition et d'effet sur l'environnement.	Impossibilité de contrôler en permanence l'état du vide : le contrôle diélectrique périodique nécessite la mise hors service.

Fig. 24 : propriétés du vide en tant que milieu de coupure .

Ces points, forts et faibles, de la technique de coupure dans le vide conduisent donc à privilégier son utilisation dans certains domaines d'application de l'appareillage électrique. Dans la présentation qui suit, les différents domaines d'application sont segmentés de la manière suivante :

- c par niveau de tension ;
- c puis par fonction, ou type d'appareillage de connexion ;
- c enfin, selon le type de charge à commander.

Ce chapitre passe donc successivement en revue les domaines de la Moyenne Tension

(MT : 1 < U < 52 kV), de la Basse Tension (BT : U < 1 kV) et de la Haute Tension (HT : U > 52 kV). Le plus long développement est consacré à la MT qui constitue le champ d'application principal de la technique de coupure dans le vide. Les domaines BT et HT sont plus brièvement décrits car les limitations intrinsèques de la technique de coupure dans le vide ne lui permettent d'y occuper qu'une position marginale : les techniques dominantes sont la coupure dans l'air en BT et la coupure dans le SF6 en HT.

4.1 Les applications de la technique de coupure dans le vide en Moyenne Tension

La Moyenne Tension est essentiellement utilisée pour la distribution de l'énergie électrique, entre le transport à grande distance qui s'effectue en Haute Tension (HT) et l'utilisation qui se fait surtout en Basse Tension (BT). Les niveaux de tension inférieurs du domaine MT sont également utilisés pour alimenter des récepteurs de puissance unitaire trop forte pour la BT. En MT, les principaux types d'appareillage de connexion utilisés sont les interrupteurs, les sectionneurs, les disjoncteurs et les contacteurs (cf. **fig. 25**).

Les interrupteurs sont des appareils simples et relativement économiques qui servent à l'exploitation normale des réseaux électriques : ils sont manœuvrés sur ordre d'un opérateur et permettent d'établir ou d'interrompre le courant dans un élément du réseau. Ils sont capables de couper le courant de charge normal du circuit dans lequel ils sont insérés, et d'établir le courant de défaut provoqué par un court-circuit situé en aval de leur position par rapport à l'alimentation en énergie électrique.

Les interrupteurs d'usage général destinés aux réseaux de distribution MT, sur lesquels la fréquence des manœuvres est faible, ont, par construction, une endurance électrique et mécanique relativement limitée, typiquement :

- c une centaine de coupures à I_n ;
- c un millier de manœuvres mécaniques.

Pour des applications particulières, certains types d'interrupteurs doivent être capables de

faire face à des contraintes plus sévères, par exemple :

- c les interrupteurs de fours à arc manœuvrent fréquemment avec des courants élevés ;
- c les interrupteurs de gradins de condensateurs manœuvrent assez fréquemment et doivent établir les courants d'enclenchement (à fréquence et amplitude élevées).

Les sectionneurs ne sont pas à proprement parler des organes de coupure puisqu'ils manœuvrent hors charge (ils doivent cependant être capables d'interrompre les courants capacitifs résiduels des circuits ouverts). Ils sont utilisés pour isoler un circuit du reste du réseau et permettre d'intervenir en sécurité sur ce circuit. À cet effet, ils doivent avoir une tenue diélectrique élevée entre contacts et respecter des dispositions constructives visant à éviter le franchissement de la distance de sectionnement même en cas de surtension sur le réseau. Malgré ces dispositions, la sécurité des intervenants n'est pleinement assurée que si l'élément de réseau isolé par des sectionneurs est également mis à la terre de manière efficace. Les sectionneurs sont fréquemment associés aux appareillages qui ne remplissent pas la fonction de sectionnement, en général les disjoncteurs et contacteurs. Les interrupteurs sont, par contre, le plus souvent capables de remplir également la fonction de sectionneur : ce sont alors des interrupteurs-sectionneurs.

Les disjoncteurs sont des organes de sécurité qui protègent le réseau en séparant

Type d'appareillage de connexion	Définition VEI	Norme applicable pour MT
Interrupteur	Appareil de connexion capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales du circuit, y compris éventuellement les conditions spécifiées des courants dans des conditions anormales spécifiées du circuit, telles que celles du court-circuit (VEI 60050-441-14-10).	CEI 60265-1
Sectionneur	Appareil de connexion qui assure, en position d'ouverture, une distance de sectionnement satisfaisant à des conditions spécifiées (VEI 60050-441-14-05).	CEI 60129
Disjoncteur	Appareil de connexion capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans des conditions normales du circuit, ainsi que d'établir, de supporter pendant une durée spécifiée et d'interrompre des courants dans des conditions anormales spécifiées du circuit telles que celles du court-circuit (VEI 60050-441-14-20).	CEI 60056
Contacteur	Appareil 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 des conditions normales du circuit, y compris les conditions de surcharge en service (VEI 60050-441-14-33).	CEI 60470

Fig. 25 : définitions normalisées des principaux types d'appareillage.

automatiquement les portions de réseau en défaut : ils sont capables d'interrompre le courant de court-circuit maximal susceptible de survenir à l'endroit où ils sont installés. Les disjoncteurs sont donc des interrupteurs à haute performance capables de manœuvrer sur ordre d'un opérateur ou d'un dispositif automatique de protection détectant les situations de défaut. Ces appareils doivent avoir une haute fiabilité, car de leur bon fonctionnement dépendent la sécurité et la disponibilité du réseau.

Les durées électriques et mécaniques demandées aux disjoncteurs sont plus élevées que celles demandées aux interrupteurs, typiquement :

- c de 10 à 100 coupures du courant de court-circuit ;
- c de 2000 à 10000 manœuvres mécaniques et coupures à I_n .

Les contacteurs sont les organes de commande de récepteurs qui fonctionnent de manière intermittente, notamment des moteurs électriques. Ce sont des interrupteurs à cadence élevée de manœuvres qui doivent pouvoir interrompre des courants de surcharge plus élevés que le courant nominal (ex : courant de démarrage moteur ou de rotor bloqué) mais pas les courants de court-circuit qui sont éliminés par un dispositif de protection associé (disjoncteur ou fusibles). Leur endurance mécanique et électrique élevée se chiffre généralement en centaines de milliers de manœuvres.

Le graphique de la **figure 26** permet de visualiser le positionnement respectif des quatre types d'appareillage décrits précédemment

Un des points forts de la technique de coupure dans le vide est son aptitude à l'obtention de pouvoir de coupure et d'endurance électrique élevés : c'est pour cette raison que cette technique est surtout utilisée pour les disjoncteurs et les contacteurs.

L'application disjoncteur en MT

Le pouvoir de coupure requis est élevé pour l'application disjoncteur. Les ampoules à vide utilisées pour cette application font donc appel soit à la technologie champ radial, soit à la technologie champ axial. L'une et l'autre permettent d'atteindre les pouvoirs de coupure les plus élevés demandés en MT (jusqu'à 63 kA) ; elles sont donc utilisées en fonction de leurs avantages respectifs (cf. fig. 12). Comme le SF6, le vide offre pour cette application les avantages d'une coupure enfermée sans manifestation extérieure et d'une conception sans entretien avec une endurance électrique élevée.

La régénération diélectrique très rapide du vide peut constituer un avantage par rapport au SF6 dans les applications particulières pour lesquelles la vitesse de montée de la TTR est plus rapide que celle prescrite par les normes CEI 56 et ANSI C37-06 (ex : cas d'un disjoncteur connecté directement au secondaire d'un transfo

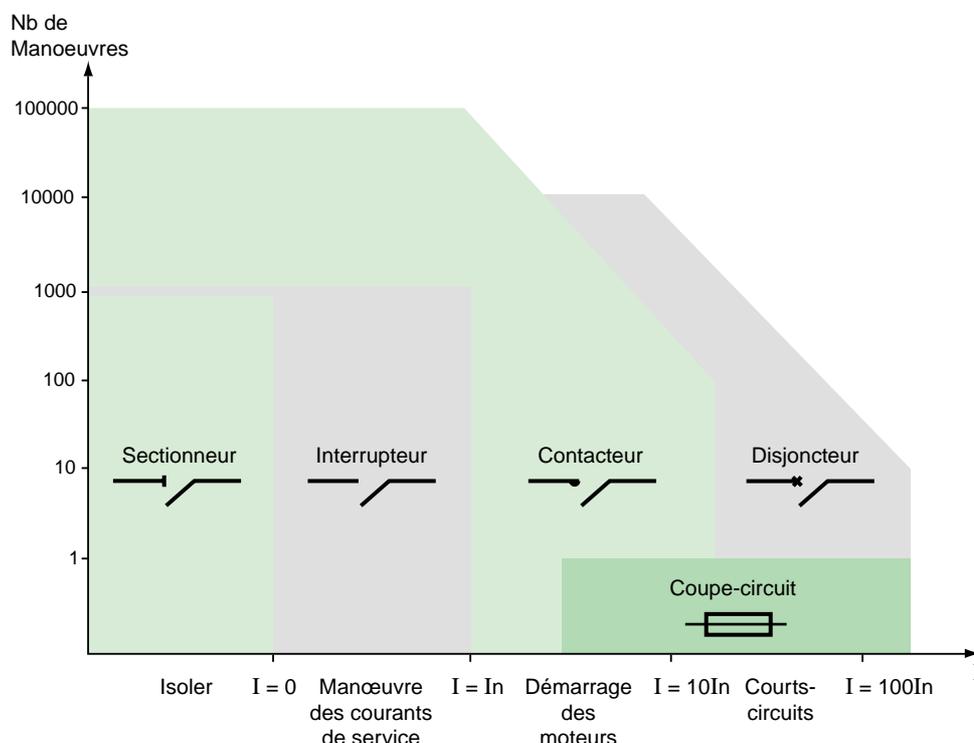


Fig. 26 : positionnement respectif des quatre types d'appareillage en termes de courant à couper et de nombre de manœuvres à effectuer.

de forte puissance). Dans de tels cas, peu fréquents car les TTR normalisées couvrent la grande majorité des applications, les disjoncteurs à vide nécessitent un moindre déclassement que les disjoncteurs SF6.

La coupure dans le vide se faisant sans apport d'énergie extérieure, les disjoncteurs à vide demandent moins d'énergie de commande que les disjoncteurs au SF6 à auto-compression. En ce qui concerne les disjoncteurs au SF6 à arc tournant ou à auto-expansion l'écart est moins significatif. Cet avantage est cependant contrebalancé par l'inconvénient inhérent à la technique vide de ne pouvoir utiliser que des contacts bout à bout. Ces contacts nécessitent en effet des pressions de contact élevées pour empêcher la répulsion et la soudure des contacts lors d'enclenchement sur défaut : les pressions de contact nécessaires par pôle sont de l'ordre de 200 daN pour un disjoncteur 25 kA et 600 daN pour un disjoncteur 50 kA. Cette exigence conduit à augmenter l'énergie de commande pour la fermeture et à renforcer la structure des pôles qui doivent supporter ces contraintes permanentes en position fermée.

Par ailleurs, malgré les pressions de contact élevées, l'utilisation de contacts bout à bout en matériau CuCr ne permet pas d'obtenir des résistances de contact aussi faibles qu'avec de multiples contacts argentés : les disjoncteurs à vide sont donc handicapés par rapport aux disjoncteurs au SF6 par une dissipation thermique supérieure pour les fortes intensités nominales (2500 A et au-delà). Les contacts de l'ampoule à vide, à l'abri de l'oxydation, ne sont pas limités en échauffement, à la différence des contacts des autres disjoncteurs, mais l'environnement de l'ampoule doit évacuer les calories générées par celle-ci tout en respectant les températures limites tolérables sur les raccords et contacts ; c'est pourquoi les disjoncteurs à vide de fort calibre se caractérisent par des connexions et des radiateurs particulièrement volumineux. Indépendamment de leur environnement, les ampoules à vide sont également limitées en échauffement, non par la nature des matériaux qui les composent ou par leur procédé de fabrication (brasage à haute température), mais par les propriétés de perméation des gaz au travers des parois métalliques (en particulier du soufflet) qui deviennent significatives en ce qui concerne l'hydrogène atmosphérique à partir de 200-250 °C.

En conclusion, la technique de coupure dans le vide est bien adaptée à l'application disjoncteur d'usage général en MT et couvre l'ensemble des performances habituellement demandées en tension, courant nominal et pouvoir de coupure. Pour des applications particulières comme la commande de charges inductives ou capacitatives, des précautions particulières doivent être prises, ou d'autres technologies peuvent être mieux adaptées.

L'application contacteur en MT

Il s'agit là d'une application particulièrement bien adaptée à la technique de coupure dans le vide qui a d'ailleurs acquis une position dominante sur ce segment. En effet, les courants à couper se situent dans la gamme des courants facilement interrompus par un arc dans le vide en mode diffus, avec des contacts de formes simples et une faible usure du matériau de contact, donc une excellente endurance électrique. Les pressions de contact peuvent être faibles, du fait des courants nominaux modestes et de la limitation des courants de défaut par les fusibles associés, d'autant plus que les matériaux de contact utilisés sont à très faible soudabilité et acceptent donc un certain degré de répulsion.

Les tensions d'alimentation des moteurs MT situées dans le bas de la gamme MT (en général i 7,2 kV) autorisent une faible course des contacts (de l'ordre de 4 mm) et la réalisation d'ampoules compactes ayant une grande endurance mécanique qui sont particulièrement bien adaptées à la commande par électro-aimant.

Tous ces avantages expliquent le succès de la technique de coupure dans le vide pour l'application contacteur MT. Cependant il ne faut pas perdre de vue le risque de surtension lors de l'ouverture de circuits inductifs (moteur en phase de démarrage, transfo à vide), spécifique à la coupure dans le vide, et la nécessité de mettre en place des protections adaptées (cf. chapitre 3). Ce problème, qui concerne tous les appareillages à coupure dans le vide, doit être particulièrement pris en compte dans le cadre de la commande des moteurs qui sont des récepteurs sensibles aux surtensions.

Les applications interrupteur et sectionneur en MT

La technique de coupure dans le vide qui permet de réaliser des disjoncteurs et contacteurs MT peut aussi, a fortiori, apporter une réponse aux exigences plus modestes qui sont celles des interrupteurs. Elle a cependant rencontré un succès limité pour cette application. En effet, les performances basses peuvent, en général, être obtenues de manière plus économique par les techniques de coupure dans l'air ou dans le SF6. Mais surtout, cette fonction est fréquemment associée à la fonction sectionneur, ce qui est facilement réalisable en technique air ou SF6, mais pas dans le vide. Associer à l'interrupteur vide un sectionneur conventionnel rend cette solution non compétitive.

L'impossibilité d'assurer le sectionnement avec une ampoule à vide tient au phénomène de déconditionnement en tension provoqué par la dégradation de l'état de surface des contacts sous l'effet des manœuvres mécaniques et électriques. Ce déconditionnement ne permet pas de garantir la tenue diélectrique obtenue

sans difficulté particulière à l'issue de la procédure de conditionnement en tension sur une ampoule neuve. Par ailleurs l'impossibilité de contrôler en permanence l'intégrité du milieu diélectrique dans une ampoule à vide est également un frein à son utilisation comme sectionneur.

Avec un interrupteur, la fermeture sur court-circuit est particulièrement pénalisante pour la tenue diélectrique entre contacts, car elle n'est pas suivie par une coupure capable d'éroder les aspérités provoquées par la rupture de la soudure des contacts liée au préamorçage.

Pour éviter une dégradation importante de leur tenue diélectrique, lors de fermetures consécutives sur court-circuit, les contacts des interrupteurs sont réalisés avec des matériaux à très faible soudabilité tels que le WCu, à la place du CuCr utilisé pour les disjoncteurs.

Pour des applications particulières requérant une forte endurance électrique (ex. : interrupteurs pour four à arc), la technique de coupure dans le vide retrouve tout son intérêt et est largement exploitée, même si les problèmes de surtension propres au vide peuvent, dans certains cas, lui faire préférer la technologie SF6 malgré son endurance inférieure.

Une autre application particulière est celle de l'interrupteur de gradin de condensateurs, qui peut être assurée par un disjoncteur au SF6 standard, mais qui, en technique vide, nécessite

une ampoule spécifique. En effet, la charge électrique du condensateur induit une tension de rétablissement particulièrement élevée appliquée aux bornes de l'appareil de coupure. Or la tenue diélectrique post-coupure d'une ampoule sous vide n'est pas son point fort en raison de la possibilité de claquages provoqués par des particules générées lors de la coupure (cf. chapitre 2).

Dans le cas de gradins de condensateurs en parallèle enclenchés séparément, le risque de réamorçage est accentué par l'effet du courant haute fréquence dû à la décharge des condensateurs voisins dans celui qui est mis sous tension : ce courant d'enclenchement impose l'utilisation de matériau de contact à faible soudabilité du type WCu incompatible avec l'application disjoncteur vide. De plus pour éviter des tentatives d'interruption du courant HF d'enclenchement pendant la phase de préamorçage, qui se traduisent par des surtensions préjudiciables aux batteries de condensateurs, des dispositions doivent être prises : l'adjonction de selfs de choc réduit la fréquence du courant d'enclenchement, l'augmentation de la vitesse de fermeture réduit la durée du préamorçage.

En synthèse : si la technique de coupure dans le vide n'est pas à exclure pour la commande de charges capacitives, d'autres techniques, et en particulier le SF6, sont plus adaptées.

4.2 Les applications de la coupure dans le vide en Basse Tension

La technique de coupure dans le vide, largement employée en MT pour les fonctions disjoncteur et contacteur, est capable de remplir les mêmes fonctions en BT. Elle est cependant peu utilisée à ce niveau de tension. En effet, d'une part, elle est en concurrence avec la technique de coupure dans l'air plus simple, plus économique et mieux adaptée, et d'autre part les inconvénients signalés en utilisation MT sont plus gênants en BT.

Le principal défaut de la coupure dans le vide en BT pour la fonction disjoncteur est dû à la faible tension d'arc qui ne peut atteindre ou dépasser la tension du réseau comme dans un disjoncteur à coupure dans l'air : elle ne peut donc pas limiter le courant de défaut à une valeur sensiblement inférieure au courant de court-circuit présumé. Cet effet limiteur est particulièrement utile car il permet d'éviter les efforts électrodynamiques intenses qui seraient produits par les courants de court-circuit présumés souvent élevés en BT (jusqu'à 100 kA et au delà). Cet effet limiteur facilite également la sélectivité naturelle entre disjoncteurs car il est d'autant plus accentué que le calibre du disjoncteur est petit.

Par ailleurs les inconvénients des ampoules à vide déjà mentionnés pour la MT, qui sont liés à l'utilisation de contacts bout à bout (pression de contact élevée et résistance de contact forte), sont plus gênants en BT de puissance dont les circuits peuvent véhiculer des courants de court-circuit importants (non limités) et nécessitent des calibres plus élevés qu'en MT.

Enfin le fort pouvoir de coupure nécessaire en BT impose un encombrement des ampoules à vide pénalisant par rapport aux solutions air pour les disjoncteurs de petit calibre.

Pour ces différentes raisons, l'utilisation des ampoules à vide dans les disjoncteurs BT est limitée à un segment restreint correspondant aux performances suivantes :

- pouvoir de coupure i 75 kA,
- calibres compris entre 800 et 2500 A.

Dans ce cadre, bien que la coupure dans le vide ne soit pas moins coûteuse que celle dans l'air, elle peut être intéressante pour les raisons suivantes :

- coupure enfermée sans manifestation extérieure,
- utilisation en atmosphère polluée,
- endurance électrique plus élevée.

En utilisation contacteur BT les inconvénients des ampoules à vide mentionnés précédemment pour l'utilisation disjoncteur ne sont plus à considérer. Les principaux facteurs qui freinent le développement de cette technique dans ce domaine sont :

○ tout d'abord l'écart de coût en faveur des solutions air classiques ;

○ ensuite les spécificités du vide au niveau des surtensions générées lors de la coupure déjà développées dans le chapitre 3.

En résumé, en basse tension, la technique de coupure dans le vide n'est pas réellement en mesure de concurrencer la coupure dans l'air, sauf dans les cas particuliers où la coupure enfermée apporte un avantage significatif.

4.3 Les applications de la coupure dans le vide en Haute Tension

Dans le domaine de la HT, c'est pour la fonction disjoncteur que l'utilisation de la coupure dans le vide peut être envisagée : diverses tentatives ont été faites, sans succès probant jusqu'à présent. En fait il semble que les caractéristiques de la coupure dans le vide ne lui permettent pas de rivaliser réellement avec la coupure dans le SF6 en Haute Tension.

Une des premières difficultés à surmonter est la réalisation d'ampoules à vide de tension unitaire suffisamment élevée. Si des ampoules à vide capables de couper sous 36 kV sont couramment réalisées, déjà à 52 kV il est fréquent de devoir utiliser deux ampoules en série. A l'heure actuelle le niveau de tension le plus élevé pour lequel est commercialisé un disjoncteur muni d'une seule ampoule par pôle est 72,5 kV.

Les ampoules destinées à des applications à 123-145 kV n'ont, pour le moment, pas dépassé le stade du prototype alors que sont réalisées des chambres de coupure SF6 jusqu'à une tension unitaire de 420 kV.

La solution consistant à mettre un grand nombre d'ampoules en série pour atteindre des tensions élevées, au-delà des problèmes techniques qu'elle pose (de répartition de la tension, de fiabilité...), ne peut manifestement pas rivaliser économiquement avec la coupure dans le SF6. Le principal obstacle à l'obtention d'ampoule à vide de tension unitaire élevée est le «plafonnement» de la performance diélectrique pour les tensions élevées aux alentours de 500 kV (cf. fig. 4), ce qui correspond au niveau de tenue au choc de foudre à atteindre pour des appareils 123-145 kV. Actuellement aucune solution technologique n'est envisagée.

Par ailleurs l'utilisation du vide à des tensions unitaires élevées se heurte au problème des rayons X susceptibles d'être émis par des ampoules soumises à des tensions de service de l'ordre de la centaine de kV. Il s'agit là des niveaux de tension appliqués aux ampoules MT pour les conditionner : cette opération s'effectue dans des enceintes blindées pour protéger les opérateurs contre l'émission de rayons X. Avec des ampoules de conception diélectrique adaptée à la HT et déjà conditionnées, le niveau de rayonnement émis (en position ouvert) devrait rester acceptable, mais comme le fonctionnement des ampoules peut entraîner un déconditionnement partiel, cette préoccupation ne peut pas être totalement écartée.

Pour des raisons de limitation physique la coupure dans le vide ne peut donc prétendre rivaliser avec le SF6 que pour les plus bas niveaux de tension du domaine HT et ceci dans des conditions économiques défavorables. Pour des applications très particulières, l'association des deux techniques de coupure vide et SF6 peut être envisagée, comme cela a été fait pour un disjoncteur 250 kV courant continu utilisant une ampoule à vide en série avec une chambre de coupure SF6. Cette solution réunit les qualités du vide, pour la coupure avec des di/dt et des vitesses d'accroissement de la TTR initiale élevés, à celles du SF6 prenant le relais pour assurer la tenue sur la fin de la montée de TTR. Pour les applications disjoncteur HT courantes il n'est pas sûr que des solutions hybrides puissent rivaliser économiquement avec des solutions 100 % SF6, même si sur le plan technique de telles solutions sont attrayantes en permettant d'associer les qualités de chaque technique de coupure.

5 Conclusion

A l'issue de ce tour d'horizon, la technique de coupure dans le vide apparaît, en raison de ses bonnes performances en pouvoir de coupure et endurance électrique, comme généralement bien adaptée pour les applications disjoncteur et contacteur en moyenne tension.

Cependant la technique de coupure dans le SF6 est souvent mieux placée lorsque les caractéristiques privilégiées sont la tenue diélectrique, le faible niveau des surtensions de manœuvre ou l'aptitude aux courants permanents élevés.

Bien que mature, la technique de coupure dans le vide présente encore un potentiel notable de progression de ses performances, en particulier avec la technologie champ axial, relativement récente. Ainsi, la tendance à la réduction de taille des ampoules disjoncteur devrait se poursuivre. Pour cela des progrès sont à réaliser dans l'optimisation de l'utilisation de la surface des contacts et dans l'accroissement des densités de courant admissibles. Avec ces objectifs, les principaux axes de recherche actuels sont :

- c la modélisation de l'arc et de ses interactions avec le champ magnétique axial ;
- c les mécanismes de diffusion et de répartition de l'énergie d'arc à la surface des contacts ;
- c l'amélioration des caractéristiques des matériaux de contact.

Pour étendre les domaines d'applications de la technique de coupure dans le vide, et mieux exploiter ses qualités, les constructeurs d'appareillage envisagent aussi de nouvelles solutions et notamment l'association à d'autres techniques, en particulier à celle du SF6, afin de conjuguer leurs avantages respectifs. Cette approche est déjà utilisée pour certaines cellules moyenne tension à isolation gazeuse qui allient les qualités de la coupure dans le vide à celles de l'isolation dans le SF6.

Une autre voie, pour le moment encore peu explorée, est la réalisation de disjoncteurs hybrides associant les deux techniques de coupure, dans le vide et dans le SF6. A priori plus coûteuse, elle pourrait néanmoins s'avérer intéressante dans certains domaines d'application si elle parvient à concilier efficacement le meilleur des deux technologies.

Bibliographie

Cahiers Techniques Schneider Electric

c Les techniques de coupure en MT,
Cahier Technique no.193 - 1998 -
S. THEOLEYRE

Autres publications

c Ouvrage de référence

v Circuit interruption - Theory and techniques,
1984 -

THOMAS E. BROWNE
Marcel Dekker, Inc.

v Vacuum Switchgear,
1994 -

ALLAN GREENWOOD
IEEE (Institute of Electrical and Electronics
Engineers)

v Handbook of vacuum arc science and
technology - Fundamentals and applications,
1995 -

RAYMOND L. BOXMAN, PHILIP J. MARTIN,
DAVID M. SANDERS
Noyes publications

c Généralités sur la coupure

v Circuit-breaker application (in Circuit
interruption),
1984 -

CHARLES L. WAGNER
Marcel Dekker, Inc.

c Isolation dans le vide

v The effect of contact geometry and HV
conditioning on the field intensification factor of
vacuum interrupter contacts,
Elektryka Nr 38 -1989 -
R. P. P. SMEETS, H. F. REIJNDERS, W. M. C.
VAN DEN HEUVEL, Y. H. FU

v Isolation sous vide,
D2540 et D2541 - 1991 -
ANNE ZEITOUN-FAKIRIS
Techniques de l'ingénieur

c Arc dans le vide

v Sheath growth in a low pressure plasma,
February 1971 -

J. G. ANDREWS, R.H. VAREY
The physics of fluids

v Interruption in vacuum (in Circuit interruption),
1984 -

CLIVE W. KIMBLIN, PAUL G. SLADE, ROY E.
VOSHALL
Marcel Dekker, Inc.

v Physique de la coupure du courant de court-
circuit dans les disjoncteurs à vide,
Revue ABB - 5/1993 -
EDGAR DULLNI

v Measurements and modelling in the current
zero region of vacuum circuit-breakers for high
current interruption,
1996 -

JOHANNES KAUMANN
IEEE 17th ISDEIV-Berkeley

v Post-arc dielectric breakdown in vacuum
circuit-breakers,
August 1999 -

STEPHEN W. ROWE
IEE High voltage engineering symposium, 22-27

c Champ magnétique axial

v Interaction between a vacuum arc and an axial
magnetic field,
1978 -

H. C. W. GUNDLACH
IEEE 8th ISDEIV-Albuquerque

v Axial magnetic field type vacuum circuit-
breakers based on exterior coils and horse
shoes,
1986 -

H. SCHELLEKENS, K. LENSTRA, J.
HILDERINK, J. TER HENNEPE, J. KAMANS
IEEE 12th ISDEIV-Shoresh

v The current distribution and the magnetic
pressure profile in a vacuum arc subject to an
axial magnetic field,
1986 -

I. IZRAELI, R. L. BOXMAN, S. GOLDSMITH
IEEE 12th ISDEIV-Shoresh

v Effect of an axial magnetic field upon the
development of the vacuum arc between
opening electric contacts,
March 1993 -

B. SCHULMAN, PAUL G. SLADE, J. V. R.
HEBERLEIN

IEEE transactions on components, hybrids, and
manufacturing technology

v Evaluation of AC axial magnetic field needed
to prevent anode spots in vacuum arcs between
opening contacts,
March 1994 -

BRUCE SCHULMAN, JOHN A. BINDAS
IEEE transactions on components, packaging,
and manufacturing technology

✓ Technological progress of axial magnetic field vacuum interrupters,
1996 -

K. WATANABE, E. KANEKO, S. YANABU
IEEE 17th ISDEIV-Berkeley

✓ Arc behaviour in axial magnetic field vacuum interrupters equipped with an external coil,
1998 -

HANS SCHELLEKENS
IEEE 18th ISDEIV-Eindhoven

c Matériau de contact

✓ Contact materials for vacuum switching devices,
1992 -

F. HEITZINGER, H. KIPPENBERG, K. E. SAEGER, K.-H. SCHRÖDER
IEEE 15th ISDEIV-Darmstadt

✓ Advances in material development for high power, vacuum interrupter contacts,
March 1994 -

PAUL G. SLADE
IEEE transactions on components, packaging, and manufacturing technology

c Surtensions

✓ Vacuum circuit-breaker application and switching surge protection (in Circuit interruption),
1984 -

JOHN F. PERKINS
Marcel Dekker, inc.

✓ Types of reignition following high frequency current zero in vacuum interrupters with two types of contact material,
1992 -

R. P. P. SMEETS, T. FUNAHASHI, E. KANEKO, I. OHSHIMA
IEEE 15th ISDEIV-Darmstadt

✓ Mathematical modelling of the high frequency behavior of vacuum interrupters and comparison with measured transients in power systems,
1996 -

J. HELMER, M. LINDMAYER
IEEE 17th ISDEIV-Berkeley

Schneider Electric

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

Réalisation : HeadLines Valence.
Edition : Schneider Electric
Impression : Imprimerie du Pont de Claix - Claix - France - 1000.
- 100 FF-