ÉLECTRICITÉ

La Fabrication de l'Appareillage à très haute tension

Par C. CHAREYRON, Ingénieur-Conseil.

Dans cette note, nous nous proposons de signaler très succinctement les problèmes qui se posent aux constructeurs d'appareillage à très haute tension, et, comme exemple de quelques solutions actuelles, d'indiquer aux lecteurs celles qu'ont adoptées les Ateliers de Constructions Electriques de Delle.

Au cours d'une visite faite aux usines de cette Société à Villeurbanne par les Elèves de l' E. C. I., l'auteur, qui les accompagnait, a reçu des ingénieurs de cette firme de nombreux renseignements. Il croit d'autant plus intéressant de les présenter aux lecteurs que les constructeurs d'appareillage ne sont pas entièrement d'accord sur différents points que l'expérience n'a pas encore mis suffisamment en lumière.

L'utilisation des très hautes tensions est de date toute récente. En 1914, on citait en Europe et en Amérique quelques installations à des tensions de 80.000 et 100.000 volts, mais il s'agissait là d'installations isolées et personne ne soupçonnait le développement qu'allaient prendre les réseaux à très haute tension.

La raison de ce développement réside dans l'accroissement constant de la consommation qui a obligé les secteurs à se grouper et à aller chercher au loin dans les rivières ou dans les mines, les quantités nouvelles d'énergie que réclamaient les centres industriels.

Ce sont les Américains qui, les premiers, à la faveur de la prospérité sans précédent provoquée dans leur pays par les commandes des Etats belligérants, ont conçu et réalisé l'emploi des très hautes tensions. L'industrie française de la construction électrique absorbée par les besoins de la défense nationale se rendait compte des progrès considérables faits en Amérique dans la technique des transports de force à grande distance, mais ne pouvait songer, pendant la guerre, à aborder les problèmes dont cette évolution lui prescrivait l'étude.

La tâche qui s'imposait à elle, dès l'armistice, était écrasante.

Tout en réadaptant ses usines à leur fabrication normale elle devait s'organiser pour mettre au point des fabrications entièrement nouvelles et lutter contre la concurrence étrangère qui, à la faveur des événements de la guerre, avait pris une place prépondérante sur le marché.

Il était en effet inadmissible qu'une branche aussi essentielle que celle de l'industrie française de la construction électrique assiste impuissante à l'envahissement du marché national par des produits étrangers, à une heure où on s'appropriait à étendre considérablement le domaine de l'électricité par l'électrification des chemins de fer et la création des grands réseaux de jonction.

Il est agréable de constater que l'industrie électrique française

n'a pas failli à sa tâche et que moins de quatre ans après la clôture des hostilités elle était à même non seulement de répondre aux besoins du marché national, mais de prétendre à une place importante sur les marchés étrangers.

La fabrication de l'appareillage à très haute tension peut se ramener à la solution des trois conditions suivantes, que nous examinerons successivement :

1° Disposer des isolants nécessaires ;

2° Disposer de l'outillage mécanique et des engins de manutention adaptés à ces fabrications toutes spéciales ;

3° Disposer des instruments d'essais et de contrôle suffisants.

Nous passons volontairement sous silence une condition première qui est celle d'avoir un personnel technique suffisant ; les résultats obtenus dès avant guerre par les grandes sociétés françaises d'appareillage

suffiraient à démontrer que sur ce point l'industrie française n'avait rien à envier aux industries similaires étrangères.

ISOLANTS.

Au premier rang des isolants employés dans la construction des appareils à très haute tension se place naturellement la porcelaine. L'industrie française de l'électro-céramique avait tous les éléments pour résoudre les difficiles problèmes que posait la fabrication des isolateurs destinés aux transports à haute tension : longue expérience, matières premières de choix, main-d'œuvre de premier ordre. Il ne lui manquait pour se mettre en tête de cette industrie qu'un peu de confiance en elle-même. Il semble que sur ce point, la guerre ait eu une influence bienfaisante : ayant osé, elle a réussi. Après quelques tâtonnements inévitables il est incontestable que l'industrie française de l'électro-céramique est, à l'heure actuelle, à même de

Fig. 1. — Intérieur d'une porcelainerie.

livrer mieux que quiconque les porcelaines qu'exigent les transports à très haute tension.

Les personnes qui ont été à même d'assister à des essais comparatifs faits sur des porcelaines de fabrication française et étrangère, ne peuvent qu'être stupéfaites de constater qu'à l'heure actuelle l'importation des porcelaines électro-techniques de fabrication étrangère se chiffre encore par milliers de tonnes. Il y a là une situation réellement paradoxale qui, espérons-le, n'est que passagère.

Fig. 2. — Laboratoire d'essais à 500.000 volts (Ateliers de Constructions électriques de Delle).

INSTALLATIONS D'ESSAIS ET DE TRAITEMENT DES HUILES.

Avec l'augmentation des tensions d'exploitation la qualité des huiles employées dans les transformateurs et disjoncteurs a pris une importance de premier plan.

L'envahissement du marché à la fin de la guerre par des huiles de mauvaise qualité rendait un contrôle et un traitement des huiles particulièrement nécessaires comme l'ont démontré les nombreux accidents de transformateurs qui se sont produits ces dernières années dans les régions libérées. Ce contrôle, en dehors des caractéristiques électriques, doit porter particulièrement sur les dépôts, l'acidité, la viscosité et le point de congélation aux basses températures.

Pour les disjoncteurs à très hautes tensions qui généralement doivent être installés en plein air, la question du point de congélation aux basses températures a une importance toute particulière. Dans les installations réalisées dans les contrées à hiver rigoureux comme celles de l'est de la France, on est obligé de prévoir le réchauffage artificiel de l'huile des disjoncteurs.

La préparation rationnelle de l'huile destinée aux appareils à très haute tension nécessite donc une installation complète de séchage et filtrage des huiles ; sans parler des systèmes de manu-

tention en rapport avec les quantités considérables d'huile que comportent les appareils.

A titre d'indication, voici les caractéristiques auxquelles se sont arrêtés les Ateliers de Delle, à la suite d'essais effectués dans leurs laboratoires :

Densité : Inférieure à 0,9.

Viscosité : à 20° inférieure à 6 (Engler)

Congélation : Température de congélation inférieure à — 20°.

Fig. 3. — Essai sous pluie artificielle.

Inflammabilité : point d'inflammabilité supérieur à 170°.

Combustibilité : point de combustibilité supérieur à 200°.

Volatilité : après 5 heures de chauffage à 100°, perte en poids inférieure à 2 %.

Dépôts : après 10 heures de chauffage à 200° en présence d'une lame de cuivre, aucun dépôt.

Corps étrangers : l'huile doit être déshydratée, exempte d'alcali, de soufre, de résine, etc... ; teneur en acides minéraux inférieure à 0,01 %.

Rigidité diélectrique : 40.000 V. entre sphère de 12,5 m/m de diamètre dans les conditions du cahier des charges de l'Union des Syndicats.

ATELIERS DE FABRICATION.

Un disjoncteur tripolaire à 150.000 V. pèse, en ordre de marche, 25 tonnes et a une hauteur de 4 m. 50. Vouloir fabriquer de tels appareils dans une usine courante d'appareillage à haute tension serait aussi ridicule que de confier à une fabrique de petits moteurs, l'exécution d'alternateurs de grande puissance. Nous ne croyons donc pas utile d'insister sur la nécessité, pour un

atelier de construction d'appareillage à très haute tension, d'avoir un matériel de manutention et d'usinage de puissance et de dimensions appropriées.

ESSAIS ET CONTROLE.

On ne conçoit pas une fabrication rationnelle sans les moyens suffisants d'essais et de contrôle. Les Ateliers de Constructions Electriques de Delle possèdent à Villeurbanne un laboratoire

Fig. 4. — Amorçage sous pluie sur une traversée de disjoncteur.

d'essais à 500.000 v. et se sont d'autre part assuré par contrat la disposition du Laboratoire Ampère à 1.000.000 de volts dont la Compagnie Générale d'Electro-Céramique a récemment terminé l'installation à Ivry.

Pour les essais des appareils destinés à être installés à l'extérieur, divers agencements ingénieux ont été réalisés à Villeurbanne. La photographie N° 3 ci-contre montre la herse d'essais permettant de déterminer les tensions d'amorçage, sous pluie d'inclinaison et d'intensité variables.

* * *

Nous allons maintenant examiner succinctement les conditions d'emploi de l'appareillage à très haute tension.

Depuis quelques années, la méthode s'est généralisée de placer en plein air les installations à très haute tension, y compris les transformateurs de puissance. Cette tendance s'était d'abord manifestée aux Etats-Unis, et tout le monde sait le développement qu'ont pris, dans ce pays, les installations « out-door ». On fait valoir, en faveur de ce mode d'installation, les avantages suivants :

Suppression de bâtiments extrêmement onéreux ;

Grandes facilités d'extension et de remaniements ;
Simplification générale de l'installation.

L'Europe a suivi l'Amérique dans cette voie avec toutefois certaines réserves concernant la sécurité de l'exploitation. En Italie, notamment, on semble donner la préférence aux installations semi-extérieures dans lesquelles les organes essentiels, transformateurs, disjoncteurs, sont abrités contre les intempéries. Les partisans irréductibles des installations intérieures paraissent

Fig. 5. — Disjoncteur à 150.000 volts hors de sa cuve.

avoir regagné quelque peu de terrain ces temps derniers, même en Amérique. Quoi qu'il en soit, et jusqu'à nouvel ordre, les fabricants d'appareillage à très haute tension doivent s'imposer de construire des appareils susceptibles de fonctionner en plein air. Ces conditions d'emploi ont obligé les constructeurs à donner toute leur attention à la solution de problèmes en partie nouveaux pour eux, parmi lesquels nous citerons :

1° *L'étanchéité des appareils comportant des bacs à huile, en particulier des disjoncteurs.* — Le système du conservateur d'huile généralement utilisé pour les transformateurs n'est pas applicable aux disjoncteurs en raison de la nécessité de laisser aux gaz produits par la coupure un volume d'expansion en communication avec l'extérieur. La solution de la question d'étanchéité présente de ce fait d'importantes difficultés.

2° *La protection contre la rouille.* — Elle est obtenue aux Ateliers de Delle par l'emploi de la métallisation au zinc des pièces de fonte par le procédé Schoop. Cette méthode, quoique d'une application assez délicate, donne de bons résultats.

3° *L'isolement superficiel des traversées et des isolateurs supports dans les conditions atmosphériques les plus défavorables.* — Il n'existe encore aucune prescription officielle au sujet des tensions d'essai sous pluie qu'il convient d'admettre pour ce genre

de matériel. Les essais faits sous pluie artificielle aux Ateliers de constructions électriques de Delle ont montré que pour des traversées et supports judicieusement conçus la tension d'amorçage, sous pluie de 5 m/m par minute à 45°, peut être maintenue à 75 % environ de la tension d'amorçage à sec.

DISJONCTEURS DANS L'HUILE.

Traversées — Les traversées sont incontestablement un des

Fig. 6. — Usinage d'un capot de gros disjoncteur.

organes les plus délicats des disjoncteurs à très haute tension. Il n'est donc pas inutile de préciser les conditions auxquelles ces organes devraient satisfaire :

1° La tension d'essai à sec appliquée entre la tige de traversée et le collier, ce dernier étant à la terre, ne doit en aucun cas être inférieure à deux fois la tension composée plus 10.000 volts ;

2° La tension d'amorçage sous pluie de 5 m/m par minute à 45° ne doit pas être inférieure à 70 % de la tension d'amorçage à sec ;

3° La tension de claquage radial doit être dans tous les cas supérieure à la tension d'amorçage superficiel à sec ;

4° La traversée doit être construite de telle façon qu'elle puisse résister à l'influence des agents atmosphériques et notamment aux effets de dilatation et de contraction des températures extrêmes ;

5° La traversée doit être constituée de telle façon qu'à la tension normale de service (tension composée avec un pôle à la terre) en aucun point au voisinage ou à l'intérieur de la borne la tension d'ionisation ne soit atteinte.

Les traversées actuellement utilisées pour ces disjoncteurs à très haute tension sont de trois types :

Les traversées à isolant fluide. — Dans ces traversées les porcelaines ne jouent que le rôle d'isolant superficiel et l'isolement entre la tige de passage et le collier de la traversée est constitué par une masse de composition spéciale restant fluide aux plus basses températures.

Un réservoir d'expansion est ménagé à la partie supérieure de la traversée.

Fig. 7. — Durée de l'arc, travail de rupture et volume de gaz lors d'un déclenchement à 500 ampères, 1.400 volts, soit 700 kVA de puissance inductive monophasée.

Bien que ces traversées soient d'une fabrication assez délicate, du fait de l'étanchéité à réaliser, les A. C. E. D. en ont généralisé l'emploi dans leur construction d'appareils à très haute tension.

Les bornes condensateurs. — Ces bornes sont constituées par du papier bakélisé ou par tout autre isolant solide dans lequel des écrans assurent une répartition égale de la tension. La traversée est protégée contre les intempéries par une pièce en porcelaine qui recouvre entièrement sa partie supérieure. Ce système présente l'avantage de réduire les dimensions des traversées. Par contre, comme dans toutes les constructions où l'utilisation du matériel est poussée à la dernière limite, la plus petite rupture d'équilibre en un point quelconque amène une destruction complète de l'édifice.

Les traversées en porcelaine. — Ces traversées sont constituées par un certain nombre de tubes en porcelaine concentriques, les interstices étant remplis d'un corps approprié.

Le seul avantage de ces traversées est leur prix relativement modique, car, aussi bien du point de vue électrique que du point de vue mécanique, cette construction n'est guère soutenable. Ce genre de traversée semble, de ce fait, appelé à disparaître, du moins pour les très hautes tensions.

CONTACTS DE RUPTURE.

Tous les disjoncteurs à très haute tension construits par les Ateliers de Delle comportent des ruptures multiples en série (en général 6 sur chaque phase).

Ils se différencient très nettement sur ce point des appareils de construction américaine qui généralement ne comportent que deux ruptures par pôle. La rupture en charge d'un circuit par un interrupteur dans l'huile a fait l'objet ces dernières

Fig. 8. — Rupture double avec chambre d'explosion.

MODE D'ENTRAÎNEMENT DES CONTACTS MOBILES.

Comme pour les disjoncteurs à moyenne tension, deux systèmes se trouvent en présence :

1° Le système à genouillères généralement utilisé en Amérique et dans lequel les contacts mobiles sont commandés par une tige verticale isolante, couissant dans le carter de l'interrupteur. Les masses en mouvement sont réduites au minimum, le volume d'huile est bien utilisé.

Par contre, on peut faire à ce système les reproches suivants : L'ensemble est peu mécanique.

La tige, généralement en bois, qui actionne les contacts et qui n'est guidée que sur une faible longueur, à une de ses extrémités, court le risque de se briser. L'ajustage des contacts est incertain en raison de ce défaut de guidage. La construction ne se prête pas à l'adoption de contacts multiples.

2° Le système de commande par axe horizontal et bielles entraînant un équipage mobile couissant sur des tiges de guidages.

On peut reprocher à ce système le poids des masses mobiles et l'augmentation du volume d'huile qu'il entraîne. Il présente par contre des avantages au point de vue mécanique.

Fig. 9. — Pôle de sectionneur à 150.000 volts.

années de tant de communications souvent divergentes et quel quefois fantaisistes qu'il paraîtra peut-être utile de rappeler quelques points essentiels du phénomène.

Résumons d'abord le mécanisme de la rupture dans l'huile.

Dans les premiers instants, il se produit, aux contacts, des arcs qui persistent jusqu'à ce que l'écartement soit suffisant pour que l'arc ne puisse plus se réamorcer. Ces arcs provoquent la volatilisation et la décomposition d'une certaine quantité d'huile, c'est-à-dire la formation au voisinage des contacts, de poches gazeuses portées à haute température. Les accidents les plus fréquents proviennent de ces poches gazeuses, soit qu'elles viennent en contact avec les parois de la cuve et qu'elles provoquent ainsi une mise à la terre et un court circuit, soit que les gaz arrivent insuffisamment refroidis à la partie supérieure de l'interrupteur et détonent au contact de l'air.

On aperçoit immédiatement que le problème essentiel à résoudre est de réduire au minimum la formation de gaz à l'intérieur de l'interrupteur, c'est-à-dire de réduire au minimum le travail transformé en chaleur dans l'interrupteur au moment de la rupture. Les dimensions de l'interrupteur doivent être d'autre part, telles que ces gaz ne puissent en aucun cas provoquer un amorçage à la masse ou une explosion à la partie supérieure de l'interrupteur.

Considérons ces deux points comme acquis et examinons d'abord le premier. Deux facteurs sont à considérer : la loi d'écartement des contacts en fonction du temps, et la pression du milieu. Nous ne considérerons *que la vitesse moyenne* d'ouverture des contacts, et nous admettrons que l'augmentation de cette vitesse moyenne diminue le travail de rupture, ce qui semble d'ailleurs certain pour les vitesses actuellement réalisées.

Le problème est donc d'obtenir une vitesse moyenne d'ouverture du circuit aussi grande que possible.

Pour cela, une première Ecole prévoit une *Rupture multiple*. Pour une même vitesse de l'équipage mobile, il est bien évident que la vitesse d'ouverture du circuit est d'autant plus grande qu'il y a davantage de coupures en série, et, toutes choses égales d'ailleurs, il ne sera de même de la vitesse moyenne; sans doute avec une coupure multiple, la vitesse moyenne de l'équipage mobile est sensiblement réduite, et la course n'est pas diminuée en proportion du nombre de ruptures. Néanmoins, le but semble atteint, et d'ailleurs l'efficacité de ce dispositif a été confirmée par des essais dont les résultats sont résumés sur les graphiques de la figure 7.

Quoi qu'il en soit, certains constructeurs américains et français, opposent au système de rupture multiple des interrupteurs à rupture double, dont les contacts sont munis de chambres d'explosion. A la multiplicité des ruptures ils substituent l'influence de la pression sur le potentiel explosif, donc sur la vitesse d'extinction de l'arc. Dans ces appareils la rupture se produit à l'intérieur d'un pot en acier garni intérieurement de matière isolante (fig. 9). L'expansion des gaz produits ne pouvant se faire librement, la pression monte très rapidement à une haute valeur, et on compte sur cette pression pour assurer une extinction rapide de l'arc.

Mais l'utilité des fortes pressions est contestée, et des expériences faites en Suisse auraient même prouvé qu'elles peuvent, dans certaines conditions, aller à l'encontre du but visé.

Enfin pour en terminer avec la rupture, signalons encore l'argument qui nous a été donné en faveur de la rupture multiple de la répartition du travail de rupture sur un grand nombre de points.

DÉCLENCHEMENT AUTOMATIQUE.

COMMANDE ÉLECTRIQUE A DISTANCE.

Pour le déclenchement automatique des disjoncteurs à grande puissance on ne peut songer, dans la plupart des cas, à utiliser des transformateurs d'intensité indépendants dont le prix grèverait trop lourdement l'installation. On utilise généralement le transformateur de borne qui est constitué par un transformateur tore placé sur une des bornes de l'interrupteur. Ces transformateurs ne

permettent guère toutefois un réglage au-dessous de 50 ampères primaires; pour les réglages à plus faible intensité les Ateliers de Delle construisent un système de relais direct dont le mécanisme est à l'abri des intempéries et qui permet un réglage de l'intensité et du temps de déclenchement sous tension.

Parmi les commandes électriques à distance pour disjoncteurs à très haute tension, signalons celles du type à solénoïde. La puissance instantanée absorbée à la fermeture d'un disjoncteur à 150.000 volts ne dépasse pas 15 kws. Toutes ces commandes sont généralement munies d'un

Fig. 10. — Ligne d'Etat Landres-Laneuveville à 120.000 V.
Coupure de Vaudières (M^e M)

dispositif de réenclenchement empêché.

SECTIONNEURS.

Pour la construction des sectionneurs comme aussi pour la fixation des barres collectrices et des connexions dans les postes, on a besoin d'isolateurs supports rigides. Il ne peut être question d'utiliser dans ce but des isolateurs à cloches du modèle employé pour les tensions moyennes, la fabrication de ce genre d'isolateur devenant pratiquement irréalisable pour les tensions supérieures à 70.000 volts. On a donc été obligé d'adopter des colonnes constituées par l'accouplement d'un certain nombre d'éléments en porcelaine.

Au début de la fabrication des appareils à très haute tension on a beaucoup utilisé dans ce but des éléments identiques à ceux dont sont constituées les chaînes d'amarrage des lignes. Ces éléments étaient reliés les uns aux autres rigidement par des pièces métalliques appropriées. A l'usage, on a constaté que les colonnes ainsi constituées étaient d'un montage assez délicat et, fait plus grave, ne présentaient qu'une résistance tout à fait insuffisante aux efforts de flexion.

On donne donc aujourd'hui la préférence à des colonnes constituées par deux ou trois éléments comportant chacun trois ou quatre cloches.

Nous reproduisons ci-dessous, à titre documentaire, les résultats d'essais comparatifs effectués par les Ateliers de Delle sur des colonnes à 150.000 volts de différents modèles.

	Colonne N° 1	Colonne N° 2	Colonne N° 3	Colonne N° 4
I. — Essais électriques.				
Tension d'apparition des effluves Volts	211.000	131.000	113.000	136.000
Tension d'amorçage à sec Volts	455.000	390.000	450.000	348.000
Tension d'amorçage sous pluie verticale de 10 $\frac{m}{m}$ par minute Volts	264.000	254.000	360.000	218.000
II. — Essais mécaniques.				
Torsion, couple de rupture Kgm	410	312	121	165
Flexion, couple de rupture Kgm	665	640	75	469

Les colonnes nos 1 et 2 étaient des colonnes constituées par trois éléments à trois cloches de construction française

La colonne n° 3 était constituée par neuf éléments de chaîne accouplés rigidement.

La colonne n° 4 était constituée par deux éléments à quatre cloches de construction américaine.

Au sujet des modèles de sectionneurs généralement utilisés dans les postes à très haute tension on peut dire ce qui suit : le sectionneur unipolaire à commande par perche n'est plus guère utilisé ; on le comprendra aisément si on se rend compte de la difficulté qu'il y a à manœuvrer à la perche des sectionneurs placés très fréquemment à plus de 10 mètres au-dessus du sol.

On utilise de façon presque générale aujourd'hui dans les installations à très haute tension des sectionneurs multipolaires commandés à la main du bas des pylones. Ces appareils de différents modèles se ramènent à deux types principaux : le type à fermeture dans le plan vertical et le sectionneur rotatif à fermeture dans le plan horizontal. La valeur de ces constructions doit être jugée, semble-t-il, non pas tant sur les

avantages plus ou moins théoriques de leur construction, mais bien plutôt sur le degré de contrainte imposé aux isolateurs au moment de la manœuvre des appareils.

Il ne faut pas perdre de vue, en effet, que ces isolateurs sont constitués, comme nous venons de le voir, par des éléments en porcelaine assemblés par des scellements. Quoique la résistance mécanique de ces colonnes soit importante, comme le montre le résultat des essais consignés plus haut, il n'en reste pas moins qu'une sollicitation fréquente à la torsion et à la flexion de pièces en porcelaine et de scellements est une chose peu désirable.

A ce point de vue les sectionneurs à fermeture dans le plan vertical sont dans un état d'infériorité.

De même dans les sectionneurs à une seule colonne centrale rotative, celle-ci est soumise à un effort de torsion, et il semble préférable de constituer l'équipage mobile par deux colonnes jumelées, ce qui supprime cet effort.

Fig. 11. — Un atelier de montage d'appareillage à très haute tension.

Un sujet de préoccupation pour les exploitants de stations en plein air est la manœuvre des sectionneurs par temps de gros verglas. Il existe, dans cet ordre d'idée une quantité de dispositifs ingénieux qui malheureusement ont presque tous l'inconvénient d'imposer une fatigue supplémentaire aux isolateurs.

Pour terminer, nous mentionnerons que si l'industrie française du gros appareillage a fait audacieusement confiance à l'avenir en s'équipant largement à une époque où l'emploi des très hautes tensions n'en était qu'à

ses débuts en France, elle en a été récompensée au-delà même de ses espérances.

Nous en prenons à témoin l'activité qui règne à l'usine de Villeurbanne des Ateliers de Delle, dont les livraisons et commandes portent sur plusieurs centaines d'appareils à très haute tension. Nous tenons en terminant à remercier cette société de l'accueil qu'elle nous a réservé ainsi que des renseignements communiqués.