Éclateur 120 kV faible inductance sous pression d'hexafluorure de soufre

M. Delmas, F. Delobea, A. Jolas, J.P. Watteau

► To cite this version:

M. Delmas, F. Delobea, A. Jolas, J.P. Watteau. Éclateur 120 kV faible inductance sous pression d'hexafluorure de soufre. *Revue de Physique Appliquée*, 1967, 2 (1), pp.7-16. 10.1051/rphysap:01967002010700 . jpa-00242767

HAL Id: jpa-00242767

<https://hal.science/jpa-00242767>

Submitted on 1 Jan 1967

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCLATEUR 120 kV FAIBLE INDUCTANCE SOUS PRESSION D'HEXAFLUORURE DE SOUFRE

M. DELMAS, F. DELOBEAU, A. JOLAS, J. P. WATTEAU,

C.E.A., B. P. 27, 94-Villeneuve-Saint-Georges.

Résumé. — On décrit un éclateur du type trois électrodes fonctionnant dans l'hexafluorure de soufre. Ses caractéristiques sont : tension de fonctionnement variant de 60 à 120 kV, courant maximum 150 kA, inductance 30 nH, dispersion moyenne du retard au déclenchement 15 ns. Cet éclateur est utilisé dans la construction d'un banc de condensateurs 24 kJ-120 kV. Un second éclateur du même type fonctionnant dans l'azote à 50 kV a supporté un courant de 600 kA après augmentation des dimensions et de la résistance mécanique de ses électrodes.

Abstract. — A three electrode type spark gap working in sulphur hexafluoride is described. Its characteristics are : operating voltage from 60 to 120 kV, maximum current 150 kA, inductance 30 nH, jitter 15 ns. The spark gap is used in the assembling of a 24 kJ-120 kV capacitor bank. By increasing the mechanical strength of its electrodes it was possible to operate the spark gap in nitrogen up to 600 kA at 50 kV.

I. Introduction. — Pour créer en laboratoire des plasmas de densité et de température élevées, on est amené à produire des décharges électriques de forte intensité où des énergies de plusieurs dizaines de kilojoules sont libérées en un temps de l'ordre de la microseconde. Le procédé habituellement utilisé consiste à charger lentement un banc de condensateurs et à le décharger dans une chambre à décharge au moyen d'un ou plusieurs éclateurs. Le gaz conducteur contenu dans la chambre se comprime sous l'action des efforts électromagnétiques et l'énergie cinétique qui lui est communiquée se thermalise en fin de compression. L'inertie du gaz conducteur est faible et le transfert de l'énergie doit être rapide pour être efficace.

La rapidité du transfert est caractérisée par la période T d'un circuit oscillant équivalent au circuit réel dans lequel on assimile la décharge à une inductance moyenne L_0 . La période a pour expression :

$$T = 2\pi \sqrt{(L_0 + L_p) C}$$

C est la capacité du banc de condensateurs. L_p est la somme des inductances parasites du banc de condensateurs, des éclateurs et des connexions. Pour réduire la période, on diminue la capacité et l'inductance du circuit. La réduction de la capacité à énergie donnée conduit à accroître la tension de charge du banc de condensateurs. L'inductance de la décharge est fixée par ses dimensions. Pour que l'énergie soit bien utilisée, on cherche à rendre négligeable l'inductance parasite devant l'inductance de la décharge par un câblage approprié. On réalise un câblage de structure coaxiale et l'on dispose en parallèle sur la décharge des éléments identiques. Chaque élément comprend un ou plusieurs condensateurs et un éclateur, les

connexions étant faites par un grand nombre de câbles coaxiaux. La longueur des connexions est fixée en partie par l'encombrement des composants mais doit rester faible pour que l'inductance parasite L_p ne devienne pas prohibitive. L'énergie est donc fractionnée, et, en cas de rupture de diélectrique au cours de la charge du banc, la destruction est limitée.

La mise au point des éclateurs qui permettent de contrôler l'instant de la décharge est rendue délicate par la complexité des phénomènes d'ionisation et de conduction. En particulier, il est nécessaire que les déclenchements des éclateurs soient synchrones pour que les énergies stockées dans les différents éléments ne soient pas libérées à contretemps. Le déclenchement de chaque éclateur tend à être perturbé par les variations de potentiel produites à ses bornes par le fonctionnement des autres éclateurs couplés en parallèle. Pour neutraliser cette réaction, tous les éclateurs doivent être déclenchés en un temps inférieur au temps de propagation d'un signal électrique entre deux éclateurs. La précision du déclenchement prend de ce fait une grande importance.

Dans cet article, nous exposons les problèmes que nous avons rencontrés lors de la réalisation d'un éclateur destiné à équiper un banc de condensateurs chargé sous une tension de 120 kV. Compte tenu de ce qui précède, nous nous sommes efforcés qu'il possède les trois qualités suivantes : tenue en tension élevée, faible inductance et grande fidélité dans le déclenchement.

II. Choix de l'éclateur. — La tenue en tension de l'éclateur dépend de la géométrie des électrodes principales, de la nature et de la pression du gaz qui les sépare. Pour réduire l'inductance de l'éclateur, on est conduit à rapprocher ses électrodes et à utiliser un gaz

TABLEAU I

AUTEURS	TENSION DE FONCTIONNEMENT kV	COURANT MAXIMUM kA	CHARGE ÉLECTRIQUE DÉPLACÉE C	INDUCTANCE ÉCLATEUR nH	RETARD ns
A. E. Bishop, G. D. Edmonds [1]	40 à 100	200	0,5	55	60 ± 5
K. Harries et alii [2]	100	500	200	10	1 000 ± 100
General Electric [3]	2 à 150	100	1		100 ± 50
M. Delmas et alii	60 à 120	150	0,5	28	70 ± 7

de haute rigidité diélectrique, soit à pression faible, soit à pression élevée.

Le tableau I résume les caractéristiques d'éclateurs mis au point par d'autres auteurs [1], [2], [3] et dont la tension de fonctionnement maximum est égale ou supérieure à 100 kV.

Technologiquement, il est plus facile de maintenir une pression élevée dans la chambre de l'éclateur au moyen d'une bouteille de gaz comprimé en communication avec la chambre au travers d'un détendeur, que d'établir le vide. La rigidité diélectrique de l'hexafluorure de soufre (SF_6) étant plus élevée que celle des gaz usuels [4-5], nous avons procédé à l'étude de la tension disruptive de ce gaz et de l'azote pour des pressions élevées et une géométrie donnée de l'éclateur. Les essais ont été effectués sur un éclateur du type trois électrodes dont la chambre pouvait résister à des pressions de 10 bars. Le volume et la forme de la chambre de l'éclateur nous ont été imposés par la tenue en tension entre électrodes et le long de l'isolant qui constitue le corps de la chambre. Pour les fortes tensions, la décharge s'amorce le long de l'isolant. La forme des électrodes et de l'isolant qui les réunit a été modifiée de façon que la décharge prenne toujours naissance dans l'espace interélectrode.

III. Procédé d'isolement. — La juxtaposition des diélectriques solides entrant dans la fabrication de l'éclateur et de ses connexions laisse subsister entre les surfaces en regard une couche de gaz (*fig. 1 a*) dont la rigidité diélectrique est faible. De plus, la surface des diélectriques solides sert de support à des charges électriques qui facilitent l'amorçage de la couche de gaz. On supprime habituellement cette discontinuité de l'isolement par l'interposition d'un gaz sous pression ou d'un liquide. Parmi les liquides, l'huile est généralement utilisée. Le gaz sous pression ou l'huile assurant la tenue en tension nécessitent la réalisation de montages étanches qui manquent de souplesse et compliquent la maintenance et les réparations. Désirant un éclateur de conception simple, nous avons rejeté cette solution, et nous nous sommes orientés vers l'emploi d'un isolant solide et déformable, le caoutchouc silicone [6].

Des joints moulés, exécutés dans cette matière sont placés entre les surfaces isolantes (*fig. 1 b*). Le gaz

FIG. 1. — Schéma de principe de l'utilisation du caoutchouc silicone.

présent est chassé par la compression du joint. On facilite le glissement du joint pendant la compression en l'enduisant au préalable de graisse silicone afin d'éviter l'inclusion de bulles de gaz entre les surfaces en regard. De nombreux essais ont été effectués pour déterminer l'épaisseur des joints sur des montages reproduisant les formes de l'éclateur. Nous avons obtenu une tenue en tension satisfaisante à 120 kV pour une épaisseur de joint de 20 mm et un taux de compression du caoutchouc silicone de 7 à 8 %.

IV. Description. — L'éclateur a été construit pour s'adapter à un type de condensateur et de câble existants [7]. Cet impératif a dominé sa conception. L'ensemble constitué par un éclateur monté sur la borne d'un condensateur 120 kV — 0,84 μF est représenté en coupe sur la figure 2.

Le condensateur est de forme cylindrique. Il est contenu dans une cuve en tôle d'acier 1 comportant une bride d'assemblage à sa partie supérieure. La

FIG. 2. — Coupe axiale de l'éclateur 120 kV.

borne de connexion 24 en araldite chargée porte à sa partie supérieure une plaque circulaire 31 en acier étamé, reliée à l'armature haute tension du condensateur. L'éclateur est placé au-dessus de cette borne. On distingue en 27 l'électrode principale reliée à l'armature haute tension du condensateur par l'intermédiaire de la plaque de connexion 32. L'autre électrode principale 8 est reliée aux conducteurs intérieurs des câbles coaxiaux par la plaque de connexion 15. Le circuit se referme par les conducteurs extérieurs des câbles coaxiaux, l'enveloppe de l'éclateur 7-20, le conducteur de retour 2 et la cuve du condensateur 1.

Les dimensions de l'éclateur et par suite son inductance sont réduites de façon importante par l'utilisation de joints en caoutchouc silicone. Le joint 3 placé entre la borne du condensateur et le plateau isolant est comprimé par la traction exercée par les tirants 23 sur un plateau 22 répartissant la compression sur toute la surface du joint. L'éclateur est réalisé en deux parties pour faciliter les visites et le contrôle de l'espace interélectrode. En démontant les vis 33, on sépare le corps supérieur 20 du plateau 21, ce qui permet d'accéder à l'intérieur de la chambre. Un joint comprimé 29 par le serrage des vis 33 assure l'étanchéité électrique entre les pièces isolantes 19 et 30. Un second joint 28 comprimé par un écrou joue un rôle analogue entre les pièces 30 et 22. L'isolement de la terminaison des 6 câbles coaxiaux principaux 14 et du câble de déclenchement 35 est obtenu par le joint de caoutchouc silicone 13, comprimé par le plateau 7 et les prises des câbles. Toutes les pièces isolantes de la chambre en contact avec le gaz sous pression sont en téflon. Ce matériau a été choisi pour sa résistance aux agents chimiques et sa bonne tenue sous l'action de l'arc électrique.

Le câble de déclenchement est connecté à l'électrode de déclenchement en tungstène 10 de diamètre 4 mm par l'intermédiaire d'une tige cylindrique en laiton 11. L'espace annulaire (4 mm) séparant l'électrode principale 8 de l'électrode de déclenchement 10 est déterminé de telle façon que l'impulsion de déclenchement ne provoque pas d'amorçage entre ces deux électrodes.

V. Étude de l'interrupteur. — Pour la géométrie des électrodes considérée, l'hexafluorure de soufre semble avoir un comportement différent suivant les polarités des tensions appliquées sur les électrodes [8], [9], [10]. Lorsque l'électrode principale opposée à l'électrode de déclenchement est chargée négativement, nous avons parfois observé un retard au déclenchement anormal de plusieurs microsecondes. Ce phénomène ne s'est jamais manifesté avec une polarité positive. Les mesures ci-dessous ont été faites dans ce dernier cas.

1. REMPLISSAGE DE LA CHAMBRE. — Afin d'obtenir une pureté satisfaisante du SF_6 , on vide préalablement la chambre et le circuit de remplissage à l'aide d'une pompe à vide primaire. Le gaz est ensuite injecté à la pression convenable par le détendeur de la bouteille

de gaz comprimé. Une cartouche déshydratante placée à la sortie de cette bouteille absorbe les traces d'humidité que ce gaz pourrait contenir.

2. TENSION D'AUTO-DÉCLENCHEMENT V_a . — La tension d'auto-déclenchement limite le domaine de fonctionnement de l'éclateur. Elle dépend de la pression p du gaz.

Nous avons relevé la courbe d'auto-déclenchement donnant V_a en fonction de p pour le SF_6 et l'azote (fig. 3), en faisant varier la pression par valeurs crois-

FIG. 3. — Courbes de la tension d'auto-déclenchement V_a de l'éclateur 120 kV en fonction de la pression d'azote ou de SF_6 régnant dans la chambre de l'éclateur.

santes. La distance interélectrode déterminée par des essais préliminaires était fixée à 6 mm. Le circuit de décharge était constitué par une inductance de 2,8 μH . La conduction de l'éclateur s'établit très rapidement comme le montre l'oscillogramme de la tension aux bornes de l'inductance de charge (fig. 4). Le temps de

FIG. 4. — Mesure du temps de montée de la tension aux bornes de l'inductance de charge au cours de l'amorçage de l'éclateur.

montée du signal observé est égal ou inférieur au temps de montée de 7 ns de la chaîne de mesure.

La pression moyenne pour une tension d'auto-

déclenchement de 80 kV est de 4 bars pour le SF₆ et de 9 bars pour l'azote. Par contre, la dispersion relevée sur la tension d'auto-déclenchement est plus grande pour le SF₆ que pour l'azote : à 80 kV, elle est de 5 kV pour l'azote et de 10 kV pour le SF₆.

Les courbes d'auto-déclenchement de la figure 3 ont été relevées sur un éclateur après « formation ». La tenue en tension de l'éclateur dépend en effet du nombre de décharges effectuées et se stabilise généralement après une trentaine de déclenchements pour un courant de fonctionnement de 100 kA (fig. 5). La

FIG. 5. — Variation de la tension d'auto-déclenchement en fonction du nombre total de tirs subis par l'éclateur.

formation de l'éclateur diminue la dispersion de la tension d'auto-déclenchement et permet d'adopter une tension de fonctionnement plus rapprochée de celle-ci. Ceci diminue le retard au déclenchement et sa dispersion.

3. MESURE DE L'INDUCTANCE ET DE LA RÉSISTANCE. — Pour cette mesure, l'ensemble condensateur-éclateur est fermé sur lui-même. Le condensateur est chargé sous une tension de 20 à 40 kV. On relève sur un oscillogramme la période de la décharge et, compte tenu de la capacité du circuit, on en déduit l'inductance de ce dernier. L'inductance propre du condensateur étant connue, par différence on obtient l'inductance globale de l'éclateur et de ses connexions : $28 \text{ nH} \pm 5 \text{ nH}$.

La résistance de l'ensemble condensateur-éclateur se déduit de l'amortissement du courant de décharge. Elle est de $42 \pm 10 \text{ m}\Omega$ lorsque le courant varie de 80 à 160 kA.

4. ÉTUDE DYNAMIQUE. — L'éclateur est déclenché par une impulsion de tension appliquée sur l'électrode de déclenchement C (fig. 6). La polarité de l'impulsion est telle qu'elle augmente la différence de potentiel entre l'électrode principale A reliée au condensateur

FIG. 6

Schéma électrique du circuit d'étude de l'éclateur.

et l'électrode de déclenchement. La variation brusque du potentiel de l'électrode de déclenchement provoque l'amorçage de l'éclateur. L'impulsion est transmise par une résistance de découplage.

Au début de l'étude, l'impulsion de déclenchement était fournie par un déclencheur électronique. Ce déclencheur était constitué par un transformateur d'impulsion dans le primaire duquel on déchargeait un condensateur de $0,2 \mu\text{F} - 10 \text{ kV}$ par l'intermédiaire d'un thyatron 5 C 22. Le secondaire délivrait une impulsion d'amplitude de 70 kV crête et de temps de montée de 500 ns qui était correctement transmise par la résistance de découplage (fig. 7, courbe 4).

FIG. 7

Allure des différentes impulsions de déclenchement.

Pour disposer d'une impulsion de temps de montée plus faible, nous avons utilisé par la suite un circuit de déclenchement identique au circuit à déclencher, mais dans lequel le condensateur est chargé avec une polarité opposée. Aux bornes de la charge inductive on dispose d'une impulsion d'amplitude réglable jusqu'à 120 kV et dont le temps de montée est inférieur à 10 ns (cf. V.2) (fig. 7, courbe 1). Ce nouveau circuit

de déclenchement comprend un maître éclateur, qui sera utilisé par la suite pour déclencher simultanément plusieurs éclateurs d'un même banc.

La figure 7 représente les différentes impulsions appliquées sur l'électrode de déclenchement, après transmission par la résistance de découplage (fig. 6). Nous remarquons que, dans le cas du maître éclateur, le temps de montée est fortement augmenté par la résistance de découplage (courbes 2 et 3). Nous avons remédié partiellement à cet inconvénient en remplaçant une résistance en graphite de $2\,000\ \Omega$ (courbe 3) par une résistance bobinée non inductive de $100\ \Omega$ (courbe 2). Cette dernière résistance est constituée par deux enroulements bobinés en sens contraire et séparés par un isolant. Le temps de montée de l'impulsion après transmission est de 100 ns .

FIG. 8. — Mesure du retard et de sa dispersion.

a) Variation du potentiel V de l'électrode de déclenchement au cours du temps (1, l'éclateur n'est pas conducteur ; 2, l'éclateur devient conducteur).

b), c) Superposition de plusieurs tirs pour la mesure de la dispersion du retard.

Nous avons étudié le retard au déclenchement et sa dispersion pour les différentes impulsions de déclenchement. Un diviseur de tension mesure les variations du potentiel de l'électrode de déclenchement. Ce potentiel change de signe lorsque l'éclateur devient conducteur, comme on l'observe sur l'oscillogramme (a) de la figure 8. Sur cet oscillogramme, on a superposé l'impulsion de déclenchement, obtenue en augmentant la pression de l'éclateur pour qu'il ne devienne pas conducteur.

Le retard moyen est respectivement de 60 ns , 200 ns et 300 ns pour les impulsions de déclenchement 2, 3, et 4 (fig. 7), lorsque le rapport tension d'essai sur tension d'auto-déclenchement est de 95% .

La dispersion du retard (jitter) est mesurée sur une dizaine de décharges (fig. 8, oscillogrammes b et c). Nous avons étudié la dispersion dans deux cas :

a) On maintient la pression constante et l'on fait varier la tension de charge (fig. 9). La dispersion du

FIG. 9. — Variation de la dispersion du retard en fonction de la tension de fonctionnement à pression constante pour différentes impulsions de déclenchement.

retard décroît à mesure que l'on se rapproche de la tension d'auto-déclenchement. Pour une tension de charge donnée, la dispersion est d'autant moins importante que le temps de montée de l'impulsion de déclenchement est plus faible.

b) On fait varier la pression et pour une pression donnée on règle la tension de charge à 95 % de la tension d'auto-déclenchement (fig. 10).

FIG. 10. — Variation de la dispersion du retard en fonction de la pression pour une tension de fonctionnement égale à 95 % de la tension d'auto-déclenchement pour différentes impulsions de déclenchement.

Cette mesure nécessite que l'éclateur soit formé, de façon que la dispersion de la tension d'auto-déclenchement ne soit pas trop grande. La dispersion du retard ne dépend pas de la pression comme le montrent les courbes de la figure 10. On retrouve sur ces courbes l'influence favorable d'un temps de montée faible de l'impulsion de déclenchement.

En conclusion, pour obtenir une faible dispersion du retard au déclenchement, il faut faire fonctionner l'éclateur au voisinage de sa tension d'auto-déclenchement et le déclencher avec une impulsion de faible temps de montée.

Pour la géométrie considérée, on peut faire varier la tension de fonctionnement de l'éclateur en ajustant la pression, dans une plage s'étendant de 60 kV (3 bars) à 120 kV (6 bars).

5. DURÉE DE VIE DE L'ÉCLATEUR. — L'étude a porté sur plusieurs éclateurs ayant été soumis à des centaines de décharges oscillantes. La tension de fonctionnement était de l'ordre de 100 kV (80 % de tension inverse), l'intensité moyenne du courant de 100 kA et la quantité d'électricité écoulee de 0,5 C.

Dans ces conditions, nous avons fait les constatations suivantes :

— Les électrodes principales en cunitène (cuivre, nickel, tungstène) subissent une érosion très faible.

— L'électrode de déclenchement en tungstène se brisait sur les premiers modèles d'éclateur. Nous avons augmenté le diamètre de l'électrode pour accroître sa résistance. Le diamètre retenu est de 4 mm.

— Pendant la formation, l'isolateur en téflon de l'électrode de déclenchement subit une forte érosion. Il se vaporise partiellement et des cavités apparaissent à sa surface qui modifient sa forme. Pour éviter cette destruction partielle de l'isolateur, nous prévoyons de le réaliser en céramique dans les prochains modèles.

— Après une centaine de décharges, les parois de la chambre en téflon de l'éclateur se couvrent d'une poudre colorée dont la présence n'affecte pas le fonctionnement de l'éclateur.

VI. Applications. — 1. RÉALISATION D'UN BANC DE CONDENSATEURS DE 24 kJ-120 kV (fig. 12). — Nous avons couplé en parallèle quatre ensembles condensateur-éclateur 6 kJ-120 kV pour constituer un banc de 24 kJ. Chacun des ensembles est connecté sur la charge par 3 câbles coaxiaux de 1,5 m de long (fig. 12). Cette charge est une chambre à décharge d'un mètre de long, dont l'inductance moyenne est de 200 nH. Les connexions des 12 câbles coaxiaux sur la chambre sont faites au moyen d'une boîte de connexions qui permet de conserver la structure coaxiale dans tout le montage, et dont l'isolement est basé sur des principes identiques à ceux mis en œuvre dans la construction de l'éclateur.

Les quatre ensembles sont déclenchés simultanément par quatre impulsions délivrées par un cinquième ensemble ou maître éclateur (fig. 11 et 12). Pour les premiers essais, les résistances de découplage R₁ étaient en graphite. La dispersion du retard au déclenchement de 50 ns (fig. 10) était supérieure au temps de propaga-

FIG. 11. — Schéma électrique du banc de condensateurs 24 kJ-120 kV.

- R₁-R₃ : Résistances bobinées non inductives 100 Ω.
- R₂ : Résistance bobinée 2 000 Ω.
- Z₁ : Self de charge 2,8 μH.
- Z₂ : Self de charge 0,2 μH.
- C₁...C₅ : Condensateurs 0,84 μF-120 kV. 30 nH.

FIG. 12. — Photographie du banc de condensateurs 24 kJ-120 kV. On distingue de la gauche vers la droite : la chambre à décharge, la boîte de connexions haute tension, le banc de condensateurs, les résistances R_1 de déclenchement, le maître éclateur.

tion d'une impulsion entre deux éclateurs séparés par une longueur de câble de 3 m, soit 15 ns. La synchronisation des déclenchements était par suite déficiente. Après avoir remplacé les résistances en graphite par des résistances bobinées, nous avons obtenu une bonne synchronisation, la dispersion du retard et le temps de propagation étant sensiblement égaux (fig. 10).

Pour que la fiabilité relative à l'isolement soit bonne, nous avons utilisé des câbles coaxiaux dont l'isolement est de forte épaisseur. Leur inductance linéique de 240 nH.m^{-1} est très élevée. Nous pensons remplacer ceux-ci par des câbles coaxiaux mieux étudiés et dont l'inductance linéique sera de 100 nH.m^{-1} . Actuellement, l'inductance parasite totale du banc est de 45 nH dont 30 nH provenant des câbles coaxiaux.

En résumé, les performances du banc sont les suivantes : énergie, 24 kJ ; tension de charge, 120 kV ; courant maximum, 600 kA ; inductance parasite, 45 nH.

2. DÉVELOPPEMENT DE L'ÉCLATEUR POUR LES COURANTS ÉLEVÉS. — Dans une autre étude, nous avons été conduits à mettre au point un éclateur susceptible d'être employé avec un banc de 38 kJ-50 kV dont l'inductance propre est de 10 nH. Ce banc constitue le module d'une batterie de condensateurs de 300 kJ-50 kV. Les caractéristiques que nous cherchions à obtenir pour ce nouvel éclateur étaient les suivantes : tenue en tension 50 kV, courant maximum 500 kA, inductance propre $\sim 10 \text{ nH}$.

Le courant maximum de l'éclateur 120 kV précédemment décrit est limité à 150 kA par la résistance mécanique de ses électrodes. Nous avons modifié cet éclateur pour qu'il remplisse les conditions énoncées plus haut.

Le nouvel éclateur se compose de trois parties comme le montre la figure 13. Deux boîtes de connexions le relient d'une part au banc de condensateur qu'il contrôle, et d'autre part à la charge. On distingue sur

FIG. 13. — Photographie de l'éclateur 50 kV : à gauche les câbles, la boîte de connexions et la chambre, à droite la seconde boîte de connexions.

FIG. 14. — Coupe axiale de l'éclateur 50 kV.

- 3-13 : Électrodes principales (alliage de Cu-Ni-W).
- 4 : Électrode de déclenchement (laiton).
- 7 : Câbles coaxiaux connectés à la charge.
- 12 : Câbles coaxiaux connectés à la batterie de condensateurs.
- 5 : Câble de déclenchement.
- 8-6-14-16 : Joints de caoutchouc silicone.
- 11 : Vanne d'entrée du gaz.
- 10 : Manomètre.

la figure 13 les 50 câbles coaxiaux provenant du banc de condensateurs. Entre ces deux boîtes de connexions se situe la chambre de l'éclateur dont une vue en coupe est donnée dans la figure 14. Les problèmes d'isolement ont été résolus au moyen d'une technologie analogue à celle de l'éclateur 120 kV.

Le montage adopté facilite le contrôle de l'écartement des électrodes et l'entretien de la chambre. La tension de fonctionnement étant réduite à 50 kV, nous avons remplacé le SF_6 par de l'azote dont la rigidité diélectrique est deux fois moins grande. Enfin, pour que le courant maximum admissible soit de 500 kA,

nous avons augmenté la surface des électrodes et amélioré leur fixation sur les boîtes de connexions. Au début des essais, nous avons rencontré des difficultés dans la mise au point de l'électrode de déclenchement. Cette électrode, d'abord réalisée en tungstène, se brisait sous l'action des forts courants comme dans le cas de l'éclateur 120 kV. Nous avons pu remédier à ce défaut en remplaçant le tungstène par du laiton et en donnant à l'électrode un diamètre de 10 mm.

Pour étudier le fonctionnement de l'éclateur, nous avons utilisé une charge inductive de 200 nH. L'impulsion de déclenchement était fournie par un maître éclateur du type précédent et transmise par une résistance bobinée. Les performances obtenues sont :

- tension de fonctionnement de 20 kV (1,2 bar) à 50 kV (3 bars) ;
- courant crête 600 kA ;
- inductance (y compris les connexions) 15 ± 3 nH ;
- résistance de l'éclateur et du banc de condensateurs $8 \text{ m}\Omega \pm 2$ pour un courant de 600 kA ;
- retard 70 ± 7 ns.

Conclusion. — En établissant une pression de plusieurs bars d'hexafluorure de soufre dans la chambre d'un éclateur du type trois électrodes spécialement étudié, nous avons été en mesure de le faire fonctionner dans une plage de tension s'étendant de 60 à 120 kV.

Pour ces pressions, le temps de montée de l'éclateur est de quelques nanosecondes. Nous avons observé que la dispersion du retard au déclenchement est d'autant plus faible que le temps de montée de l'impulsion de déclenchement est lui-même faible. Cette dispersion peut être réduite à moins de 15 ns pour une impulsion atteignant 80 kV en 100 ns. Bien que l'éclateur soit destiné à fonctionner à des tensions élevées, une technique d'isolement qui emploie le caoutchouc silicone comprimé pour réduire les discontinuités diélectriques permet une réalisation compacte et limite l'inductance de l'éclateur et de ses connexions à 30 nH. Cet éclateur est étroitement associé au condensateur dont il contrôle la décharge, et son entretien est d'une grande souplesse. L'ensemble constitue le module de 6 kJ d'un banc de condensateurs 120 kV-24 kJ de 45 nH de self propre. En modifiant la structure de l'éclateur précédent et en la rendant plus robuste, nous avons réalisé un éclateur pouvant supporter un courant crête de 600 kA sous 50 kV.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont participé à cette étude technologique, et plus particulièrement MM. D. Fossey, J. P. Garçonnet et J. Godiot, pour leur coopération efficace qui a permis de mener à bien les travaux décrits dans cet article.

Manuscrit reçu le 10 octobre 1966.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BISHOP (A. E.), EDMONDS (G. D.), Low inductance 100 kV switch for starting, diverting and clamping capacitor discharges, *Proc. IEE*, 1966, **113**, n° 9, p. 1549.
- [2] HARRIES (K.), JAMES (T. E.), LEWIS (C.), MEDFORD (R. D.), The development of a 100 kV 500 kA solid dielectric switch and associated triggering studies, CLM-M 41 Culham laboratory.
- [3] General electric, Triggered vacuum gap, ZR 7518.
- [4] FELICI (N.), MARCHAL (Y.), Nouvelles recherches sur la rigidité diélectrique des gaz comprimés, *Rev. Gen. Elect.*, 1948, p. 155.
- [5] BOUVIER (B.), FALLOU (B.), Caractéristiques diélectriques de l'hexafluorure de soufre et des mélanges d'azote et d'hexafluorure de soufre, *Rev. Gen. Elect.*, 1966, p. 175.
- [6] WATTEAU (J. P.), Procédé de réduction des discontinuités diélectriques au contact de deux isolants solides et dispositifs en comportant application, Brevet : BF-1.393.559, 14 février 1964.
- [7] DELMAS (M.), WATTEAU (J. P.), Éclateur, notamment pour la décharge de condensateurs, Brevet n° PV-62.446, 21 mai 1966.
- [8] BOULLOUD (A.), Sur la décharge entre une pointe positive et un plan dans l'air et l'anhydride carbonique comprimés, *Rev. Gen. Elect.*, juin 1955, p. 283.
- [9] ABDULLAH (M.), KUFFEL (E.), Development of spark discharge in non uniform fields gaps under impulse voltages, *Proc. IEE*, 1965, **112**, n° 5.
- [10] WORKS (C. N.), DAKIN (T. W.), Dielectric breakdown of sulfur hexafluoride in non uniform fields, *AIEE transactions*, 1953, **72**, 682-689.