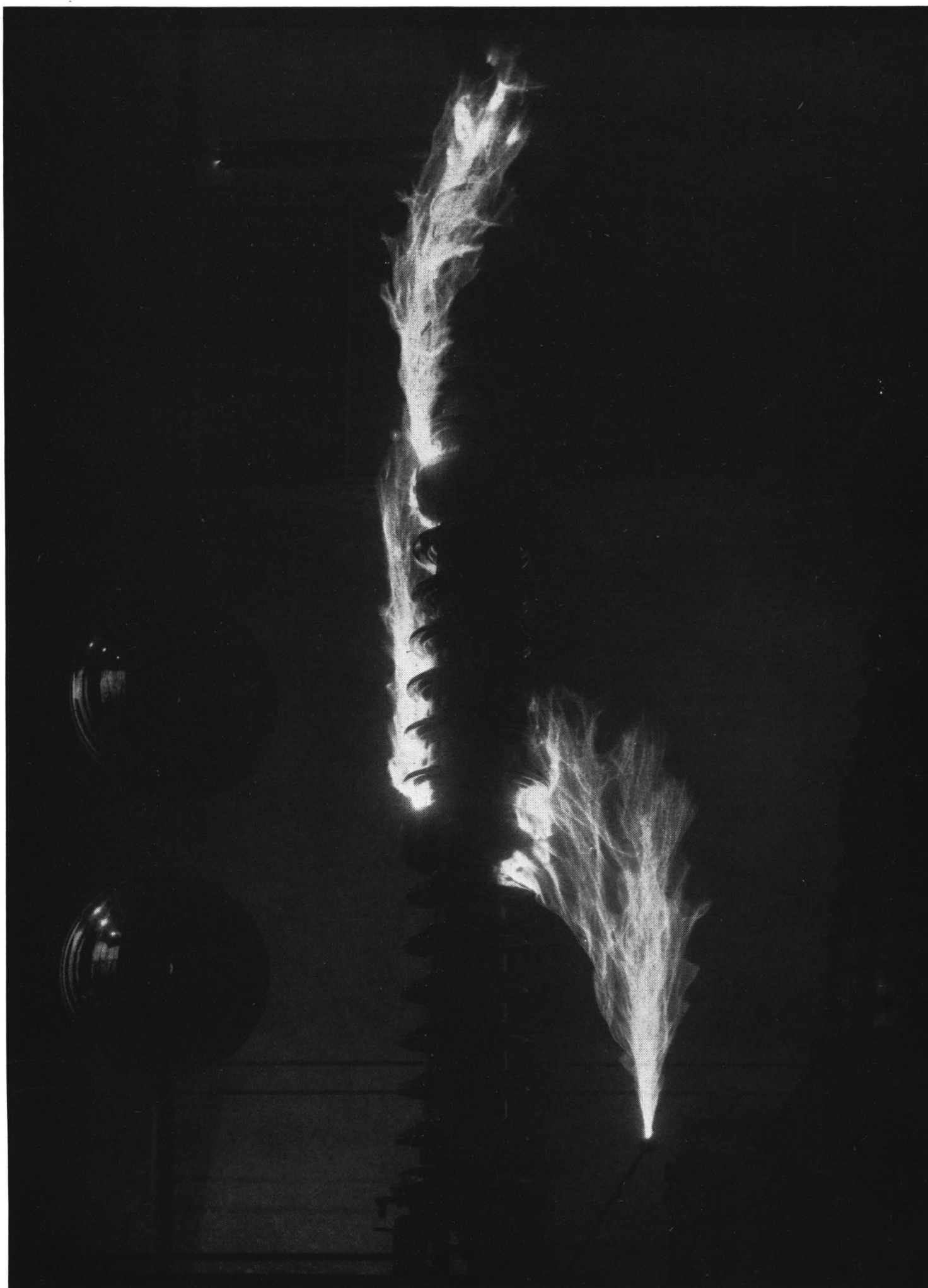

REVUE BROWN BOVERI



Technique des Hautes Tensions

Quelques-uns de nos travaux

Pour l'inauguration de notre nouveau laboratoire à haute tension

SOMMAIRE :

	Pages
Introduction	211
Le nouveau laboratoire d'essais à haute tension Brown Boveri	212
Les installations du nouveau laboratoire	218
L'oscillographe de précision à haute tension avec quatre rayons cathodiques	222
Le problème de l'isolement dans la construction des machines et des transformateurs modernes	224
Le papier, isolant pour les hautes tensions	235
Contribution à l'étude des pertes diélectriques des huiles et autres isolants liquides	240
L'emploi du gaz comprimé comme isolant	244
Le comportement des isolants en matière céramique aux hautes températures	248
L'influence des conditions météorologiques sur les pertes par effet couronne dans les lignes aériennes à haute tension .	250
La tension de contournement des isolateurs composés, avec brides métalliques intermédiaires	255
De la coordination de l'isolement et du degré de sécurité des installations, pour différentes valeurs de la graduation . .	259
La coordination de l'isolement des disjoncteurs pneumatiques ultra-rapides et des sectionneurs	267
Des perfectionnements les plus récents apportés aux parafoudres	272
Recherches récentes sur les contraintes de choc des transformateurs de puissance et de tension	275
L'effet des ondes mobiles sur les enroulements de machines rotatives	279
Coordination rationnelle de l'isolement des installations comportant des machines tournantes	286
 Bref mais intéressant :	
Résultats des essais par l'ASE du nouveau dispositif Brown Boveri de mesure de la tension de transformateurs de puissance	290
De la légèreté dans la construction des transformateurs de grande puissance	290

Illustration de la couverture :

Arc sur un sectionneur de 400 kV à la fréquence de service.

REVUE BROWN BOVERI

PUBLIÉE PAR LA SOCIÉTÉ ANONYME BROWN, BOVERI & C^{IE}, A BADEN (SUISSE)

XXX^{me} ANNÉE

SEPTEMBRE/OCTOBRE 1943

Nos 9/10

La Revue Brown Boveri paraît mensuellement. La reproduction d'articles ou d'illustrations est permise, à condition de citer leur provenance.
Prix de l'abonnement annuel pour la Suisse Fr. 10.—, prix du fascicule pour la Suisse Fr. 1.—, port et emballage non compris.

INTRODUCTION.

Indice décimal 621.3.027.3

Brown Boveri a le plaisir d'inaugurer un nouveau laboratoire à haute tension. Heureusement que la valeur des résultats des recherches ne dépend pas seulement de la grandeur et de la beauté des laboratoires et nous espérons que ce numéro spécial prouvera aux lecteurs que, même dans les conditions un peu primitives régnant avant la construction du nouveau laboratoire, des recherches de valeur ont été menées à bien. Mais malgré tout, le manque de place limite les possibilités. Si des recherches de principe peuvent être faites, une certaine tension ne peut pas être dépassée et une extrapolation trop poussée rend les résultats incertains.

Cette limite de tension qui, depuis quelques temps, nous gênait, a été brisée par la nouvelle construction. Le nouveau laboratoire n'est pas construit seulement pour les plus hautes tensions employées actuellement, 220 et 287 kV, mais aussi pour les tensions de 380 et 400 kV dont on parle depuis peu chez les spécialistes. Même si prochainement les tensions de service atteignent 500 kV, nous ne serons pas embarrassés.

L'augmentation de la place disponible pour les essais n'est pas moins importante que l'élévation de la tension. Jusqu'à maintenant, le travail dans le laboratoire à haute tension se faisait par équipe. Il fallait chaque fois remonter les dispositifs d'essai que l'équipe précédente avait dû

démonter pour faire ses essais, afin d'exécuter à temps les travaux les plus pressants. Malgré tous les efforts il a fallu renoncer à de nombreux essais intéressants et importants. Maintenant, nous disposerons d'un grand nombre de postes de mesure très bien équipés qui permettent un travail plus rationnel; nos ingénieurs de la plate-forme d'essai à haute tension auront le temps d'étudier les nombreux problèmes que, jusqu'à présent, nous avons dû laisser de côté.

La description du nouveau laboratoire et de ses installations remplirait facilement ce numéro spécial. Nous nous contenterons d'en mentionner le plus important en quelques pages. Ensuite, nous traiterons une douzaine de questions actuelles du domaine des hautes tensions. Les articles sur ces questions parlent pour la plupart de recherches faites dans nos anciens laboratoires avant la mise en service des nouvelles installations. Ils donnent un aperçu de tout ce domaine de travail bien que certains essais spéciaux et intéressants n'aient pas pu être mentionnés faute de place. Ces articles montrent quels rôles multiples joue la technique des hautes tensions dans l'électrotechnique appliquée et permettront mieux qu'une longue dissertation de se représenter l'importance et la valeur d'un laboratoire à haute tension moderne.

(MS 961)

Dr W. Wanger. (J. C.)

LE NOUVEAU LABORATOIRE D'ESSAIS A HAUTE TENSION BROWN BOVERI.

Indice décimal 621.317.2:621.3.027.3

Description sommaire de la disposition et de l'équipement du nouveau laboratoire d'essais à haute tension Brown Boveri. Ce laboratoire permet d'effectuer des essais de rigidité diélectrique avec des tensions alternatives jusqu'à 1,6 millions de volts (valeur efficace), des tensions de choc d'une amplitude atteignant 2,4 millions de volts et des tensions continues jusqu'à 1,2 millions de volts.

La figure 1 est une vue du nouveau laboratoire d'essais à haute tension, dominant l'entrée principale des usines Brown Boveri à Baden. Ainsi que le montre la figure 2, ce laboratoire se compose de la halle principale destinée aux essais à haute tension et d'une aile latérale en bordure de la Haselstrasse, dans laquelle sont logés les bureaux et un certain nombre de petits laboratoires. La situation du nouvel immeuble par rapport aux usines ressort clairement de la même figure.

En principe, le nouveau laboratoire est réservé aux travaux de recherches, à l'exclusion des essais normaux. Ce souci de séparation entre les deux domaines a joué un rôle décisif dans le choix de l'emplacement de l'immeuble. Cette exigence n'a cependant pas pu être satisfaite intégralement, car il a fallu tenir compte de la situation des usines existantes.

Parmi les hautes tensions, celles nécessaires aux essais des machines rotatives, des mutateurs, des chaudières électriques, etc. sont de valeur relativement modérée. Ces machines peuvent, par conséquent, être essayées dans des locaux aménagés sans grands frais dans les halles mêmes de montage; ces plates-formes sont com-



Fig. 1. — Vue d'ensemble du laboratoire à haute tension Brown Boveri.

A l'avant plan le grand bâtiment à haute tension avec les dispositifs pour produire 1,6 million de volts tension alternative et 2,4 millions de volts tension de choc; à gauche le bâtiment des petits laboratoires et des bureaux.

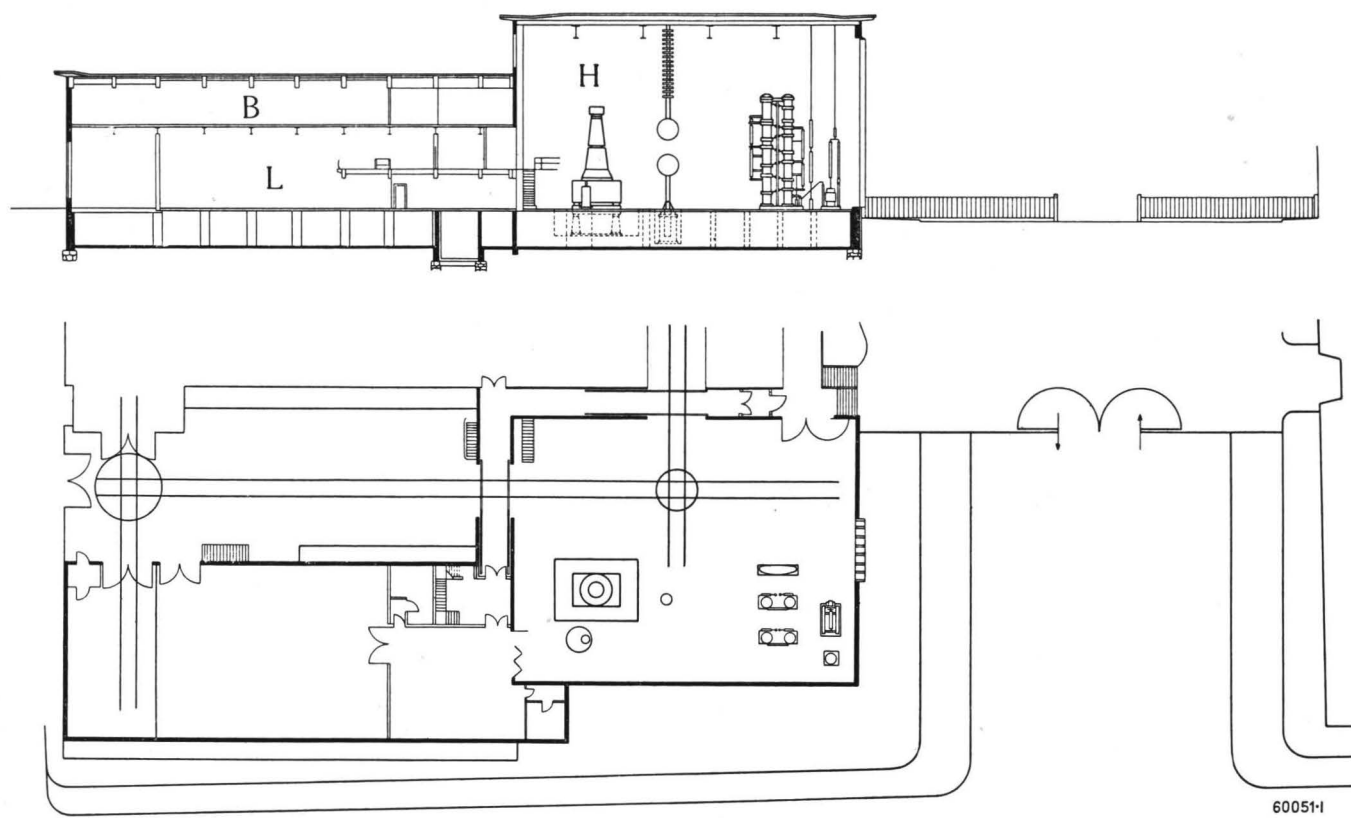


Fig. 2. — Plan et coupe du laboratoire à haute tension Brown Boveri.
B = Bureaux. H = Halle à haute tension. L = Laboratoires.

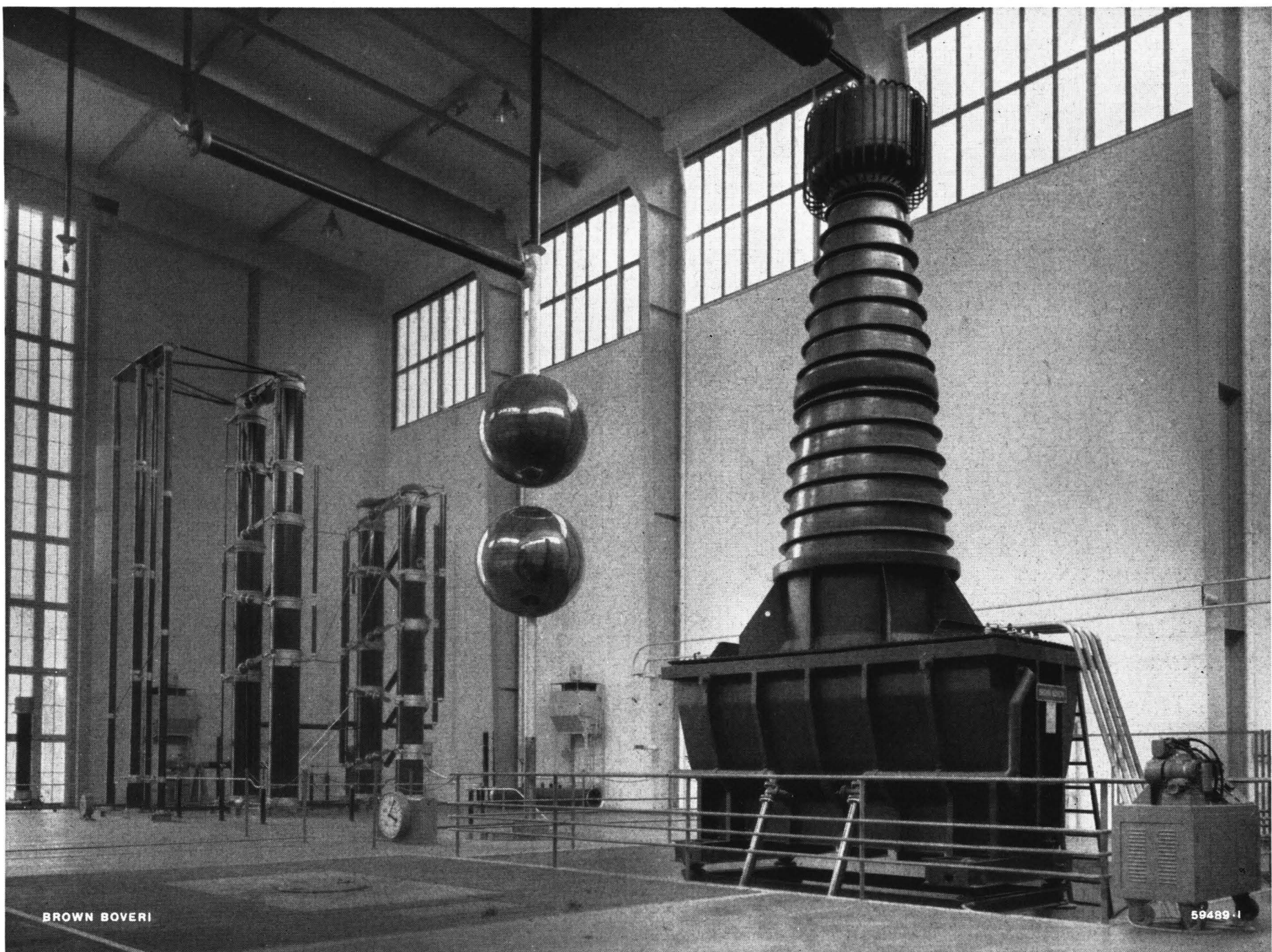


Fig. 3. — Coup d'œil dans la halle à haute tension avec le générateur de chocs, le transformateur d'essais et l'éclateur.
Le grand éclateur a des sphères de 175 cm de diamètre.

plètement indépendantes du laboratoire de recherches. Pour les essais normaux des transformateurs, on utilisera à l'avenir les transformateurs de l'ancien laboratoire d'essais à haute tension. Pour la fabrique d'appareillage électrique, on dispose, dans la halle de montage, d'un transformateur d'essai modifié, capable de fournir, après mise à la terre de la cuve et de l'enroulement à tension inférieure, une tension de 750 kV vis-à-vis de la terre. On dispose donc aux deux endroits de moyens amplement suffisants pour effectuer tous les essais de rigidité diélectrique à fréquence industrielle de l'appareillage 220 kV.

Il n'y a que pour certains essais spéciaux et pour l'appareillage 400 kV que l'on doit recourir aux installations du laboratoire de recherches. C'est là la principale raison pour laquelle on a adossé ce dernier à la halle de montage des transformateurs. Un passage d'environ 6×6 m les fait communiquer. Lorsque les installations de la plate-forme d'essais normaux ne suffisent plus, les transformateurs peuvent encore être essayés à l'endroit même où ils ont été montés et séchés, la tension requise pouvant leur être fournie par le nouveau laboratoire. L'existence de ce dernier ne gêne en rien l'extension éventuelle de la fabrique des transformateurs. Au contraire, la halle de montage correspondante ne pouvant être prolongée que du côté opposé au nouveau laboratoire, leur emplacement relatif

restera donc toujours correct. D'autre part, une autre halle de 16 m de large est prévue entre les usines existantes et le nouvel immeuble, avec lequel elle communiquera à son extrémité la plus favorable.

Le transport des appareils à haute tension au laboratoire, beaucoup plus aisé que dans le cas des grands transformateurs, ne se présente que très rarement grâce à l'équipement excellent de la plate-forme d'essais normaux. Les objets à essayer peuvent être amenés à pied d'œuvre par wagon ou camion. On peut aussi les installer en plein air et leur fournir la tension nécessaire. Deux portes coulissantes, dont la plus grande mesure environ 7×7 m, sont pratiquées à cet effet sur deux côtés du laboratoire. On peut même, si les circonstances l'exigent, relier électriquement le laboratoire à une halle éloignée, en tirant des câbles haute tension par ces ouvertures et au-dessus des toits des usines.

Le choix de la tension maximum à admettre a fait l'objet de soigneuses études. Tout laisse prévoir en effet que des tensions de service de 400 kV ne tarderont pas à se réaliser. Les transformateurs d'essais sont cependant construits pour une tension de 1600 kV par rapport à la terre, afin qu'ils suffisent même dans le cas où, dans un avenir plus ou moins rapproché, on adopte des tensions de service de 500 ou 600 kV. La tension-limite pour le générateur de choc est de



Fig. 4. — Emplacements d'essais, galeries d'observation et redresseur à haute tension dans la halle à haute tension.

On peut se rendre compte de la grandeur de la halle en la comparant au sectionneur de 400 kV, à l'arrière-plan, ou au redresseur de presque 10 m de long, suspendu au plafond.

2400 kV. Les transformateurs du laboratoire sont construits pour un courant permanent de 1 A, et le générateur de choc pour une énergie de 25 kW.

Les tensions choisies dépassent sensiblement la norme des laboratoires modernes construits pour des conditions semblables. Le nouveau laboratoire Brown Boveri est donc non seulement moderne, mais satisfera encore longtemps à toutes les exigences futures de la technique.

Le nouvel immeuble est assez vaste pour permettre, excepté dans le cas de très hautes tensions, l'exécution simultanée et indépendante d'essais à fréquence industrielle et d'essais sous tension de choc. C'est ainsi qu'avec ses 24×31 m de base et sa hauteur utile dépassant 15 m, le nouveau laboratoire constitue la station d'essais à haute tension la plus grande de Suisse. Elle ne le cède en rien aux plus importants laboratoires d'Europe.

Le laboratoire est divisé en deux sections réservées l'une aux essais à fréquence industrielle, l'autre aux épreuves avec ondes de choc. Les sources de tension — transformateurs et générateur de choc — sont disposées le long d'une des grandes parois. Devant, se trouve la plate-forme d'essais, placée immédiatement au-dessous d'une galerie d'observation disposée à 3,6 m de hauteur et s'étendant tout au long de la paroi adjacente à la halle des transformateurs. De cette galerie, où se trouvent les pupitres de commande, le chef des essais domine tout le local; la vue n'est gênée par aucun obstacle. A l'aide de petits pupitres de commande mobiles, il est aussi possible de se tenir dans la halle même et de régler la tension de cet endroit, dans le cas où l'on désire se rapprocher de l'objet pour une raison quelconque, par exemple pour les essais dans l'obscurité. Une autre galerie parcourt l'une des parois latérales du laboratoire et une troisième enfin, à 7,3 m de hauteur, la paroi adjacente à la halle des transformateurs.

Le grand laboratoire d'essais à haute tension ne possède aucun pont-roulant. Un tel engin aurait par trop compliqué la disposition des conducteurs et aurait été trop onéreux, eu égard à la grandeur de la halle. Les objets encombrants à essayer sont, pour cette raison, amenés dans la halle sur des wagons à plate-forme et y restent pendant toute la durée des essais.

Pour la manutention de faibles charges (par exemple immersion des objets dans les cuves à huile), on dispose de deux palans électriques roulants, d'une charge de 1 t, au plafond de la halle. Un autre palan de 5 t se trouve dans le passage entre le laboratoire et la fabrique de transformateurs. Toutes les manutentions nécessitant des engins de levage plus puissants sont par contre faites très aisément et de deux façons différentes, dans la halle même des transformateurs. Toutes les voies sont à écartement normal et peuvent supporter une charge de 60 t.

Les essais sous la pluie peuvent être effectués aussi bien à l'emplacement prévu pour les essais à fréquence de service qu'à celui réservé aux essais de choc. Les isolateurs de traversée, dont la partie inférieure est immergée dans le bassin d'huile, peuvent également être soumis à l'essai sous la pluie. La conductibilité de l'eau est réglable à la valeur désirée selon la méthode habituelle.

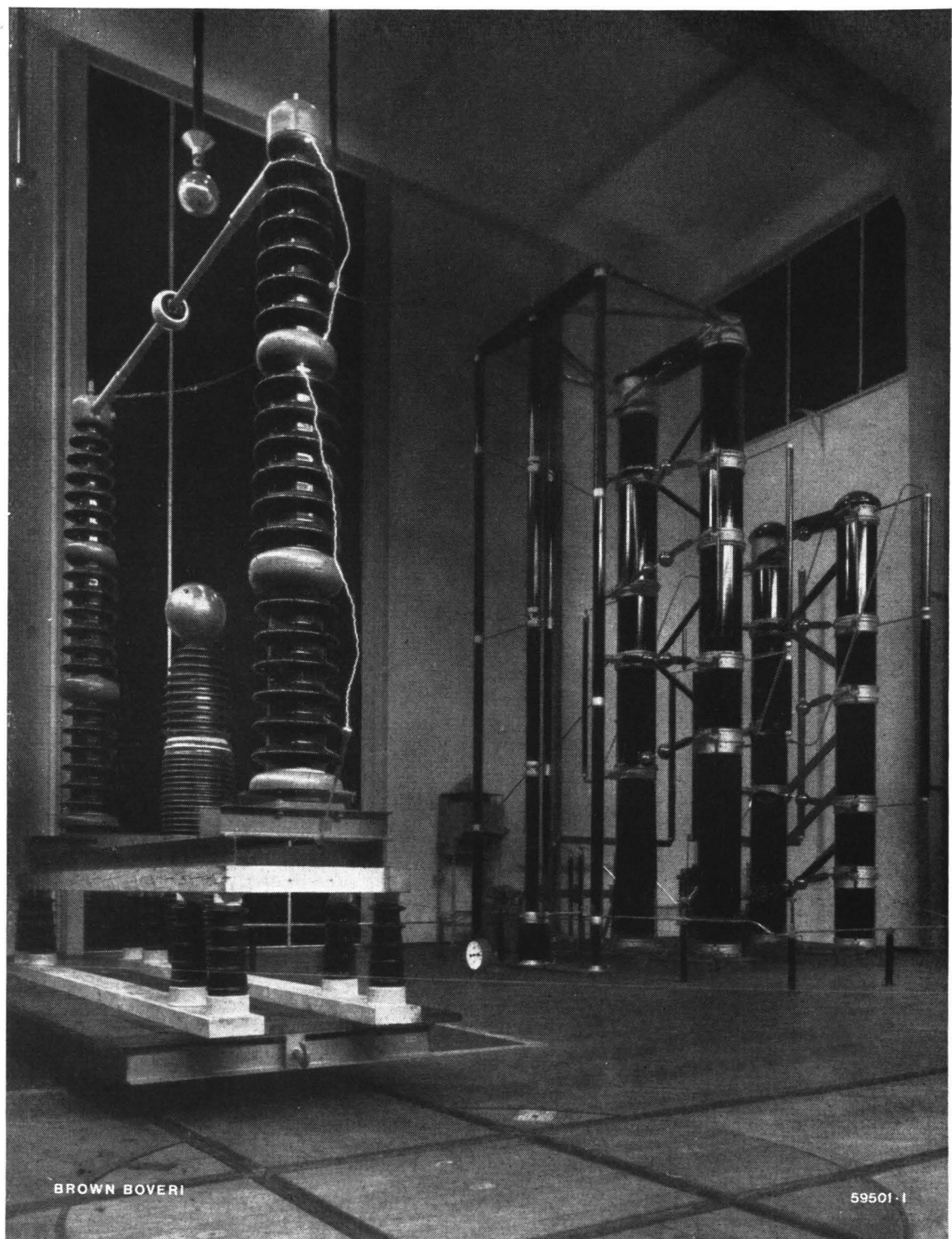


Fig. 5. — Arc de contournement sur un sectionneur de 400 kV. A l'arrière-plan le générateur de chocs.

Le laboratoire est très bien éclairé, des fenêtres étant ménagées sur les quatre côtés de la halle. Des persiennes commandées à distance, permettent un obscurcissement parfait, tandis que l'éclairage artificiel peut être réglé à n'importe quelle valeur à l'aide d'un régulateur à noyau plongeant.

La tension d'essai de 1600 kV est obtenue à l'aide de deux transformateurs couplés en cascade, car il eut été irrationnel de produire plus de 1200 kV par rapport à la terre dans *une seule* unité; en elle-même la réalisation d'une tension aussi élevée dans un seul transformateur constitue déjà un record. Pour toutes les tensions atteignant 1200 kV, un seul transformateur suffit, tandis que l'autre peut être utilisé séparément pour les essais nécessitant des tensions jusqu'à 400 kV. Ce n'est que pour les tensions supérieures à 1200 kV que le transformateur de 1200 kV, monté sur supports isolants, est couplé en cascade avec celui de 400 kV.

Etant donné le rôle toujours plus important que joue le courant continu à très haute tension dans la transmission d'énergie, le nouveau laboratoire est aussi outillé pour les essais à tension continue. L'équipement adopté constitue une solution élégante de ce problème: le transformateur d'essai alimente un redresseur à aiguilles multiples, à commande par capacités. Un condensateur, monté en parallèle avec l'objet à essayer, complète cet appareillage, capable de fournir des tensions continues jusqu'à 1200 kV.

Les deux oscillographes à rayons cathodiques sont installés au rez-de-chaussée dans un local de l'aile latérale attenant au laboratoire à haute tension. Une grande porte à soufflet permet de faire communiquer les deux locaux ou de les séparer complètement, selon que les oscillographes servent à des essais dans le grand laboratoire, ou à d'autres fins. La salle des oscillographes est aménagée à la façon d'une cage de Faraday; elle est reliée au laboratoire à haute tension par plusieurs câbles de mesure fixes, blindés et sans pertes. Ces conducteurs de mesure servent non seulement au branchement des oscillographes, mais encore à l'exécution de n'importe quelles autres mesures ayant trait à des essais dans le laboratoire à haute tension, mais qu'il y a lieu de faire dans un local blindé électrostatiquement, sans risque d'être dérangé. Le nouvel oscillographe à rayons cathodiques est du type à quatre rayons; un châssis avec roues à bandages de caoutchouc en fait un appareil mobile, que l'on peut installer à volonté soit à proximité d'un appareil en cours d'essai dans le laboratoire, soit dans un endroit quelconque des vastes usines.

L'aile latérale du bâtiment abrite encore, à part la salle des oscillographes, un autre laboratoire d'une superficie de quelque 500 m², réservé aux essais à haute tension jusqu'à 150 kV à fréquence industrielle et aux essais au choc jusqu'à 300 kV. Le générateur de choc est mobile et peut ainsi être installé à d'autres endroits. D'autre part, un générateur de choc pour



Fig. 6. — Un laboratoire dans le bâtiment latéral avec divers emplacements d'essais pour de plus faibles tensions.

très grandes intensités et faibles tensions complète l'équipement de cette salle.

Comme le laboratoire principal, ce deuxième laboratoire est outillé pour permettre d'exécuter simultanément un grand nombre d'essais à haute tension de valeur modérée. Cette possibilité de travail intensif en parallèle, est pour Brown Boveri absolument indispensable. C'est là une condition essentielle à l'exécution du vaste programme de travail relevant de tous les domaines de la technique des hautes tensions.

Le laboratoire mentionné peut être utilisé non seulement pour les essais à haute tension, mais encore pour des essais de mise au point d'un genre quelconque, sur des transformateurs de faible et de moyenne puissance, des machines, etc. De chaque poste de mesure, l'opérateur peut commander n'importe laquelle des génératrices du nouveau laboratoire ainsi que chaque machine de la plateforme d'essais normaux pour transformateurs et du local d'essais de la fabrique de machines. On dispose donc d'un parc de machines complet. Il suffit d'effectuer les couplages nécessaires aux sélecteurs de lignes à haute tension et d'excitation pour que la machine désirée puisse être commandée à distance du poste de mesure (enclenchement et déclenchement de la machine et de son excitation, réglage de cette dernière). Les mêmes manipulations et organes de réglage servent pour n'importe quelle génératrice.

Dans le grand laboratoire à haute tension, la cuve à huile, ainsi que d'autres dispositifs, sont encastrés dans le sol, afin d'utiliser judicieusement la hauteur du laboratoire. Dans les laboratoires de l'aile latérale, par contre, les principales installations permanentes sont logées au sous-sol, afin de gagner le maximum de place pour les essais. On y trouve entre autres tous les groupes convertisseurs, les sélecteurs de lignes, les châssis d'appareillage, les installations de couplage,

trois transformateurs d'essais, un générateur de choc ainsi qu'un condensateur isolé au gaz comprimé.

Mentionnons également, au sous-sol, un local parfaitement isolé électriquement et acoustiquement, pouvant en outre être obscurci. C'est là que sont exécutées les mesures à haute tension dans lesquelles il est nécessaire de déceler, à l'œil, à l'oreille et à l'aide du récepteur à haute fréquence, les plus infimes phénomènes d'effluves. Le degré d'humidité du local peut être réglé à volonté; cette installation convient donc parfaitement aux recherches ayant trait à l'influence de l'humidité sur la tension de contournement des isolateurs.

Le sous-sol comprend encore des dépôts à l'usage du local d'essais, ainsi qu'un certain nombre d'autres salles, indépendantes des laboratoires.

Au premier étage de l'aile latérale sont aménagés les vastes bureaux du local d'essais, ainsi qu'un laboratoire fort bien outillé, servant aux recherches dans le domaine de la télécommande. En plus des établis installés à divers endroits des locaux d'essais, le nouveau laboratoire comprend encore un atelier de petite mécanique réservé exclusivement aux besoins des locaux d'essais.

Mentionnons encore pour terminer que dans la cour située entre l'aile latérale et les usines, il est possible d'exécuter des essais ou des épreuves de durée en plein air.

Le nouvel immeuble, d'un cubage dépassant 26 000 m³ a été construit dans un temps record de 8 mois. Au début d'août 1942 commençaient les travaux de terrassement, tandis qu'au début d'avril 1943 les laboratoires étaient mis en service. Il est superflu d'ajouter qu'une telle performance n'a pu être réalisée que grâce aux efforts et à la collaboration de tous les intéressés. Souhaitons pour le nouveau laboratoire que des records analogues à ceux réalisés pendant sa construction se succèdent quand il sera en service.

(MS 962)

Dr W. Wanger. (H. D).

LES INSTALLATIONS DU NOUVEAU LABORATOIRE.

Indice décimal 621.317.2:621.3.027.3

L'article qui précède est consacré à la disposition générale des nouveaux laboratoires Brown Boveri et ne traite que d'une façon sommaire des installations électriques proprement dites. L'exposé que voici s'attache au contraire à décrire en détail les installations les plus intéressantes et les appareils les plus caractéristiques.

La plate-forme d'essai pour les très hautes tensions.

La source de courant alternatif sous 1600 kV par rapport à la terre se compose de deux transformateurs couplés en cascade. Le transformateur principal prévu pour une tension de 1200 kV est monté sur un socle isolant (voir fig. 1). Sa construction particulière, de même que la valeur de la tension et de

la puissance en font un des objets les plus intéressants du laboratoire.

Le noyau de ce transformateur est du type à culasses rapportées; il est placé horizontalement dans une cuve de forme adéquate. Les enroulements sont disposés sur une seule des deux colonnes. L'enroulement haute tension est divisé en deux moitiés couplées en parallèle; son point milieu a donc le potentiel le plus élevé tant par rapport à la cuve que par rapport à n'importe quel autre point des enroulements: Cette disposition claire permet d'éviter les discontinuités dans la répartition du potentiel et résout d'une manière simple et sûre le problème de l'isolement. Entre les enroulements et la cuve, l'isolement est assuré par des papiers de haute qualité imprégnés d'huile. Les spires d'entrée de l'enroulement haute tension ont un isolement soigneusement gradué pour leur permettre de résister aux ondes de tension à front raide qui se produisent à chaque perforation ou contournement des objets soumis aux essais.

Une répartition régulière du potentiel à l'intérieur de la borne haute tension, radialement et dans le sens de l'axe, est assurée par des armatures équipotentielles; des dispositifs spéciaux empêchent la formation de décharges superficielles à la partie inférieure de la borne. Le problème de la dilatation de l'huile a été résolu d'une manière ingénieuse; le vase de dilatation, muni d'un dessiccateur, est disposé à la partie supérieure de la borne, les décharges par effluves étant éliminées au moyen d'un dispositif de protection en forme de cage.

La puissance du transformateur est de 1200 kVA; cette valeur tient compte non seulement des tâches présentes, mais des développements futurs. La cuve étant portée à 400 kV par rapport à la terre en raison du couplage en cascade des deux transformateurs d'essai, il a fallu isoler la tuyauterie du réfrigérant.

Des travaux systématiques de recherche et des études préalables très poussées ont permis de réduire le poids total du trans-

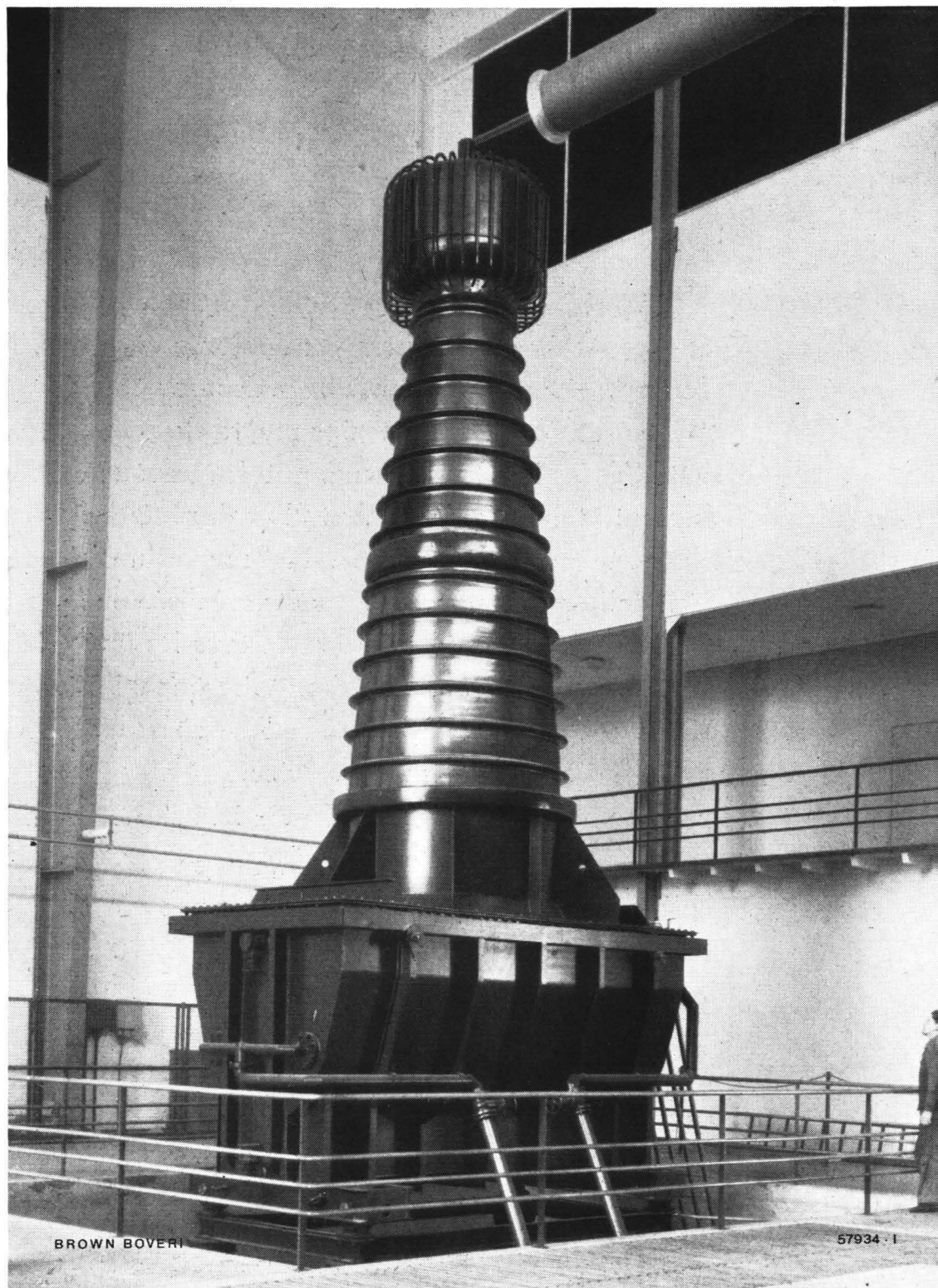


Fig. 1. — Transformateur d'essais pour 1200 kV.

Couplé en cascade avec un transformateur auxiliaire de 400 kV, ce transformateur permet d'obtenir une tension totale de 1600 kV à la terre.

Il est basé sur des dispositions constructives toutes nouvelles.

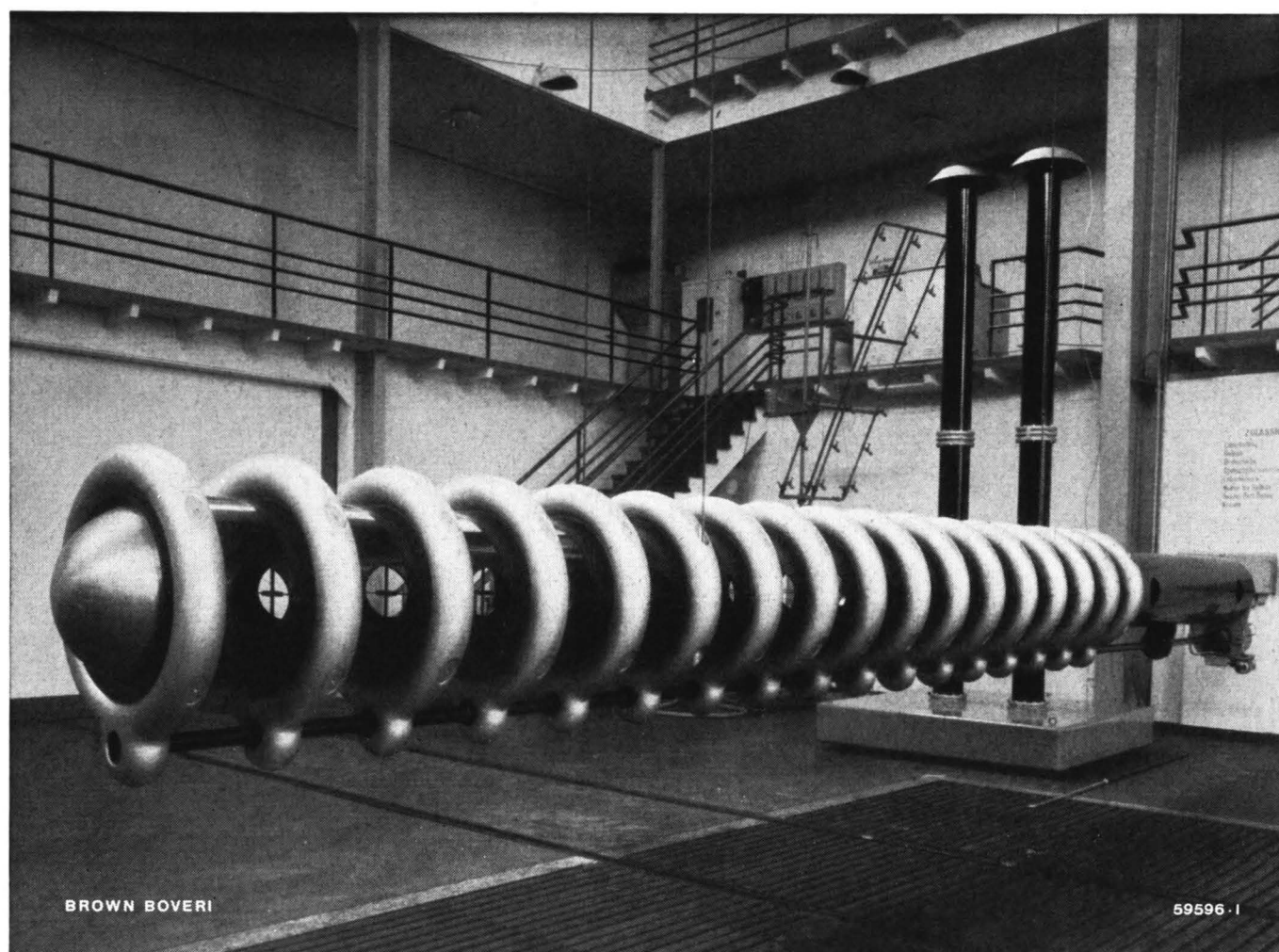


Fig. 2. — Redresseur mécanique à étages multiples pour une tension d'isolement de 2500 kV.

On notera en particulier la disposition constructive toute nouvelle.

formateur à 36,5 t (poids de l'huile 11,5 t), valeur remarquable si l'on tient compte du fait que le transformateur a 8,5 m de haut.

Le circuit d'utilisation des installations d'essai à haute tension est toujours capacitif; si la tension de la source s'écarte de la forme sinusoïdale, le courant sera donc déformé. Pour certaines investigations une bonne forme de la tension est cependant indispensable. En outre les courants de court-circuit internes qui s'établissent lors de contournement ou de perforations des objets à essayer — la tension de court-circuit du transformateur n'étant que de 6 % — ne sont pas toujours compatibles avec les essais. On peut parer d'une manière très simple à ces inconvénients en enclenchant une bobine de réactance réglable dans le circuit basse tension du transformateur. En accordant l'inductance de ce circuit avec la capacité de l'objet soumis aux essais, on peut obtenir une très bonne forme de tension, la source devant fournir uniquement la puissance active. Un transformateur de réglage de 380 kVA placé au sous-sol se prête avantageusement aux essais de ce genre et aux essais sous tension moyenne. Toutefois, des machines dont la puissance unitaire s'élève jusqu'à 2000 kVA permettent d'effectuer, si besoin est, tous les essais à grande puissance ou ceux dans lesquels la compensation de la puissance réactive n'est pas indiquée.

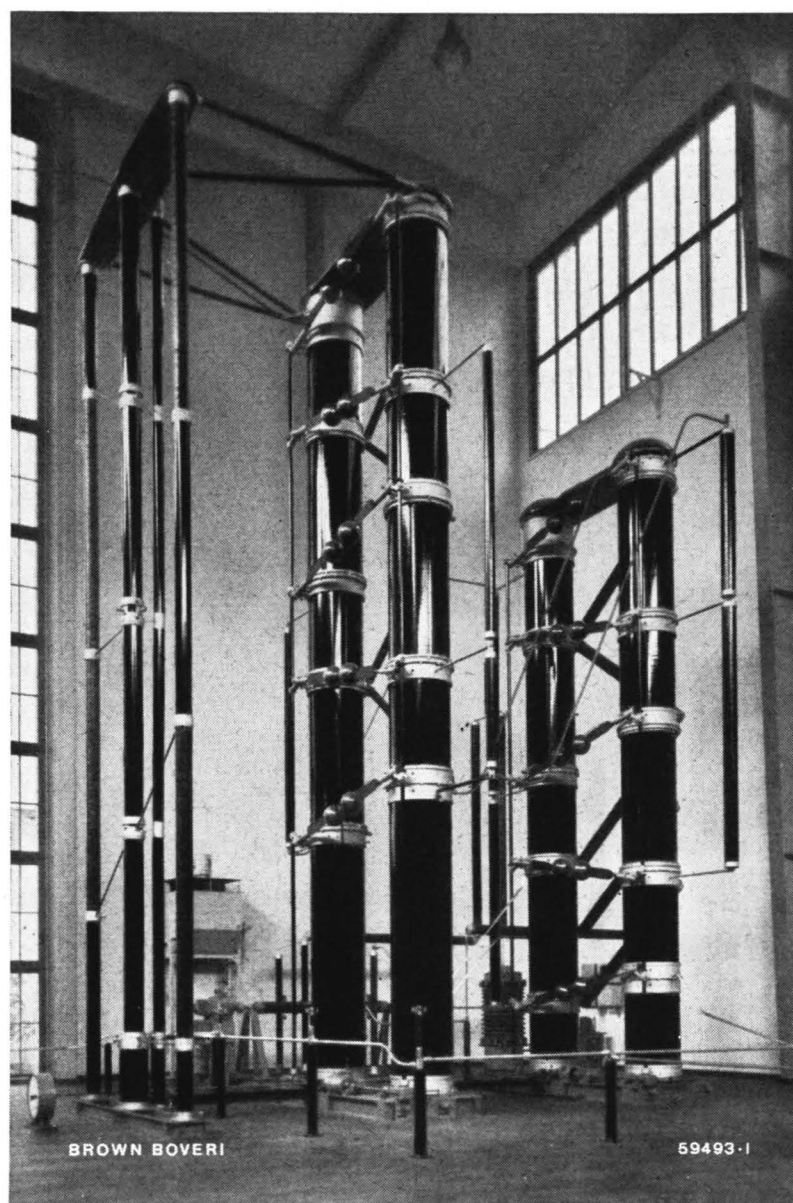


Fig. 3. — Générateur d'impulsions pour une tension de 2400 kV.

Toutes les manœuvres peuvent s'effectuer à partir du pupitre de commande.

Le *redresseur mécanique* à étages multiples de la fig. 2 construit pour une tension d'isolement de 2500 kV est le produit d'une série de développements nouveaux. Il permet d'obtenir en combinaison avec le transformateur de réglage cité plus haut une tension continue de 1200 kV. Grâce aux condensateurs disposés à chacun des 17 étages de redresseur, la répartition du potentiel le long du corps de cet appareil, qui a presque 10 m de long est quasi-linéaire. Les parties mobiles du redresseur sont actionnées par un moteur synchrone, dont le stator peut être décalé à partir du pupitre de commande. De cette façon, la phase du rotor du redresseur peut être adaptée en chaque instant à la phase de la tension du transformateur, ce qui empêche pratiquement la formation d'étincelles en cours de fonctionnement. L'ondulation de la tension redressée est éliminée au moyen d'une batterie de condensateurs d'environ 1000 pF. Une solution élégante a été trouvée pour éviter d'encombrer inutilement un emplacement d'essai de grandes dimensions quand le redresseur n'est pas en service: un engin de levage permet de l'amener rapidement — malgré son poids respectable de 2 t et sa longueur de 10 m — immédiatement sous le plafond du laboratoire où il reste suspendu tandis que le laboratoire devient ainsi libre pour les essais normaux jusqu'aux plus hautes tensions.

Le *premier générateur d'impulsions*, mis en service par Brown Boveri en 1925 déjà, était destiné principalement à l'étude des surtensions d'origine atmosphérique. En 1937, il a été remplacé par une nouvelle installation à plus grande tension (1200 kV) et de plus forte capacité. Aujourd'hui, les travaux de recherches relatifs aux transmissions à très haute tension nécessitent un nouvel agrandissement dont il a été tenu compte par l'installation d'un deuxième générateur d'impulsions semblable à celui de 1937 (voir fig. 3). La solution choisie est heureuse, car elle offre de très nombreuses possibilités d'utilisation: En couplant les deux générateurs en cascade ou en parallèle, il est possible de disposer pratiquement de l'énergie totale de 25 kW/s pour toutes les tensions comprises entre 600 et 2400 kV. L'installation

complète comprend 8 étages de condensateurs qui sont alimentés par un redresseur mécanique double. Pendant la période de charge, les condensateurs sont couplés en parallèle; à la décharge, ils sont mis en série par l'intermédiaire de 9 éclateurs à boules dont les distances disruptives ont des valeurs croissantes. Le redresseur mécanique est peu sensible aux forts courants de choc et il permet, en corrélation avec un schéma nouveau breveté par Brown Boveri, d'utiliser à la limite la capacité du générateur d'impulsions, en particulier en ce qui concerne la fréquence des chocs. Toutes les formes d'ondes comprises entre la limite inférieure de 0,5 μ s pour la durée du front et la limite supérieure de 1000 μ s pour la durée jusqu'à la mi-valeur de la queue d'onde, peuvent être introduites par des manœuvres très simples. La capacité de décharge du générateur d'impulsion est construite de façon à former en même temps un diviseur de tension, ce qui facilite grandement les prises oscillographiques. Ajoutons enfin que le laboratoire dispose d'un certain nombre d'éclateurs à boules de différents diamètres jusqu'à 1,75 m, pour la mesure des tensions alternatives et des tensions de choc.

Le laboratoire des oscillographes à rayons cathodiques.

On ne peut plus se représenter un laboratoire de recherches moderne, spécialisé dans l'étude des hautes tensions et des hautes fréquences, sans un oscillographe cathodique. Seul cet instrument permet en effet d'enregistrer avec exactitude les phénomènes

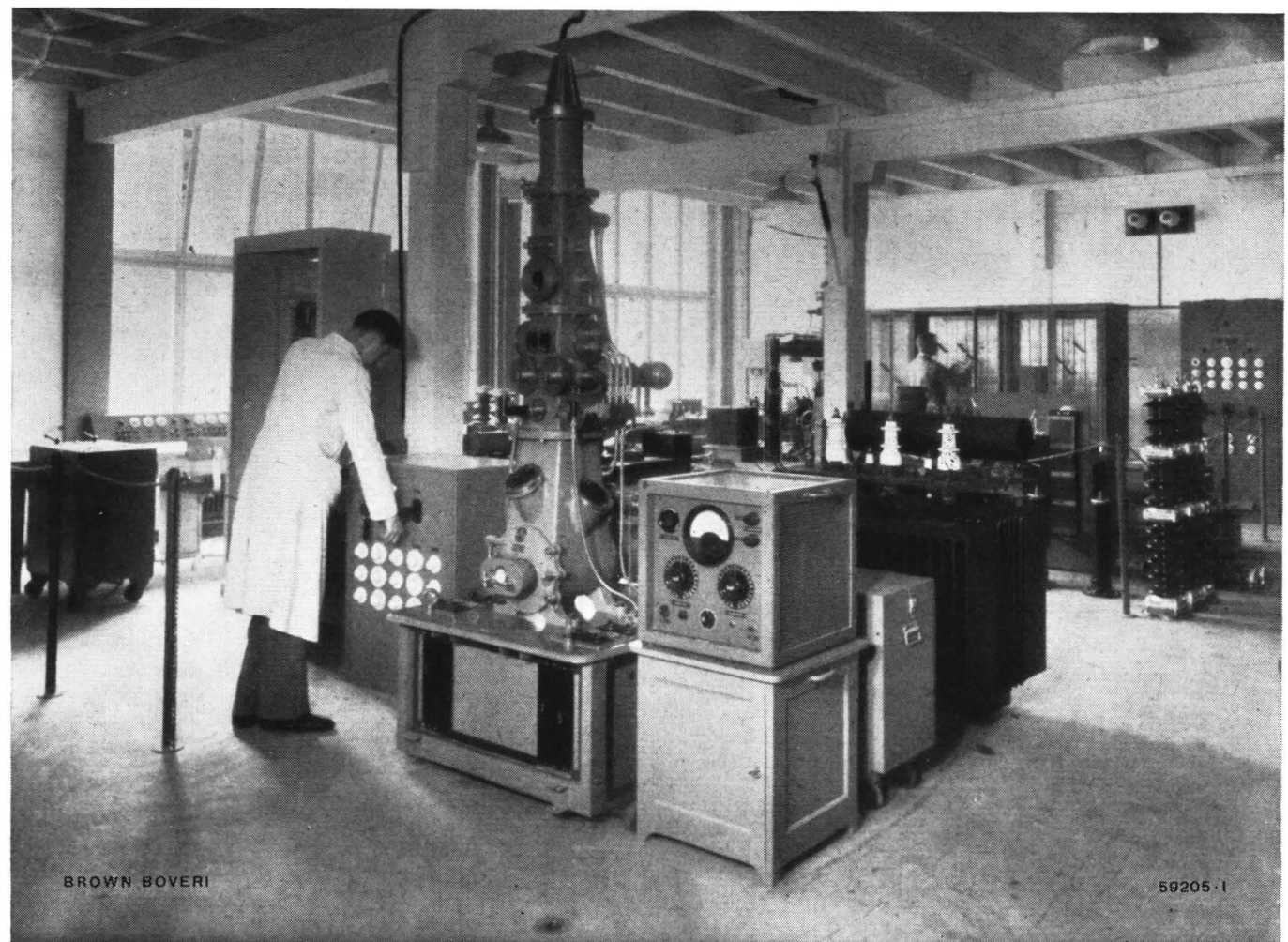


Fig. 4. — Vue générale du laboratoire des oscillographes cathodiques.
L'oscillographe à 4 rayons cathodiques placé au premier plan est unique en son genre.

ultra-rapides, par exemple, l'allure des décharges électriques ou les phénomènes transitoires haute fréquence qui accompagnent tous les changements d'état et les ruptures d'équilibre des circuits électriques. Notre nouveau laboratoire est équipé de deux grands oscillographes électroniques à cathode froide, fabriqués par la Maison Trueb, Täuber & Co. à Zurich (voir fig. 4). Le premier de ces instruments est, à l'heure actuelle, unique en son genre. C'est un oscillographe à quatre rayons cathodiques, muni de deux paires de plaques haute tension, pour 50 kV contre terre. Il permet l'enregistrement simultané de quatre grandeurs indépendantes. Le deuxième oscillographe ne possède qu'un seul rayon cathodique et une seule paire de plaques haute tension pour 50 kV contre terre. Il est utilisé principalement aux mesures courantes.

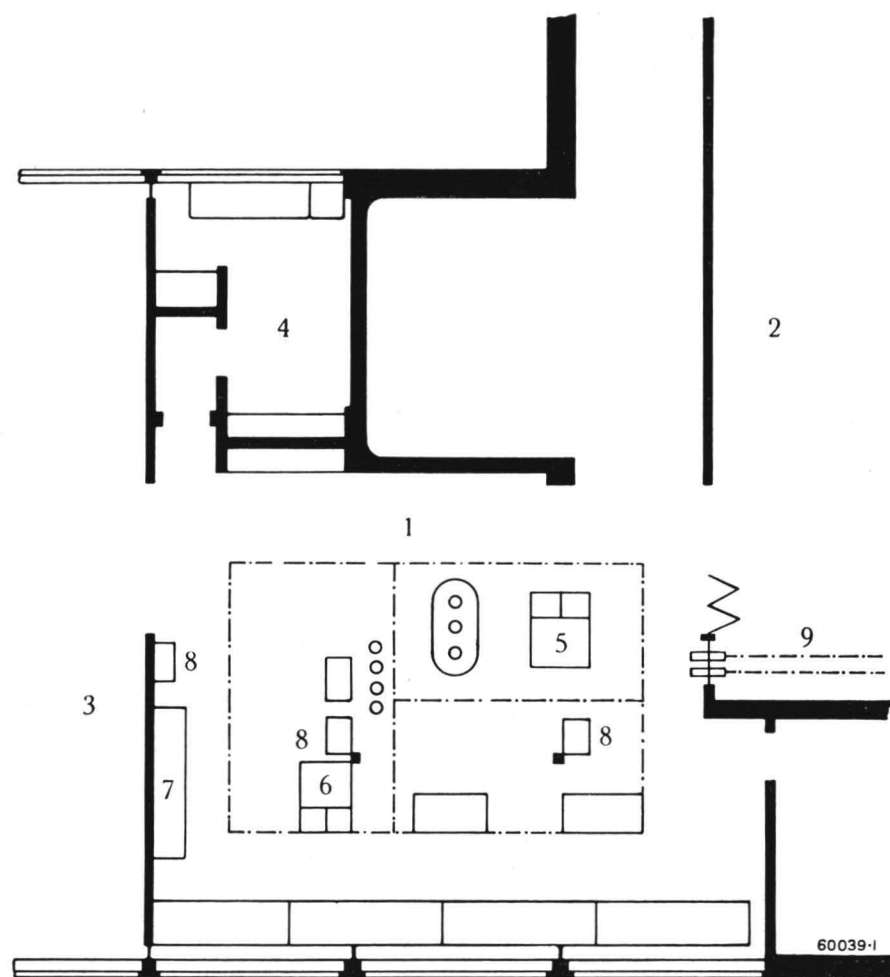


Fig. 5. — Disposition générale du laboratoire des oscillographes cathodiques.

- | | |
|---|--|
| 1 = Laboratoire proprement dit. | 6 = Oscillographe à 1 seul rayon cathodique. |
| 2 = Laboratoire haute tension. | 7 = Répartiteur. |
| 3 = Laboratoire pour tensions moyennes. | 8 = Tableaux et pupitres de commande. |
| 4 = Chambre noire. | 9 = Lignes de mesure. |
| 5 = Oscillographe à 4 rayons cathodiques. | |

La disposition générale du laboratoire des oscillographes cathodiques, par rapport à l'ensemble du bâtiment, est représentée à la fig. 5. Elle est dictée par des considérations assez complexes. Le laboratoire des oscillographes à rayons cathodiques doit, en effet, servir à deux fins principales :

1° Permettre d'enregistrer commodément et rapidement les phénomènes engendrés dans le laboratoire haute tension.

2° Se suffire à lui-même pour l'exécution de toute une série d'essais spéciaux dans lesquels on ne doit faire appel ni à de très hautes tensions, ni à des

puissances exceptionnellement fortes. Il s'agit, en l'espèce, de recherches relatives aux ondes mobiles et, en particulier, à la propagation des ondes dans les enroulements, à l'étude des surtensions d'enclenchement et des surtensions atmosphériques, au développement des parafoudres, aux décharges électriques et enfin à la haute fréquence pure. Pour exécuter des essais aussi divers, le laboratoire est équipé, d'une part, d'un grand répartiteur à 100 lignes, permettant de relier les installations d'essais à toutes les sources de courant installées dans les plates-formes d'essais de Brown Boveri, d'autre part, de quelques sources de courant spéciales installées dans le sous-sol, immédiatement sous le laboratoire et reliées à celui-ci par l'intermédiaire de traversées prévues pour 64 kV. Parmi ces sources de courant, nous citerons en particulier une installation de choc à fort courant d'une énergie totale de 5 kW/s qui peut fournir toute la gamme des courants de choc, jusqu'à 35 000 A. Dans ce même laboratoire sont aménagées, en outre, trois autres places de travail, pour essais spéciaux.

Le laboratoire des installations de télécommande.

Les applications de la technique des courants faibles, dans les différents domaines de l'électricité industrielle, ont pris une telle ampleur au cours des dernières années que Brown Boveri a estimé nécessaire de créer un laboratoire spécial pour toutes les recherches relatives aux télécommandes, à la télémessure, au télé-réglage, à la téléphonie par courants porteurs, aux différents systèmes de signalisation des réseaux industriels et enfin à l'emploi des lampes électroniques dans la technique des courants forts. Il peut paraître curieux, au premier abord, que ce laboratoire de télécommande ait été installé dans une aile du nouveau laboratoire haute tension. Toutefois si l'on réfléchit plus à fond aux phénomènes physiques qui sont de la base des différents systèmes de télécommunication, comme aussi aux moyens qui permettent de les utiliser, en pratique, on verra qu'il y a une grande similitude entre les problèmes posés dans l'un et l'autre de ces domaines. Il était donc tout naturel de mettre à la disposition du laboratoire de télécommande les différents moyens et les installations des autres plates-formes d'essais.

Le nouveau laboratoire de télécommande comporte une grande cage de Faraday de 4 m sur 3,5 m et huit emplacements de travail disposant chacun de 16 lignes reliées au répartiteur du laboratoire des oscillographes cathodiques.

L'atelier de mécanique de précision.

Les travaux de recherches nécessitent presque toujours l'établissement de dispositifs spéciaux et la fabrication rapide des prototypes d'appareils. Aussi un atelier spécial, équipé pour la mécanique de précision a-t-il été créé. Il sert uniquement aux besoins des différentes plates-formes d'essais et il est complètement indépendant de la fabrication. Ceci assure au laboratoire une très grande indépendance et favorise l'aboutissement rapide des travaux de recherches.

(MS 974)

Fr. Beldi et Ch. Degoumois.

L'OSCILLOGRAPHE DE PRÉCISION A HAUTE TENSION AVEC QUATRE RAYONS CATHODIQUES.

Indice décimal 621.317.755.027.3

Cet article décrit un oscillographe cathodique présentant les innovations suivantes: Quatre rayons indépendants émis par une même cathode, quatre systèmes déviateurs indépendants pour des tensions jusqu'à 3000 V et deux pour des tensions jusqu'à 50 000 V et alimentation de la cathode à 50 000 V complètement blindée.

L'Association Suisse des Electriciens (ASE) et la Maison Brown Boveri sont les premières en Suisse à avoir employé des oscillographes à rayon cathodique.

L'expérience de Brown Boveri dans l'emploi des oscillographes cathodiques lui a fait reconnaître la nécessité de blinder complètement le tube à décharge et le fil d'amenée de la tension. Ce blindage est facile à obtenir avec l'oscillographe à rayons multiples émis par une cathode unique. Ce fut une des principales raisons qui poussa au choix de cette construction. Le

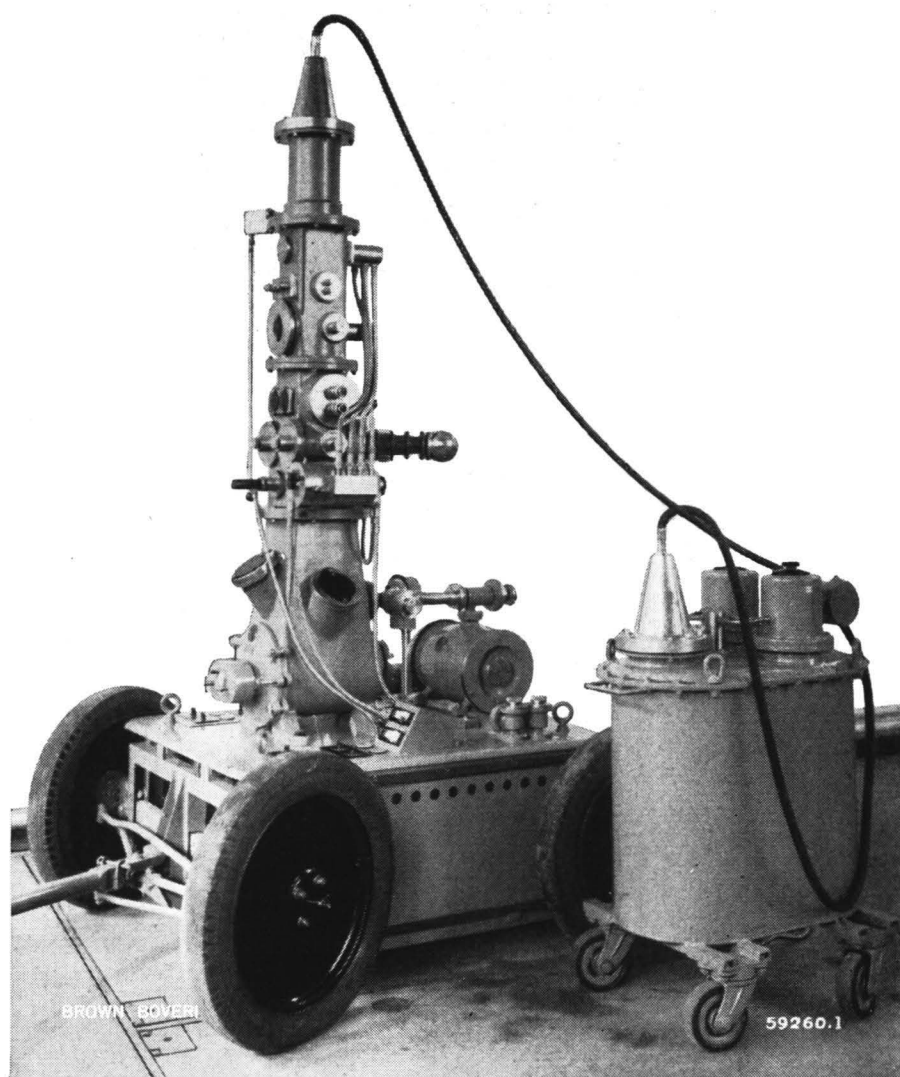


Fig. 1. — Le nouvel oscillographe de précision à haute tension à quatre rayons et son installation d'alimentation à haute tension.

Les caractéristiques de ce nouvel appareil sont entre autres quatre systèmes de rayons indépendants, une amenée blindée pour la haute tension continue à la cathode, un chariot augmentant la mobilité.

Déjà en 1926, celle-ci commanda le premier oscillographe, système Dufour, qui par la suite fut fortement amélioré au point de vue mécanique et qualité des mesures. Pour le nouveau laboratoire à haute tension de Baden, Trueb, Täuber & Cie, S. A. a construit un oscillographe de ce système réunissant tous les derniers perfectionnements et qui, par ses propriétés, est unique au monde (fig. 1). Il s'agit d'un oscillographe à rayons multiples, tous émis par une seule cathode.

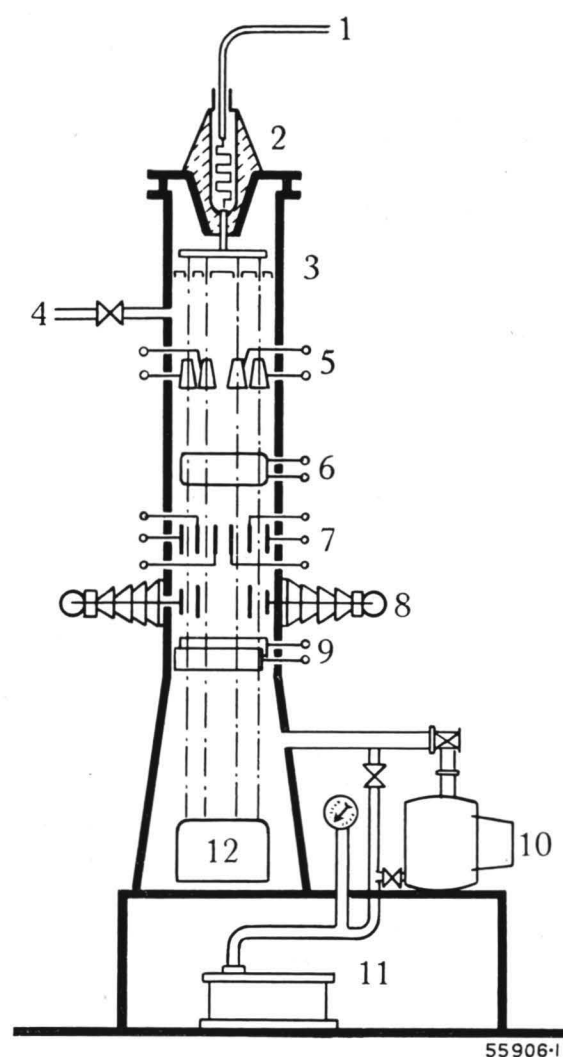


Fig. 2. — Représentation schématique de l'oscillographe.

- | | |
|---|--|
| 1 = Câble à haute tension d'alimentation de la cathode. | 7 = Plaque déviatrice basse tension. |
| 2 = Traversée à haute tension blindée. | 8 = Plaque déviatrice haute tension. |
| 3 = Chambre de décharge. | 9 = Plaque déviatrice pour les axes des temps. |
| 4 = Vanne d'entrée d'air. | 10 = Pompe moléculaire. |
| 5 = Verrouillage de rayons. | 11 = Pompe préliminaire. |
| 6 = Lentille électromagnétique. | 12 = Cassette à film et écran lumineux. |

guidage rectiligne des rayons a aussi un effet favorable sur la précision de cet appareil.

La figure 2 représente schématiquement la construction de cet oscillographe qui présente par rapport aux autres constructions les caractéristiques suivantes: Le corps de l'oscillographe est en fonte, matière qui s'est révélée très étanche et forme en outre un excellent

écran contre les champs extérieurs. La rémanence de la fonte plus faible que celle de l'acier employé précédemment est particulièrement appréciée, car les courants de choc rapprochés produisent souvent une aimantation du bâti d'acier. Les quatre systèmes de verrouillage de construction nouvelle peuvent être ajustés

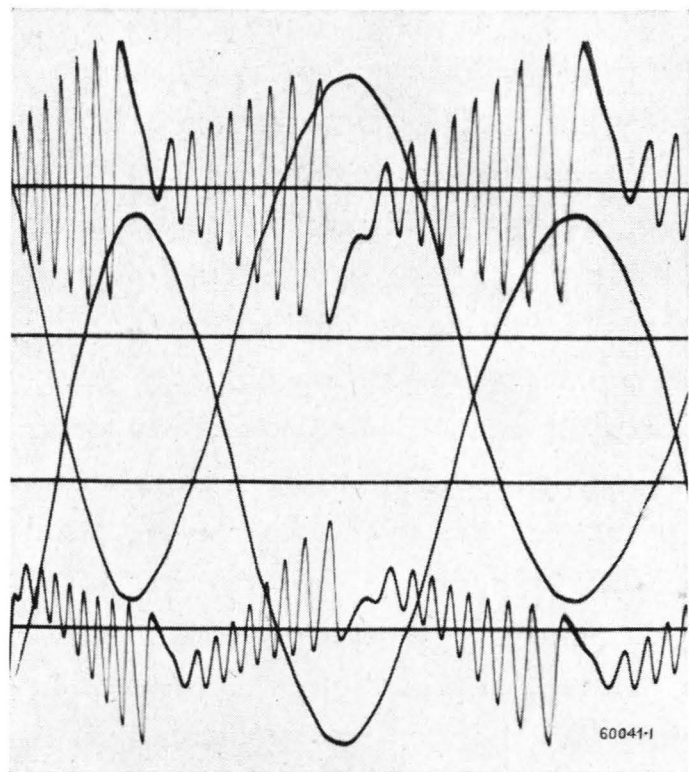


Fig. 3. — Exemple d'un relevé fait avec le nouvel oscillographe cathodique, grandeur de l'original 15×15 cm.

mécaniquement de l'extérieur et permettent de régler l'intensité des rayons. Une bobine de concentration commune permet la concentration simultanée des quatre faisceaux sans rotation. Sur une proposition faite par Brown Boveri, un oscillographe cathodique livré par la maison Trueb, Täuber en 1936 a déjà été muni de plaques déviatrices à haute tension. Se basant sur les expériences faites à Baden¹⁾ avec ces plaques on en a construit deux pour les deux rayons extérieurs du nouvel oscillographe. L'expérience acquise grâce aux constructions précédentes servit à l'établissement des

¹⁾ Revue Brown Boveri 1940, p. 252.

joints et des pompes à vide. L'emploi exclusif de joints en caoutchouc rond donne une si bonne étanchéité que malgré le grand volume, environ 60 l, une seule pompe moléculaire suffit à assurer un fonctionnement parfait. Le refroidissement par eau indispensable avec les pompes à diffuseur est alors supprimé. La haute précision de cet oscillographe est due en bonne partie à sa construction ramassée et à l'emploi pour la première fois de fonte. Sa mobilité est augmentée par le montage sur roues d'automobile normales.

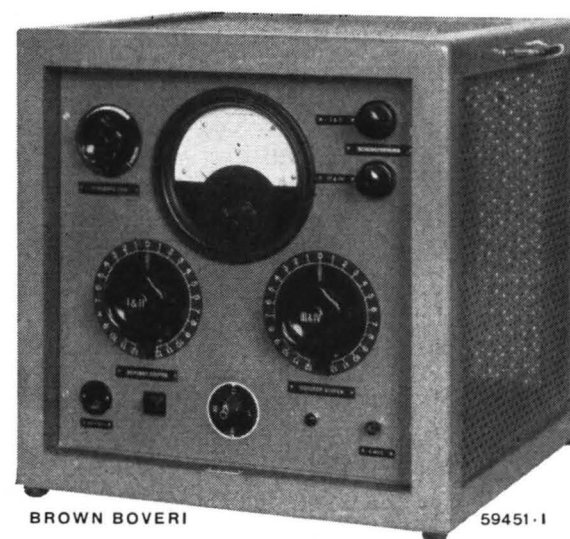


Fig. 4. — Appareil produisant les tensions d'étalonnage et les tensions déplaçant les axes.

Ces tensions peuvent être réglées à volonté.

Un accessoire construit spécialement pour cet appareil est l'installation de redresseurs à 50 kV tension continue, montée dans une cuve à huile transportable. La lampe redresseuse spéciale est aussi plongée dans l'huile. L'amenée de la tension à la cathode se fait par un câble blindé à haute tension (fig. 1). Comme autre accessoire intéressant, citons un redresseur pour la tension déviatrice qui fournit deux tensions de polarité quelconque et réglables indépendamment l'une de l'autre et servant à la déviation des quatre lignes d'axes, ainsi qu'à l'étalonnage.

(MS 976)

G. Induni, ingénieur chez
Trueb, Täuber & Cie, S. A. (J. C.)

LE PROBLÈME DE L'ISOLEMENT DANS LA CONSTRUCTION DES MACHINES ET DES TRANSFORMATEURS MODERNES.

Indice décimal 621.3.048:621.313
621.3.048:621.314.21

Lors du transport d'énergie importante à de grandes distances, on est obligé de choisir des tensions de plus en plus élevées, ce qui augmente les contraintes de l'isolation des machines et des transformateurs. Cet article traite de quelques problèmes de l'isolement à haute tension et de leur solution.

Par une isolation imprégnée à l'huile entre les enroulements haute et basse tension des transformateurs, on a obtenu simultanément une amélioration de l'isolement et une notable économie de matériel.

Malgré la pénurie de mica due à la guerre, des progrès importants ont été obtenus dans la construction des machines par l'emploi de matières artificielles appropriées. Des recherches approfondies sur l'isolement des conducteurs dans les encoches et des têtes de bobines ont eu grand succès. Il a même été possible de faire, sur un modèle de machine à 50 kV, des essais de tension concluants selon les normes et avec le facteur de sécurité usuel.

I. INTRODUCTION.

L'essor de l'industrie électrique a été très grand ces dix dernières années, il est dû en grande part à la facilité du transport et de la distribution de l'énergie électrique aux centres de consommation. Les tensions élevées ne sont pas seulement avantageuses pour les lignes à haute tension, mais aussi dans la plupart des installations, car elles réduisent les courants. La construction des installations de couplage et de distribution est ainsi meilleur marché et plus résistante aux courts-circuits, et les problèmes de la distribution du courant à l'intérieur des machines et des transformateurs sont grandement simplifiés.

Des tensions élevées demandent des isolants de qualité. Or, il est plus facile d'engendrer des tensions élevées que d'isoler les enroulements des machines et des transformateurs pour ces tensions. C'est pour cette raison que l'électro-industrie a fait autant de recherches sur l'isolement.

Les matières isolantes employées dans la construction des machines électriques et des transformateurs doivent remplir diverses conditions. Elles doivent, d'une part, bien isoler électriquement les pièces conductrices du courant de la masse métallique et, d'autre part, transmettre souvent à la masse métallique ou à l'agent réfrigérant toute la chaleur produite dans le conducteur par le passage du courant. Ces conditions sont diamétralement opposées, car un mauvais conducteur de l'électricité est aussi un mauvais conducteur de la chaleur. En outre, la plupart des isolants résistent mal à la température, entre 120 et 150 °C leur qualité baisse et ils peuvent même être détériorés.

A côté de ces problèmes thermiques qui se présentent dans toutes les machines électriques à cause des pertes dans les enroulements et dans le fer, les influences électriques rendent aussi plus difficiles la construction et la fabrication. Elles se présentent sous la forme de décharges silencieuses en régime stationnaire ou de brusques variations d'état (phénomènes transitoires à l'enclenchement ou au déclenchement ou perturbations par influences atmosphériques). Ces variations d'état ne se propagent pas avec une vitesse infinie, mais avec une vitesse finie, ce qui provoque entre les différents éléments de l'installation une différence de tension, pouvant atteindre une valeur, multiple élevée de la tension de service. Les ondes de tension à front raide mettent surtout en danger les premières spires et bobines à l'entrée de chaque phase des machines et des transformateurs. Des tensions exagérées peuvent aussi se produire au milieu et à la fin des enroulements de chaque phase sous l'effet de l'inductivité et de la capacité des divers éléments des enroulements.

En régime stationnaire, il faut tenir compte, en plus de l'échauffement de l'enroulement, de la chaleur produite dans l'isolement. Chaque isolant soumis à un champ électrique alternatif absorbe un peu d'énergie qu'il transforme en chaleur. Nous pouvons calculer cette perte en écrivant la formule connue de la puissance en courant alternatif $P = E \cdot J \cdot \cos \varphi$ sous la forme:

$$P = E^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta$$

dans laquelle E est la tension, ω la pulsation, C la capacité et $\operatorname{tg} \delta$ le facteur de perte. L'angle δ est le complémentaire de l'angle de déphasage φ . C peut être exprimé à l'aide de deux valeurs, la constante diélectrique ε et la constante C_0 (appelée capacité géométrique). C_0 ne tient compte que de la forme de l'isolateur considéré comme condensateur. D'après la définition $C = C_0 \cdot \varepsilon$ et donc

$$P = E^2 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$$

ce qui signifie que les pertes diélectriques d'un isolant donné dépendent non seulement de la tension E et de la pulsation ω grandeurs électriques, mais encore de ε et de $\operatorname{tg} \delta$, caractéristiques de la matière isolante. Le produit $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ est appelé coefficient de perte.

Les pertes diélectriques de presque toutes les matières isolantes sont fonction de la température. Cette influence de la température peut devenir la cause d'un claquage du diélectrique. En effet, la température et les pertes diélectriques peuvent s'augmenter mutuellement jusqu'à produire un affaiblissement du diélectrique et même une carbonisation du matériel. On peut prouver à l'aide de la théorie du claquage thermique¹⁾ et les essais l'ont confirmé, que la tension supportée en permanence par un diélectrique est indépendante de l'épaisseur. Une matière isolante donnée supporte en permanence une tension dont la grandeur dépend uniquement de ses caractéristiques thermiques et électriques.

La théorie du claquage thermique n'est valable que pour les contraintes de longue durée et les températures élevées. Pour les contraintes de brève durée et spécialement pour les contraintes par choc, la théorie de la ionisation par choc, valable non seulement pour les gaz, mais aussi pour les matières liquides et solides, prend une importance particulière. Une explication détaillée de ces phénomènes dépasserait le cadre de cet article.

II. L'ISOLANT DES TRANSFORMATEURS.

1° ISOLATION DES ENROULEMENTS.

L'isolement entre deux parties d'enroulement reliées à des éléments différents du réseau, par exemple entre les enroulements haute et basse tension d'un transformateur à deux enroulements, a de tout temps été le problème le plus important dans la construction des transformateurs. Il est intéressant de constater que déjà au début de la construction des transformateurs à haute tension on connaissait les isolants modernes. L'isolant principal, le *papier isolant épais*, a toutefois rapidement été remplacé par les *douilles en papier imprégné* qui, au début, remplissaient tout l'espace entre les enroulements haute et basse tension. Des difficultés dues à ces douilles de papier imprégné firent modifier la disposition de l'isolation. L'huile devint l'isolant principal et les douilles de faible épaisseur ne servirent que de barrières pour diviser le trajet dans l'huile. Des recherches approfondies ont amené, en 1927, l'emploi des calottes isolantes. Une notable réduction du poids pour une même puissance a été le principal avantage de cette construction éprouvée depuis de nombreuses années.

Cette isolation ne peut pas être comparée avec l'isolation au papier imprégné à l'huile pour les câbles

à très haute tension en ce qui concerne l'épaisseur. En principe, rien ne semble empêcher l'isolation par bandes de papier imprégné d'huile. Au point de vue pratique, il sera bon toutefois d'éclaircir quelques points par des essais. La chaleur produite dans le diélectrique avec les calottes isolantes employées précédemment était évacuée par l'huile. Dans le nouveau système isolant, la chaleur produite par les pertes ne peut plus être évacuée directement. La chaleur se transmet radialement et la plus grande partie passe dans l'enroulement. C'est pourquoi il faut s'attendre aux mêmes phénomènes qu'avec un isolant solide. C'est pour cette raison que nous avons étudié très soigneusement le problème du claquage thermique de l'isolation au papier imprégné à l'huile. Nous ne parlerons ici que d'une seule série d'essais, car le papier comme matériel isolant pour haute tension est traité dans un autre article de ce numéro.²⁾

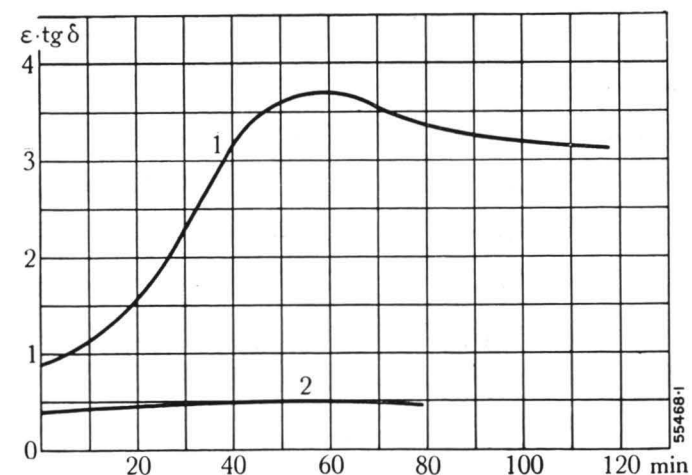


Fig. 1. — Essai de durée d'un transformateur isolé avec un enveloppement de papier à fortes pertes diélectriques.

Le facteur de pertes est reporté en fonction du temps.

1 = Premier essai de durée sous une tension alternative constante de 90 kV.
2 = Deuxième essai de durée également sous une tension alternative de 90 kV.

L'huile avait une température de 90° C.

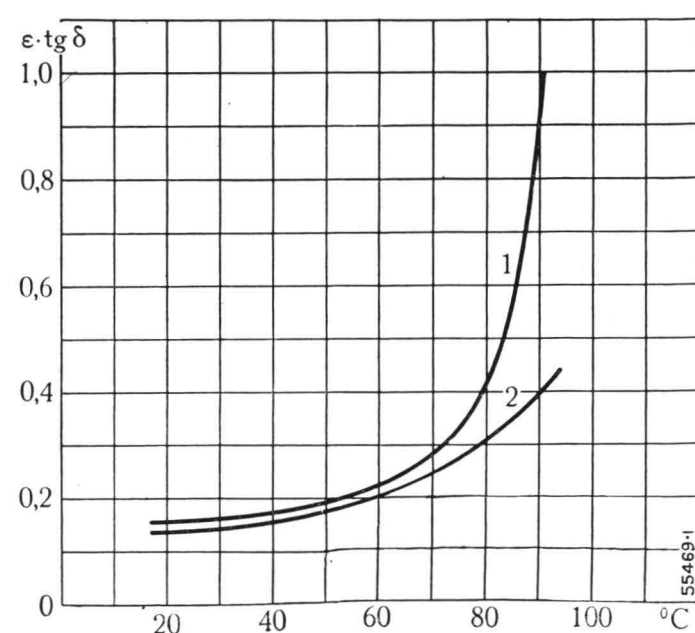


Fig. 2. — Coefficient de pertes en fonction de la température d'un transformateur isolé avec un enveloppement de papier à fortes pertes diélectriques.

1 = Facteur de perte mesuré avant l'essai de durée de la fig. 1.
2 = Facteur de perte mesuré après le 2ème essai de durée de la fig. 1.
L'amélioration est notable.

Tension de mesure 35 kV.

¹⁾ Revue Brown Boveri 1926, p. 115.

²⁾ Page 235 de ce numéro.

La figure 1 montre qu'un enveloppement de papier avec de fortes pertes diélectriques s'améliore de lui-même, résultat très intéressant. Peu après l'enclenchement de la tension, le coefficient de perte croît rapidement et atteint après une heure son maximum. L'accroissement du coefficient de perte est accompagné d'une augmentation de la température à l'intérieur du diélectrique. Cette augmentation de la température réduit, comme le montre la figure 2, l'influence de la température sur le coefficient de perte lors des essais suivants. Un nouvel essai de durée, sous une même contrainte, ne produira presque pas d'échauffement (fig. 1).

Dans la construction des transformateurs l'huile sert à deux usages, l'isolement et la réfrigération. Les essais dans ce domaine seront mentionnés dans un autre article.¹⁾

Les gaz comprimés, spécialement l'air comprimé, sont employés ces derniers temps comme isolants à côté de l'huile. Dans le domaine des transformateurs de mesure, les essais ont donné de bons résultats²⁾. On apprécie surtout, outre l'amélioration de la qualité des mesures, l'emploi d'un isolant incombustible.

2° LONGUEUR DE L'ISOLANT DÉPASSANT L'ENROULEMENT.

Le problème de l'isolation à l'extrémité des enroulements est plus difficile à résoudre que celui du claquage thermique des isolations imprégnées d'huile. Par suite de la forte intensité du champ dans les bords hétérogènes et surtout à cause du champ tangentiel, il se produit des décharges glissantes déjà aux basses tensions. Des recherches très poussées ont conduit à une solution parfaite du problème. Elles ont permis de donner aux isolations terminales une forme supprimant les décharges. Cette nouvelle isolation permet de réduire beaucoup l'épaisseur isolante entre les enroulements haute et basse tension. Cela réduit le champ de fuite et permet de diminuer la section du fer actif. On obtient ainsi, pour des qualités pour le moins équivalentes du transformateur, si ce n'est meilleures, un poids total plus faible. Les diagrammes de la figure 3 permettent de se faire une idée du rapport des poids de transformateurs avec calotte isolante ou avec la nouvelle isolation. Nous attirons spécialement l'attention du lecteur sur la réduction de poids du transformateur sans huile qui atteint la valeur extraordinaire de 35 %. Le poids de l'huile est réduit de 19 %.

La nouvelle isolation de l'enroulement a une très grande rigidité diélectrique: Quelques valeurs numériques confirmeront cette affirmation. Lors d'essais sur

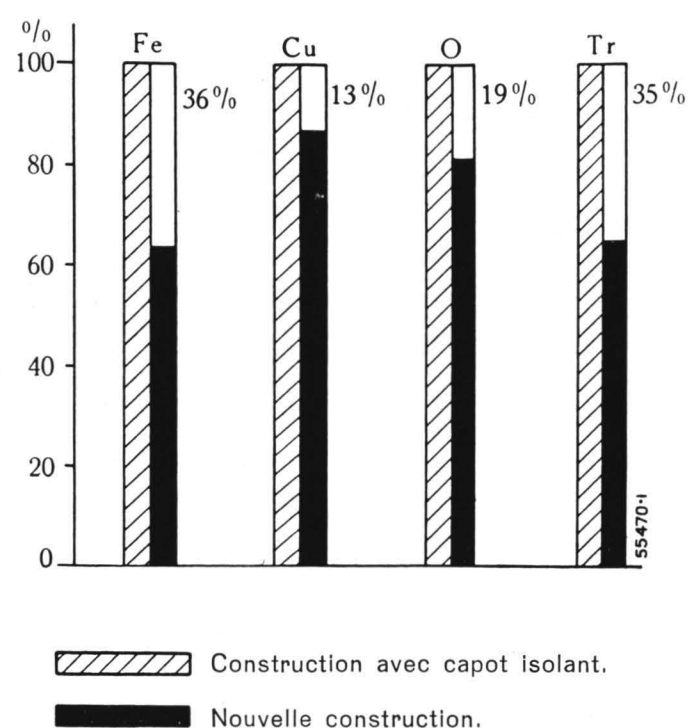


Fig. 3. — Réduction du poids et économie de matières premières par l'isolation moderne d'un transformateur de 20 000 kVA pour une tension de service de 105/20 kV par rapport à l'ancienne construction avec capot isolant.

Fe = Fer. Cu = Cuivre. O = Huile.
Tr = Transformateur sans huile.

modèle avec tension alternative de l'ancienne construction avec calottes isolantes, on avait observé des claquages dans la direction radiale. Par exemple, un isolant de 65 mm avait claqué pour une tension de 280 kV. En revanche, sur un modèle du nouveau système isolant correspondant aussi aux conditions de la pratique, il ne se produit aucun claquage pour cette tension, même pour une épaisseur de l'isolant de 11 mm seulement, soit $\frac{1}{6}$ de la précédente. Il en fut de même pour une contrainte de 530 kV sous onde de choc. Il fut impossible de produire un claquage lors des nombreux essais de modèles de cette nouvelle isolation, aussi bien sous des ondes de choc que sous des contraintes alternatives.

3° ISOLATION DES SPIRES.

L'isolation des spires fut aussi l'objet de nombreuses recherches. Au début de cet article, nous avons déjà attiré l'attention sur la contrainte élevée à laquelle sont soumises les spires et les bobines, surtout au commencement de l'enroulement, lors d'ondes de tension à front raide.

Les mesures ont donc été étendues aux recherches de la résistance aux impulsions de tension.³⁾

La figure 4 donne un résumé des résultats des essais. Pour des contraintes durant moins de $15 \mu s$ et surtout pour de faibles distances entre les électrodes, la résistance de l'huile croît beaucoup: La rigidité diélectrique est deux à cinq fois les valeurs sous contrainte alternative. La figure 5 montre que pour les fils isolés au papier, l'épaisseur de la couche

¹⁾ Page 240 de ce numéro.

²⁾ Page 244 de ce numéro.

³⁾ Page 275 de ce numéro.

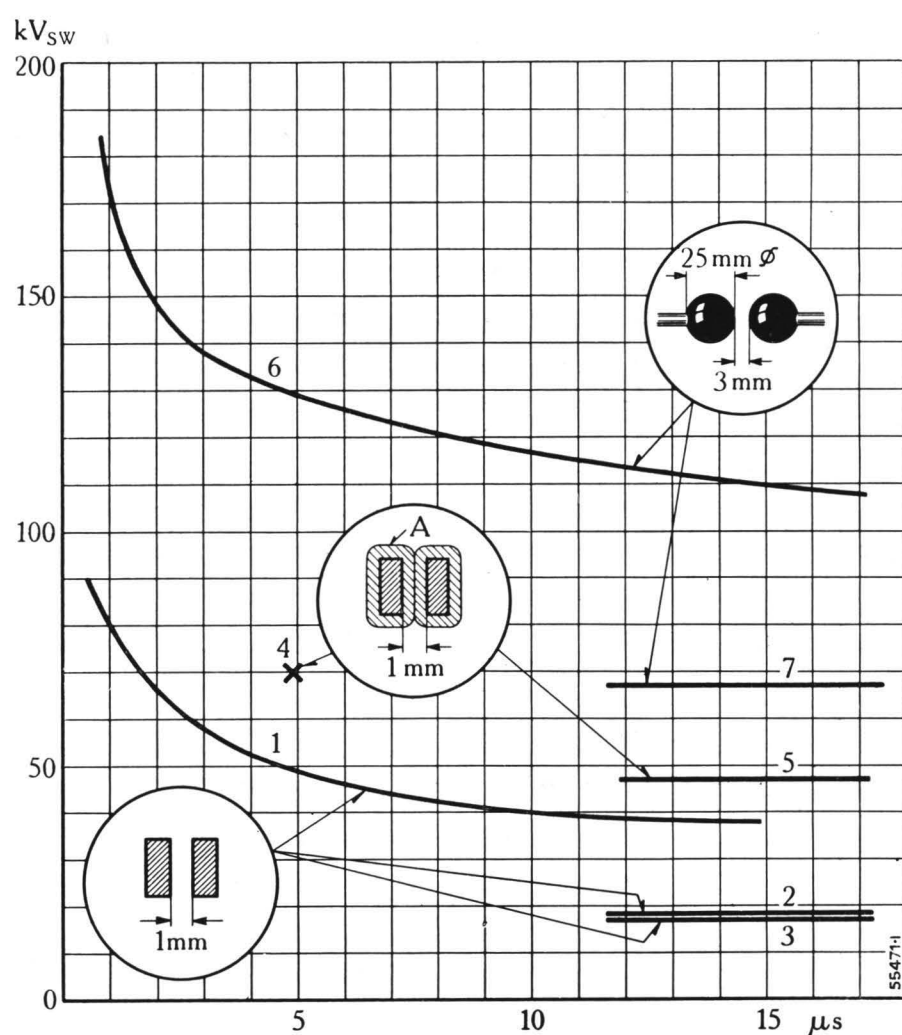


Fig. 4. — Tension de perforation de l'huile pure et d'isolation en papier plongée dans l'huile de transformateur pour divers genres de contraintes.

- 1, 4 et 6 = Contrainte par impulsion de courant.
 2 = Contrainte par tension continue.
 3, 5 et 7 = Contrainte par tension alternative.
 A = Papier isolant.

d'huile entre les fils joue un rôle d'autant moins grand que l'isolation du fil est épaisse.

On a étudié à fond le vieillissement des isolants (modification de leur résistance) sous des contraintes par ondes de choc de tension. Des fils isolés au papier ont été soumis sous huile à des ondes de tension de forme normale (1,0/50 μ s); le nombre de chocs par point mesuré varie entre 1 et 6000.

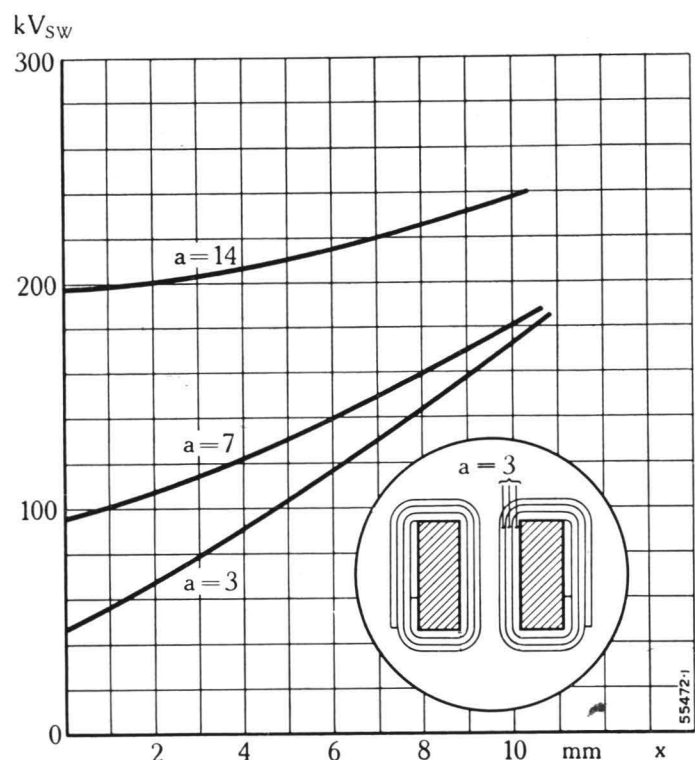


Fig. 5. — Tension de perforation en fonction de la distance des fils pour 3, 7 et 14 couches de papier isolant plongé dans de l'huile de transformateur, lors de contraintes sous impulsion de tension.

Les valeurs suivantes ont, par exemple, été trouvées pour une isolation formée de quatre couches de papier.

Nombre de chocs par point mesuré	1	10	100	1000	6000
Tension de claquage kV	57-70	57-59	57-61	54-57	52-61

Les différences sont tout aussi bien dues à la dispersion des mesures qu'à l'influence de la contrainte de tension. De ces résultats on peut conclure que les contraintes préalables n'ont aucune influence sur la résistance au claquage.

III. ISOLATION DES MACHINES.

1° ISOLATION DES ENCOCHES CONTENANT DU MICA.

a) Pertes diélectriques.

L'isolation des encoches est l'isolation des machines soumise aux plus fortes contraintes. C'est pourquoi elle est toujours l'objet de nouvelles recherches. Son élément principal est le mica, collé en minces feuillets par un vernis spécial sur des feuilles de papier. Ces recherches précises ont montré que la qualité du vernis a une très grande influence sur la grandeur des pertes diélectriques. La qualité du papier joue aussi son rôle et il ne faut pas négliger non plus l'influence de la composition du mica. La gomme laque utilisée précédemment n'a pas donné de bons résultats aux températures élevées. La figure 6 montre

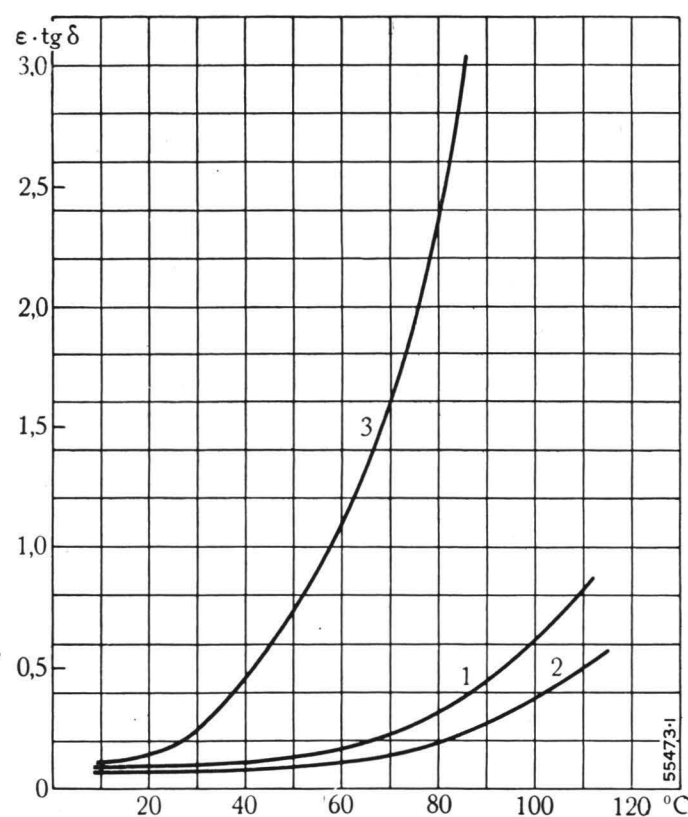


Fig. 6. — Coefficient de perte de diverses isolations d'encoches en fonction de la température.

- 1 = Construction ancienne.
 2 = Construction selon un procédé de fabrication amélioré.
 3 = Isolation à la gomme laque.

la courbe du coefficient de pertes en fonction de la température d'une isolation à la gomme laque comparée à la courbe de l'isolation que nous employons avec succès depuis des années et dont l'agglomérant est un vernis du genre compound. Comme nous l'avons dit dans le premier chapitre, les pertes diélectriques, spécialement le coefficient de pertes, et sa variation en fonction de la température, ont une importance prépondérante sur la contrainte de l'isolation en service permanent. On comprend pourquoi on a cherché par des recherches systématiques à réduire toujours plus ces grandeurs. On a essayé, en modifiant les procédés de fabrication et les traitements, d'obtenir des valeurs encore plus favorables en employant les mêmes matières premières. Comme le montre la figure 6, les recherches eurent plein succès. Il faut remarquer que la réduction des pertes dans le diélectrique n'ont pratiquement pas d'influence sur le rendement de la machine. Ces pertes ne sont, à l'état chaud, pour un alternateur de 100 000 kVA avec une tension nominale de 13 kV, que 0,25 ‰ de la puissance. Elles n'ont donc une importance qu'en ce qui concerne l'équilibre thermique dans l'isolant en régime permanent, mais leur influence est alors très importante, comme nous l'avons mentionné dans l'introduction.

b) Effluves dans les couches d'air.

A côté des phénomènes précédents qui sont de nature thermo-électrique, les décharges dans les minces couches d'air ont aussi été étudiées. L'air est moins

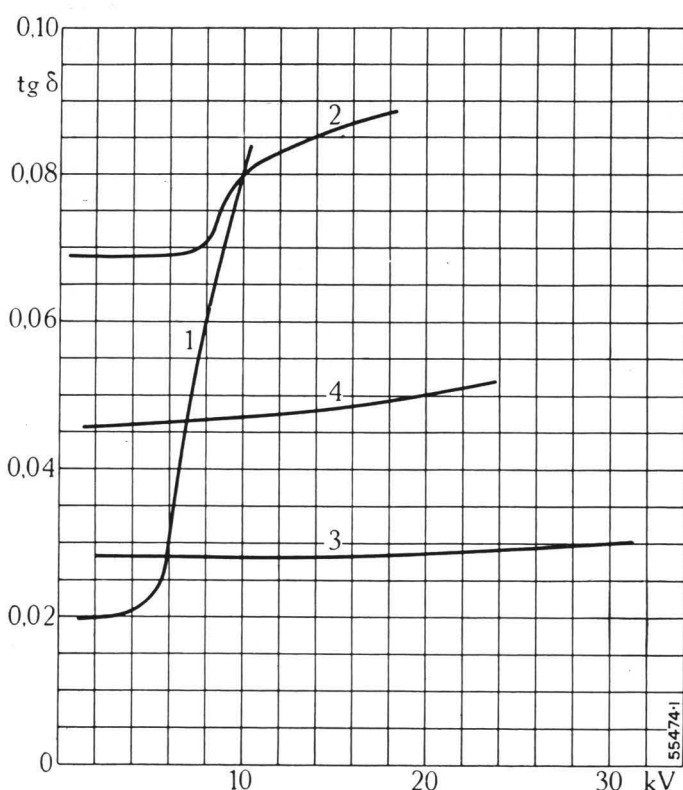


Fig. 7. — Facteur de perte de quelques isolations d'encoches en fonction de la tension.

- 1 = Isolation d'une machine de 8,5 kV, après 26 années d'exploitation.
 2 = Isolation d'une machine de 15 kV après 24 années d'exploitation.
 3 = Nouvelle isolation avec 50 ‰ de mica.
 4 = Nouvelle isolation sans mica.

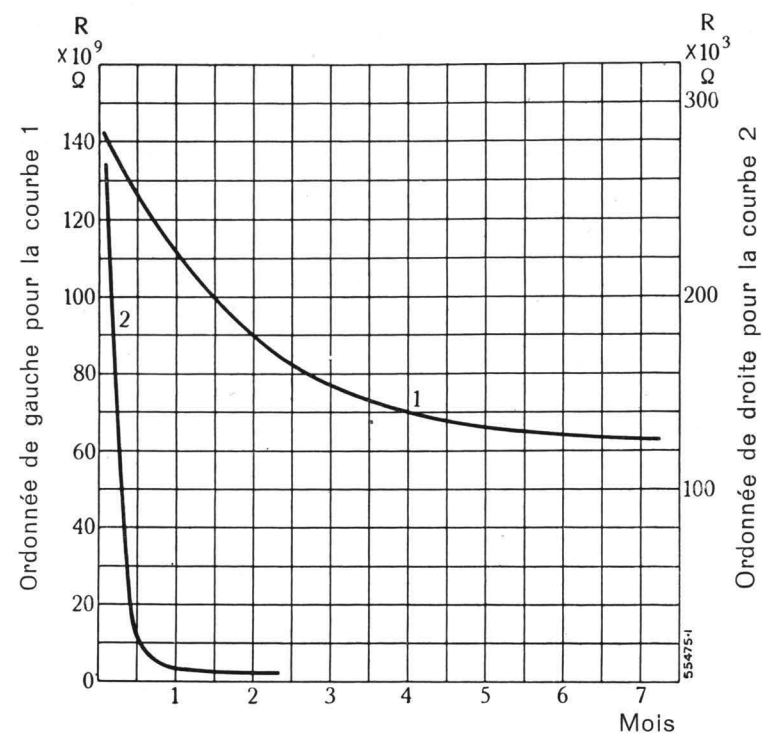


Fig. 8. — Influence de l'humidité sur l'isolant des machines.

La résistance R en courant continu en fonction du temps après une exposition à l'air avec une humidité relative atteignant 97 ‰.

1 = Isolation d'encoche contenant du mica.

2 = Presspan verni.

résistant que les isolants solides et quand il y a des inclusions d'air dans les isolants solides, l'air est soumis à des contraintes beaucoup plus élevées que l'isolant qui l'entoure. Il peut arriver que l'air soit le siège de décharges et devienne conducteur.

Le phénomène est connu sous le nom de ionisation par choc. Des mesures faites sur un modèle ont montré que l'intensité de champ où les effluves apparaissent dépend de l'épaisseur de la couche d'air. L'emploi de fortes pressions pour la fabrication des isolants feuilletés permet de comprimer les couches d'air de façon qu'elles ne soient plus dangereuses pour les contraintes de service. La courbe du facteur de perte $\text{tg } \delta$ en fonction de la tension renseigne sur la qualité du diélectrique. Les courbes 1 et 2 de la figure 7 sont des caractéristiques d'isolants contenant beaucoup d'air. La courbe 3 est la caractéristique d'une isolation moderne d'encoches. Des isolations qui, d'après leur caractéristique, devaient contenir beaucoup d'air, ont supporté pendant des années des contraintes électriques sans qu'il se produise de perforation de l'isolation des encoches.

c) Influence de l'humidité.

Des isolations haute tension sont sensibles à l'humidité. Il faut les protéger par des mesures spéciales les mettant à l'abri de l'humidité (verniss spéciaux, fermeture étanche). Ces mesures ne sont pas toujours efficaces. Le montage des alternateurs dans des lieux humides et de longues mises hors service sont des cas pratiques dans lesquels l'humidité peut jouer un rôle perturbateur. Pour se faire une idée de l'in-

fluence de l'humidité, des barreaux d'un alternateur de 10 kV montés dans des encoches comme dans le cas réel, ont été soumis constamment à une forte humidité relative, atteignant 97 %. La courbe de la résistance au courant continu en fonction du temps (fig. 8) permet de conclure que l'humidité a pénétré dans l'isolant. Le revêtement des encoches en papier imprégné vernis a absorbé particulièrement beaucoup d'humidité en peu de temps. La mesure de la conductibilité pour le courant continu donnée à la figure 9, même pour les tensions élevées, montre que l'isolation a absorbé de l'humidité. Il est étonnant de constater que les caractéristiques de l'isolation, intéressantes pour l'exploitation, telles que le coefficient de pertes, ne sont pas influencées par un long séjour à l'air humide, comme le prouve le tableau I. L'absorption d'humidité de cette isolation est si faible qu'elle ne peut être décelée que par des mesures avec du courant continu.

TABLEAU I.

Influence de l'humidité sur l'isolation au mica des encoches.

Coefficient de perte à 50 pér/s.

Etat de l'isolation	$\varepsilon \cdot \text{tg } \delta$
Etat initial à 20° C	0,18
Mesure à 100° C	1,07
Refroidi à 25° C	0,18
Après six mois d'exposition à l'air humide	0,17
Mesure à 100° C	1,05
Refroidi à 25° C	0,16

Une comparaison avec une isolation hygroscopique, par exemple le papier imprégné, confirme cette manière de voir (fig. 10).

2° ISOLATION DES ENCOCHES SANS MICA.

La guerre qui se prolonge entraîne la rareté de certaines matières isolantes. Le mica, un des isolants les plus employés dans la construction des machines électriques, et provenant des pays d'outre-mer, doit être remplacé par des produits appropriés. De telles matières de remplacement sont donc employées pour l'isolation des encoches dont le principal composant était avant la guerre le mica. Dans la figure 11 on a reporté, en fonction de la température, le coefficient de pertes des différentes matières isolantes qui entrent en ligne de compte pour l'isolation des encoches.

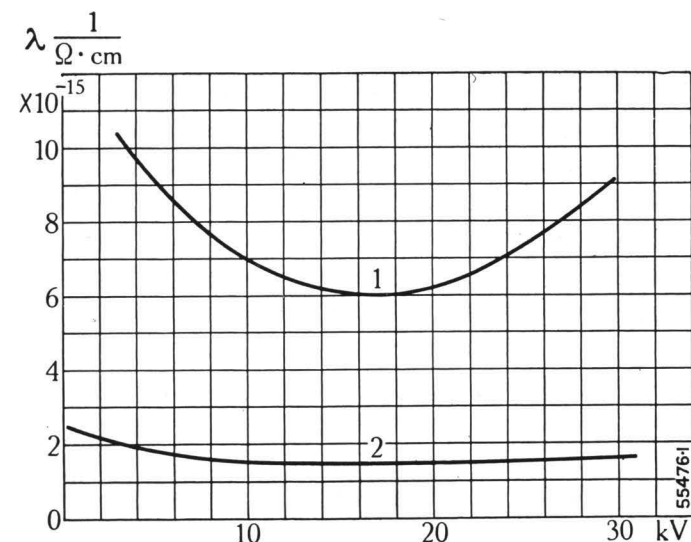


Fig. 9. — Influence de l'humidité sur une isolation d'encoche contenant du mica. Conductibilité pour courant continu en fonction de la tension.

1 = Après 7 mois d'exposition à l'air humide.

2 = Après chauffage à 100° C après 7 mois d'exposition à l'air humide.

Les mesures ont été faites à l'état froid.

Le triacétate de cellulose, qui est employé surtout à l'étranger comme remplaçant du mica a des pertes pratiquement aussi faibles que les isolations d'encoches au mica. Des recherches ont toutefois montré, que, sous l'influence de la chaleur, ce matériel dégage de l'acide acétique, inconvénient de tous les acétates de cellulose. De meilleurs résultats ont été obtenus à ce point de vue avec un comprimé de papier spécial imprégné de vernis à l'asphalte. Si le coefficient de pertes de ce dernier isolant est un peu plus élevé que celui du comprimé «Triafol», il présente une résistance plus élevée aux effluves (fig. 12). Mentionnons que les mêmes constatations ont été faites à l'étranger sur le «Triafol» et que l'on remédie à la faiblesse de cet isolant en faisant travailler les alternateurs dans des gaz comprimés.

Dans la construction des machines, on recherche un comprimé qui soit le plus élastique possible à cause des fortes contraintes mécaniques auxquelles

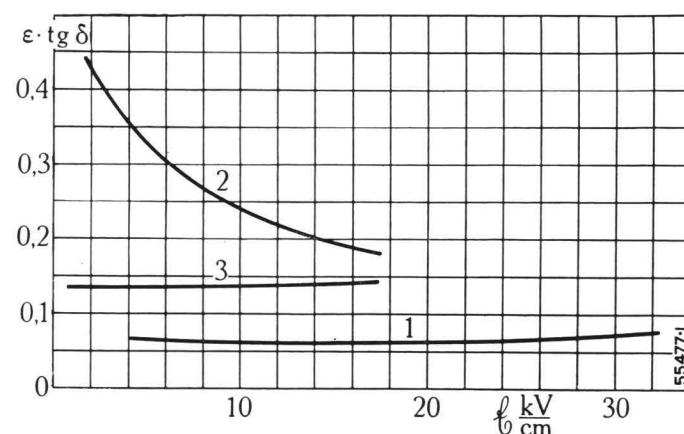


Fig. 10. — Influence de l'humidité sur différents isolants. Coefficient de pertes en fonction de l'intensité du champ électrique lors de contraintes sous tension alternative.

1 = Isolation d'encoche contenant du mica après 7 mois d'exposition à l'air humide (humidité relative atteignant 97 %).

2 = Papier imprégné à l'état humide.

3 = Papier imprégné après séchage à l'air chaud. Le papier n'avait pas été protégé contre l'humidité par le vernis habituel.

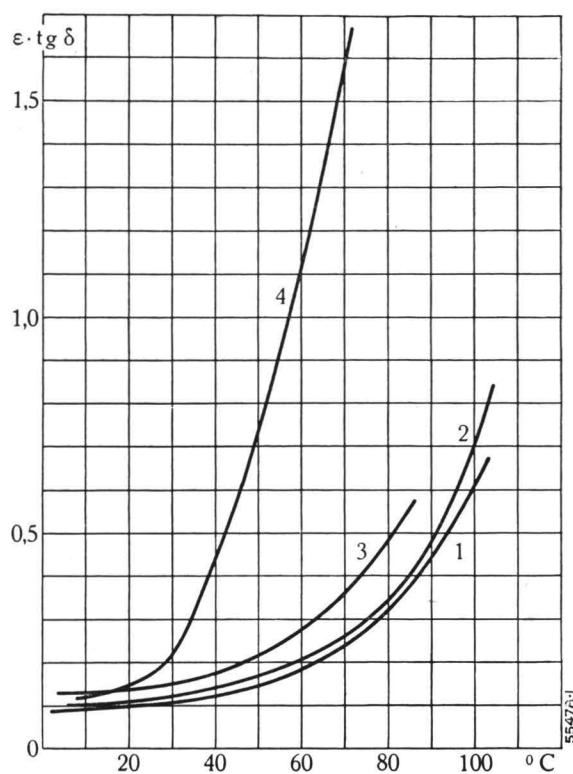


Fig. 11. — Coefficient de perte de différentes isolations d'encoche en fonction de la température.

- 1 = Nouvelle isolation contenant du mica.
- 2 = Isolation au triacétate.
- 3 = Isolation sans mica, agglomérée avec un vernis à l'asphalte.
- 4 = Isolation ordinaire à la gomme laque.

l'isolant est soumis lorsque l'enroulement est parcouru par des à-coups de courant de la grandeur des courants de court-circuit. La formation des fissures les plus fines même invisibles à l'œil nu peut entraîner une perforation de l'isolant. D'ingénieurs dispositifs d'essais permettent de juger et de classer les matériaux selon ce nouveau critérium. Des résultats d'essais particulièrement probants montrent que l'isolation sans mica dont nous avons parlé n'est pas inférieure au comprimé au mica à ce point de vue, mais qu'elle lui est même supérieure en ce qui concerne la flexibilité. Pendant les deux essais qui ont été poussés jusqu'à la rupture ou à la perforation de l'isolant, les deux comprimés étaient soumis à une tension de 20 000 V: Les mesures du tableau II ont été faites avec des isolants froids et chauds. Les résultats donnés sont ceux qui ont été obtenus avec la direction de la contrainte la plus défavorable.

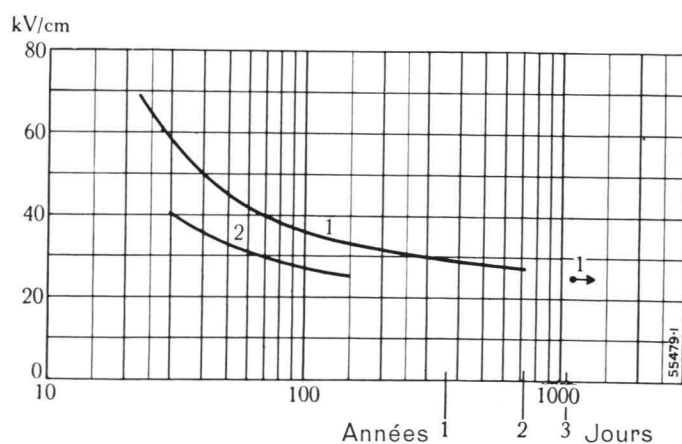


Fig. 12. — Résistance aux effluves d'une isolation d'encoche avec mica. Résistance à la perforation en fonction de la durée de la contrainte. Les échantillons étaient soumis jusqu'au moment de la perforation à une contrainte de tension alternative exagérée.

- 1 = Papier spécial aggloméré avec un vernis à l'asphalte.
- 2 = Comprimé de triacétate.

L'isolation supporte mieux un effort perpendiculaire au côté plat du barreau.

TABEAU II.

Essai de flexion d'un barreau isolé avec ou sans mica.

Isolant	Epaisseur ¹⁾ de l'isolant en mm	Température d'essai °C	Δ Flexion maximum ²⁾ en mm
Sans mica	2,83	18	10,4
	2,95	18	12,0
	2,98	100	17,1
	3,03	100	24,0
Avec mica (50 %)	2,78	18	6,9
	2,84	18	5,6
	2,87	100	14,4
	2,88	100	20,7



Mentionnons aussi la résistance relativement élevée de l'isolant sans mica à la perforation. D'après le tableau III, elle est environ 80 % de celle que présentent les barreaux isolés avec un comprimé au mica.

TABEAU III.

Intensité du champ en kV par cm provoquant la perforation de quelques isolants d'encoche.

Barreau d'essai et isolant	Résistance pendant 1 min	Résistance pour application brusque de la tension
Barreau spécial (champ homogène) K-Fol (avec mica)	—	380
Barreau normal K-Fol	240	270
Barreau normal Triafol	—	230
Barreau normal papier C	200	220
Câble dans l'huile (à titre de comparaison)	—	450

L'industrie des câbles calcule même avec des valeurs plus élevées. Cependant, des recherches dont le résultat ne sera qu'indiqué ici, ont montré que pour la construction des machines ce n'est pas la résistance à la perforation qui présente le plus de difficultés, mais bien plutôt la résistance au contournement à la sortie des encoches.

3° ISOLATION A L'EXTRÉMITÉ DES ENCOCHES.

De même que dans la construction des câbles, il faut éviter les contournements aux extrémités par des boîtes d'extrémité, il faut protéger chaque conducteur à la sortie des encoches contre les décharges perturbatrices. Les difficultés sont beaucoup plus grandes dans les machines que dans les câbles à cause, d'une part, de l'encombrement réduit et, d'autre

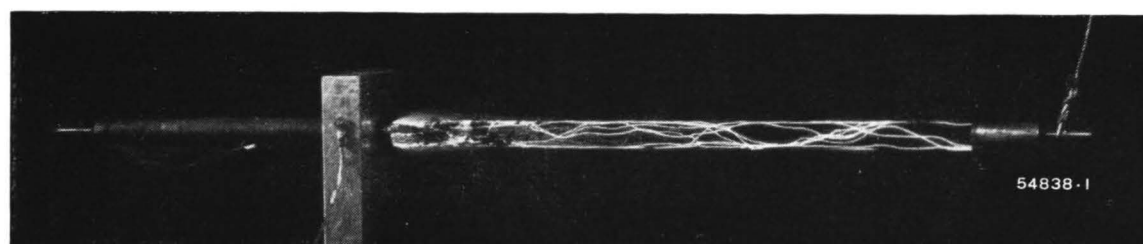


Fig. 13. — Contournement sur un barreau d'essai d'une machine de 50 kV.

La partie de gauche du barreau était pourvue d'une protection contre les effluves. Même pour une tension effective de 120 kV, il ne se produisit aucune décharge. Le côté droit avec une longueur d'isolant trois fois plus grande, mais sans protection contre les effluves, présentera déjà de violents contournements.

part, des contraintes mécaniques auxquelles l'isolant est soumis du fait des variations de longueur lors de changement de température.

Trois exemples montreront les résultats intéressants auxquels nos recherches nous ont amenés.

Lors de la mise au point de l'isolation d'un turbo-alternateur de 36 000 V, nous avons construit un modèle de grandeur naturelle de l'enroulement du stator. La protection contre les décharges glissantes à la sortie des encoches avait été établie en se fondant sur des notions nouvelles. Après 40 essais d'une minute avec une tension de 72 000 V, on n'a pu constater aucune modification visible ou mesurable. Après avoir été exposé pendant 10 ans dans un local poussiéreux et humide, le modèle fut de nouveau soumis à des essais de tension sans avoir été séché, mais après que la poussière eut été enlevée sur l'enroulement. On constata avec satisfaction qu'il supportait encore une tension de 72 000 V. Cet essai confirma la constatation faite dans le paragraphe 1 c que les caractéristiques déterminantes d'un diélectrique ne sont presque pas influencées par une longue exposition à l'humidité.

Nous avons poursuivi, ces derniers temps, les recherches sur les alternateurs à très haute tension. La figure 13 montre les résultats obtenus. La partie de gauche du barreau est munie de la nouvelle protection contre les effluves et ne présente aucune décharge, malgré la plus faible longueur de l'isolant par rapport à la partie de droite du barreau. La nouvelle protection contre les effluves est aussi efficace lors d'impulsions de tension comme le montre le tableau suivant:

TABLEAU IV.

Tension de contournement au choc de barreaux d'alternateur avec et sans protection contre les effluves.

		Avec protection contre les effluves en kV valeur d'amplitude	
Onde de choc 1,0/50 μ s	Positive	60	120
	Négative	68	95

Le problème de l'isolation des machines ne peut pas être traité à fond dans ce numéro spécial. Rappelons encore la résistance au choc des machines complètes en corrélation avec la coordination de leur isolement.¹⁾

¹⁾ Page 286 de ce numéro.

4^o CONSOLIDATION DE L'ENROULEMENT.

Il n'y a pas que la sortie des encoches qui posent des conditions intéressantes pour la surface de l'isolation au point de vue résistance aux effluves. Les

TABLEAU V.

Résistance à la température et résistance à la perforation de divers isolants.

Matériaux	Résistance à la température en °C	Résistance à la perforation ¹⁾ en kV/cm valeur efficace
Luvikan	< 150	130
Papier imprégné	env. 150	90
Bois dur imprégné	> 150	50
Amiantite	> 150	13

¹⁾ Parallèlement aux couches pour les matériaux feuilletés.

supports de l'enroulement contre le fer et entre les différentes parties de l'enroulement doivent avoir,

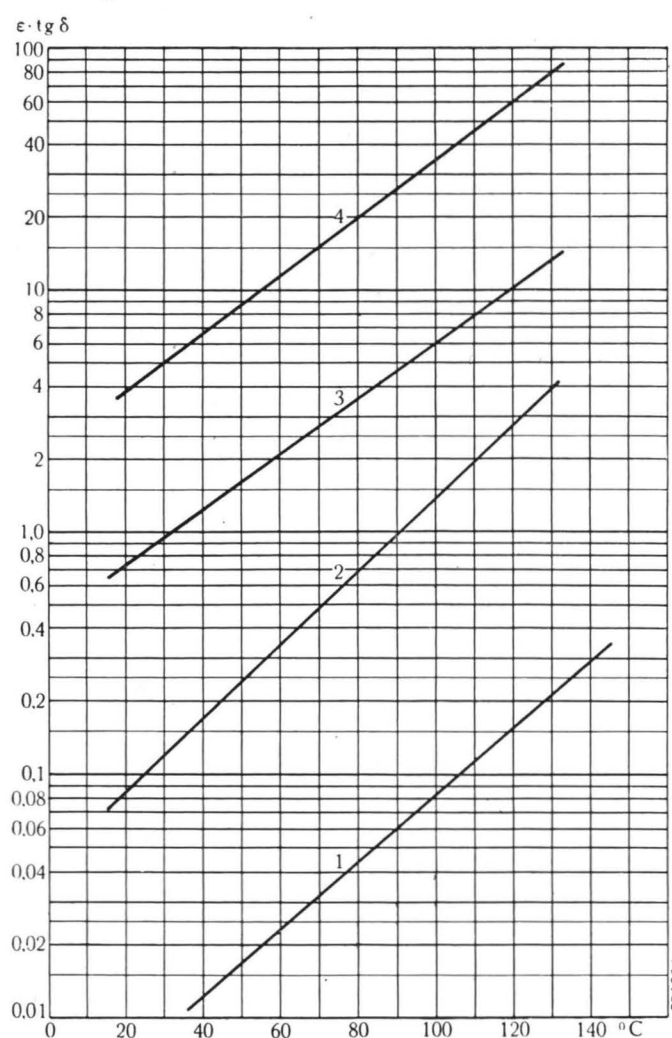


Fig. 14. — Coefficient de perte en fonction de la température de divers isolants.

1 = Luvikan. 3 = Bois dur imprégné.
2 = Papier imprégné. 4 = Amiantite.

outre une certaine isolation électrique, une résistance mécanique suffisante. C'est une des tâches du constructeur de choisir parmi les nombreux matériaux à

disposition, aux caractéristiques si différentes, celui qui convient le mieux. Ce problème n'est souvent pas facile à résoudre, comme le montre une comparaison entre les données de la figure 14 et du tableau V.

Le Luvikan, qui a les pertes diélectriques les plus faibles, a la moindre résistance à la chaleur. L'amiante, en revanche, résiste bien à la chaleur, mais a une résistance très faible à la perforation. Il y a beaucoup d'isolants de qualité, mais, en pratique, ils doivent encore remplir une condition spéciale, dans la plupart des cas, avoir une résistance mécanique élevée aux hautes températures, ce qui diminue beaucoup le nombre des matières qui peuvent être employées. On ne connaît pas de matière isolante d'un emploi général en électrotechnique.

5° ISOLATION DES SPIRES.

Dans un des chapitres précédents, nous avons dit quelques mots de la résistance aux effluves de l'isolation des encoches. Nous avons, au cours de ces dernières années, fait de nouvelles recherches sur l'isolation des spires et avons étudié sa résistance aux effluves. C'était dans les minces couches d'air entre les couches de mica de l'isolation des encoches que se produisaient les effluves, même s'ils sont absolument inoffensifs. Il n'est pas possible d'éviter par des procédés de fabrication que des poches d'air relativement grandes se produisent dans l'isolation des spires, particulièrement entre les fils. Les hautes tensions employées actuellement peuvent soumettre ces poches d'air à des contraintes provoquant une ionisation par chocs. Nos recherches, qui ont duré des années et ont porté sur les matériaux les plus divers, ont donné en partie des résultats inattendus. Les recherches ont été faites sur des modèles correspondant aux conditions de la pratique (fig. 15 et 16 f). Les fils essayés étaient enveloppés dans une isolation en papier imprégné représentant l'isolation de l'encoche. En raccordant ces tuyaux à une pompe ou à un appareil thermique, on reproduisait les diverses conditions d'exploitation. En service normal, ce n'est qu'après des années que des perturbations par effluves se faisaient remarquer. Afin d'obtenir des résultats dans un délai utile, il fallut élever les contraintes bien au-dessus des valeurs normales. C'est pour cette raison que les modèles furent soumis à

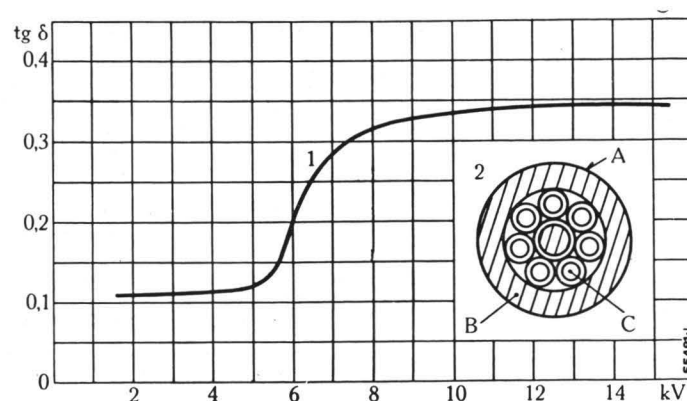


Fig. 15. — Modèle d'essai pour rechercher l'influence des effluves sur l'isolation des fils.

- 1 = Facteur de perte en fonction de la tension.
- 2 = Modèle d'essai en coupe.
- A = Recouvrement de métal mis à la terre.
- B = Tuyau de 3 mm d'épaisseur en papier imprégné.
- C = Fil mis sous tension.

une tension de 9 kV, contrainte qui provoqua, selon la figure 15, de forts effluves. Comme il s'agit de mesures relatives, servant surtout à éliminer les matériaux ne convenant pas, il n'y a pas d'inconvénient à employer des contraintes exagérées.

Dans une série d'essais faits sur des barreaux, on a obtenu des différences frappantes dans le genre et la grandeur des détériorations. On voit clairement sur la figure 16 que les détériorations dépendent surtout de la nature du conducteur métallique. Avec le conducteur de cuivre (fig. 16 a), il y a eu une forte formation de sels de cuivre, c'est un nitrate de cuivre $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ et pas de vert de gris qui est un acétate de cuivre basique. La formation de rouille sur le conducteur de fer (fig. 16 b) est fortement accélérée par l'ionisation. Si la ventilation est complètement supprimée, c'est-à-dire s'il n'y a aucun renouvellement de l'air, l'isolation de papier et le conducteur métallique restent intacts.

Les résultats d'une série d'essais pour la détermination de l'influence des traitements préalables furent intéressants. Les modèles étaient de nouveau soumis à une tension alternative de 9 kV. La figure 17 montre les modèles après 40 jours d'essai; ils avaient tous la même isolation, papier et coton mais avaient subis des traitements différents. La figure 17 b est particulièrement intéressante, pendant toute la durée de l'essai le modèle était légèrement ventilé. La couche coton a été coupée par le bombardement de ions et toutes les couches de papier ont été perforées. Comme le montrent les figures 17 e et f, une isolation imprégnée d'humidité ne présente, contrairement à ce qu'on pouvait attendre, aucune détérioration notable. La couche coton (fig. 17 e) comme le papier et le conducteur (fig. 17 f) ne sont pas

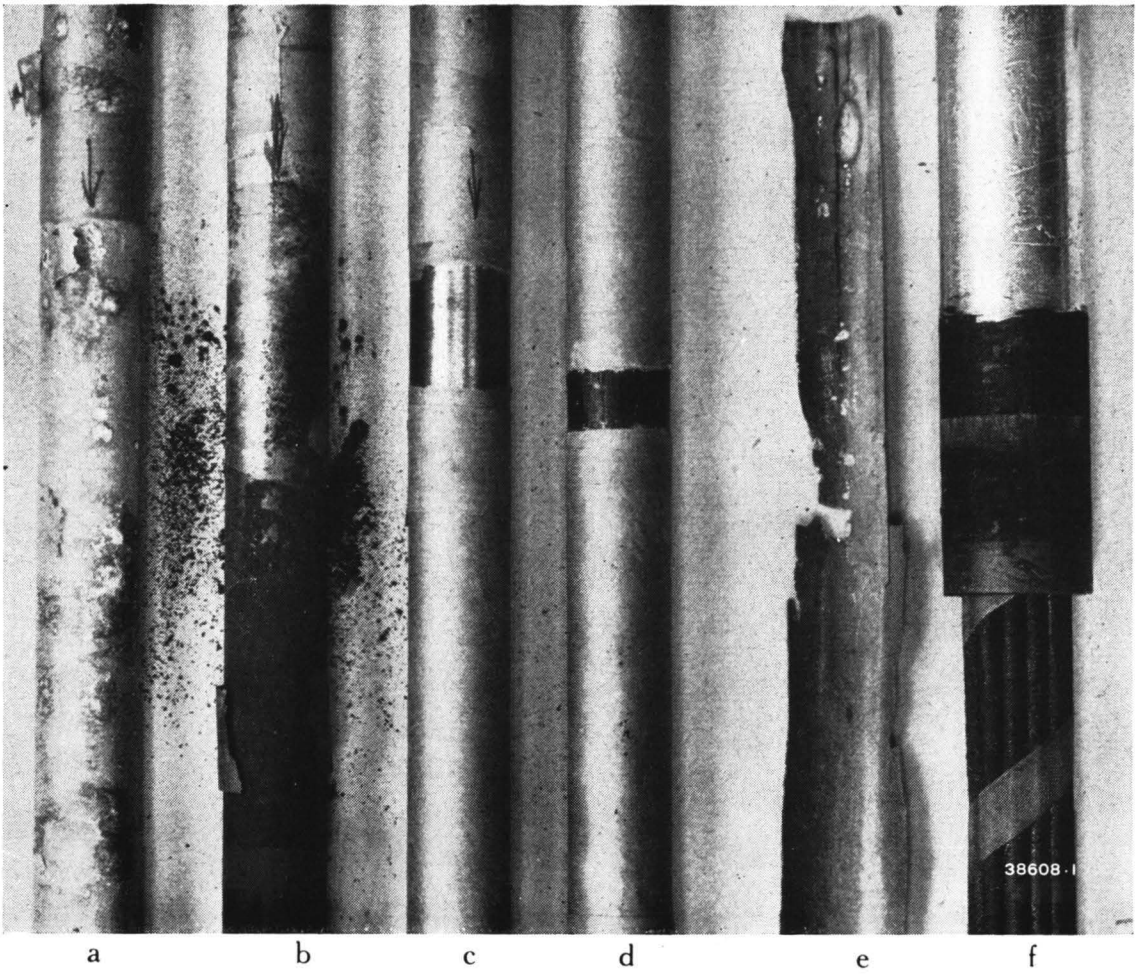


Fig. 16. — Influence de la nature du conducteur sur la résistance aux effluves de l'isolation des fils.

- a = Conducteur en cuivre, modèle fortement ventilé pendant l'essai.
 - b = Conducteur en fer, modèle fortement ventilé pendant l'essai.
 - c = Conducteur en fer sans ventilation pendant l'essai.
 - d = Tube de papier imprégné, verni au noir de fumée, modèle fortement ventilé pendant l'essai.
- (Les conducteurs de a à d sont enveloppés dans une isolation en papier non imprégné.)
- e = Revêtement en presspan.
 - f = Modèle d'essai.

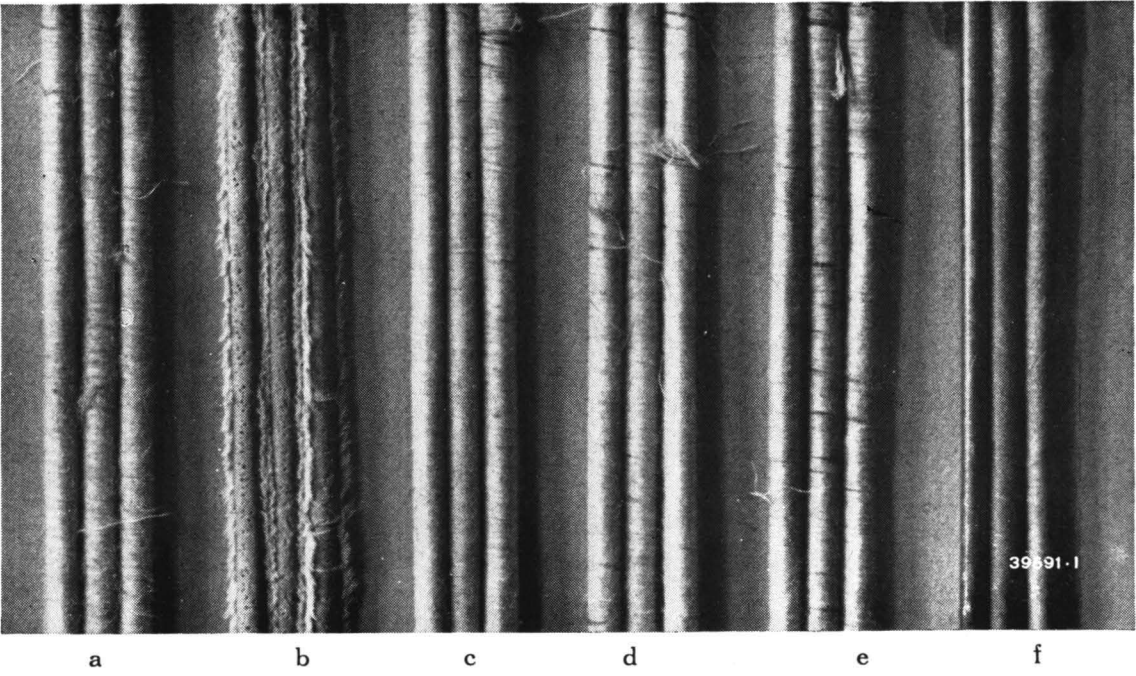


Fig. 17. — Influence du traitement sur la résistance aux effluves des fils isolés au papier.

Modèle	Traitement	Conditions d'essai
a	Séché 24 h à 110 ° C	Pas de ventilation
b	Séché 24 h à 110 ° C	Faible ventilation
c	Exposé 6 jours à une humidité de 100 %	Pas de ventilation
d	Non traité	Pas de ventilation mais exposé continuellement à une humidité de 100 %
e, f ¹⁾	Plongé 48 h dans l'eau	Pas de ventilation

¹⁾ e = Isolation complète. f = Couche de coton enlevée après l'essai.

détériorés. Des différences aussi marquantes font ressortir toutes les possibilités que le traitement des matériaux offre à l'ingénieur.

Pour terminer ce chapitre, mentionnons encore quelques résultats d'essais montrant le succès des recherches ci-dessus. Le matériel essayé, du coton et du papier, était donc composé surtout de cellulose, une matière naturelle polymère. Sous l'effet de forts effluves, il se produit dans les poches d'air des réactifs, tels que l'ozone ou l'oxyde nitrique. Ces agents oxydants détruisent la cellulose non protégée en la transformant en oxyde de cellulose. Comme le montre le tableau VI, un traitement spécial de l'isolation et du conducteur permet de rendre 10 fois plus long le temps nécessaire à l'apparition de la première détérioration.

TABLEAU VI.

Essais sous effluves d'isolations de fil après divers traitements.

Matériel et traitement	Temps après lequel des perturbations par forts effluves ont été constatées.
Isolation au coton	■ 6 jours
Papier et coton non imprégnés	■■ 11 jours
Papier et coton imprégnés	■■■■ 7 semaines
Papier spécial vernis, conducteur traité	■■■■■■■■ 4 mois

Lors de ces essais on ne tint pas compte, bien entendu, que des phénomènes en régime stationnaire, effluves, mais aussi de la résistance à la perforation. Dans la première partie de cet article, nous avons rappelé que l'isolation des spires pouvait être soumise en service à de fortes contraintes par impulsion. On s'efforça donc aussi d'élever la résistance aux perforations par ondes de choc. Ces deux pro-

priétés ne vont pas non plus de pair comme le montrent les exemples du tableau VII.

TABLEAU VII.

Résistance aux effluves et aux perforations de deux isolations de fils.

Matériaux	Résistance aux perforations kV efficace/cm \rightarrow Résistance aux effluves (jours) ■
Papier imprégné avec un mélange de paraffine et d'acide sébacique	<div> <div style="width: 80%;"></div> <div style="width: 10%;"></div> </div> <div> <div style="width: 10%;"></div> <div style="width: 10%;"></div> </div> <div>550</div> <div>13</div>
Isolation au papier traitée avec un vernis spécial	<div> <div style="width: 30%;"></div> </div> <div> <div style="width: 80%;"></div> <div style="width: 10%;"></div> </div> <div>310</div> <div>61</div>

6° INFLUENCE DE L'AMÉLIORATION DES ISOLANTS SUR LA CONSTRUCTION DES ALTERNATEURS.

Les quantités de matières isolantes sont notablement plus fortes qu'on ne les estime. Par exemple, dans un alternateur de 7 kV, l'isolation dans laquelle le conducteur est noyé occupe plus de la moitié du volume de l'encoche. Il est intéressant de réduire ce volume non seulement pour économiser un isolant coûteux, mais surtout pour augmenter la puissance. Une réduction d'un millimètre de l'épaisseur de l'isolant d'une machine de 7 kV a pour conséquence une augmentation de la puissance du type d'environ 20 %. En s'appuyant sur le fait qu'une machine moderne de 15 kV n'a qu'une isolation de 4 mm d'épaisseur alors que la première machine de 13 kV avait une isolation de 7,5 mm, on peut affirmer avec certitude que des progrès importants ont été réalisés dans le domaine de l'isolation des machines.

(MS 975)

Fr. Beldi. (J. C.)

LE PAPIER, ISOLANT POUR LES HAUTES TENSIONS.

Indice décimal 621.315.614.6.027.3

Pour commencer on montre comment les échantillons de papier doivent être formés pour rechercher scientifiquement leurs propriétés. Ensuite l'auteur décrit le processus physique qui sert à faire l'apprêt des échantillons de papier et des transformateurs complets. Les résultats des examens du papier ainsi préparé sont favorables. Les facteurs de pertes relevés furent d'environ 0,006 à 90° et les tensions critiques, calculés au moyen des grandeurs diélectriques mesurées, sont de 1200 kV à 20° et 700 kV à 90°. Un exemple d'une isolation de papier imprégné avec du gaz comprimé montre l'influence favorable d'un produit de haute valeur pour l'imprégnation du papier. Ce n'est qu'en tenant compte de l'influence de l'isolation sur la grandeur et la qualité des machines à haute tension que les résultats des essais mentionnés révèlent toute leur valeur pratique.

Les recherches pour la détermination des propriétés du papier seul ou en combinaison avec les produits servant à son imprégnation, par exemple l'huile minérale et les gaz comprimés, se révèlent comme une activité variée, qui acquiert une importance toute spéciale par la place que le papier a prise dans la technique des hautes tensions par suite de ses remarquables qualités comme isolant.

Les essais commencent par la
sélection

du papier utilisé comme isolant. La plupart du temps, le papier est fabriqué avec de la cellulose de bois, dont le grain est plus ou moins fin. Selon les méthodes chimiques de fabrication, on obtient du papier de cellulose à la soude ou de cellulose au sulfite.

Après le choix du papier, la
conformation

des modèles, utilisés pour les essais, révèle l'habileté et l'expérience avec lesquelles ils sont conduits. Pour mesurer les propriétés spécifiques des matériaux, on utilise de préférence de petits modèles en forme de cylindre ou de plaques, faciles à manier et souvent confectionnés en grands nombres. Pour étudier l'effet d'autres influences, on utilise souvent des modèles de papier de grande longueur ou de forte épaisseur et même des modèles complets de dispositifs d'isolation de machines, et plus particulièrement de transformateurs. Il est très difficile et souvent même impossible d'obtenir un claquage en champ homogène sur un modèle qui n'a pas une forme spéciale, car les hautes tensions nécessaires au claquage donnent lieu soit à des contournements de l'isolation solide, soit à des étincelles glissantes qui détruisent auparavant l'isolation.

Comme la théorie et les essais montrent que les propriétés diélectriques d'un papier et des moyens d'imprégnation dépendent de leur traitement préliminaire, les matériaux d'isolation subissent

un apprêt.

Par apprêt, on désigne une méthode physique caractérisée par des pressions, température et temps variables, et qui a pour but de sécher et de dégazer ces matériaux. Pour l'huile, il s'y ajoute encore une augmentation de surface par pulvérisation.

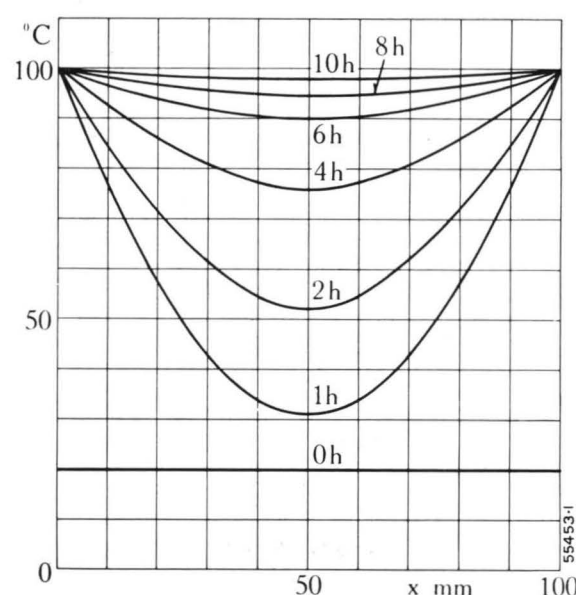


Fig. 1. — Répartition des températures dans une plaque de papier de 100 mm chauffée à 100°C sur ses deux faces avec le temps comme paramètre, après 1, 2, 4, 6, 8 et 10 h de chauffage.

Avec une température initiale de 20°C (0 h), après 8,1 heures, le milieu de la plaque a atteint 95 % de la température extérieure. A cause de son faible pouvoir de transmission de la température, la plaque de papier, pendant un apprêt, ne s'échauffe que très lentement car il faut beaucoup de temps à la chaleur pour la pénétrer.

Le procédé le plus avantageux n'a pas été déterminé seulement expérimentalement, mais aussi contrôlé par le calcul dans ses développements. Ainsi, on pourrait s'attendre à ce que le papier ne se chauffe que très lentement. L'étude mathématique montre que le papier par suite de sa conductibilité calorifique très faible appartient, même parmi les isolants thermiques, à ceux qui montrent le plus d'inertie à la pénétration de la chaleur. Comme exemple, la figure 1 montre la répartition des températures dans une plaque de papier de 100 mm d'épaisseur, chauffée à 100°C sur ses deux faces. Le temps a été choisi comme paramètre des différentes courbes.

La température en un point et à un temps donnés est déterminée par la formule suivante :

$$\vartheta = 100 - \frac{320}{\pi} \left[\sin \left(\frac{\pi}{s} x \right) e^{-0,37 t} + \frac{1}{3} \sin \left(\frac{3\pi}{s} x \right) e^{-3,33 t} + \frac{1}{5} \sin \left(\frac{5\pi}{s} x \right) e^{-9,25 t} + \dots \right] \quad (1)$$

où ϑ = température en $^{\circ}\text{C}$.

t = temps en h.

s = épaisseur de la plaque = 100 mm.

x = distance du point à la face gauche de la plaque.

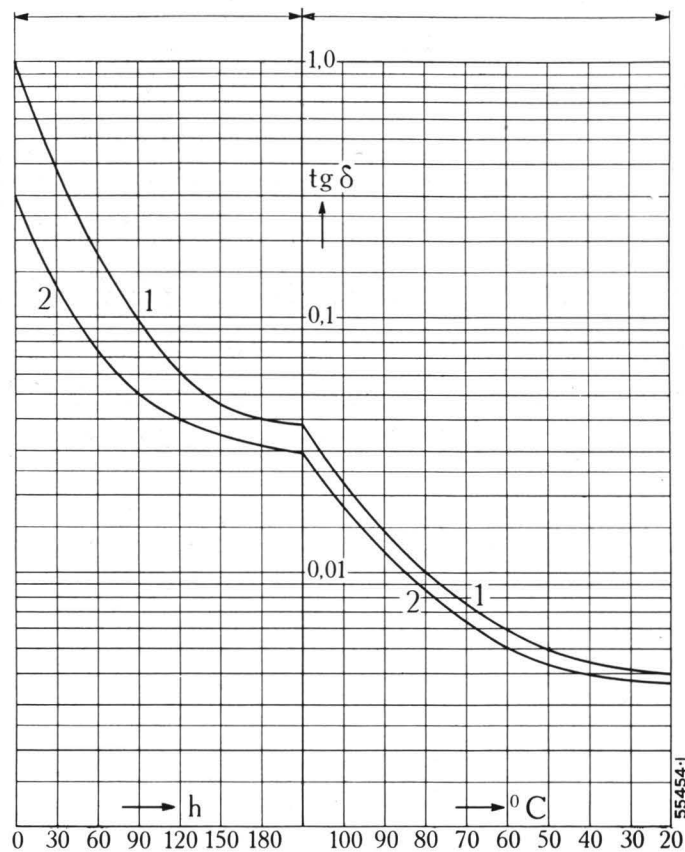


Fig. 2. — Facteur de pertes de l'isolation au papier.

A gauche: en fonction de la durée de séchage à 110°C .

A droite: en fonction de la température pendant le refroidissement.

Les courbes de gauche montrent la réduction appréciable du facteur de pertes grâce à l'échelle logarithmique de l'ordonnée. Une autre diminution intervient encore lors du refroidissement, courbes de droite.

1 = Papier poreux.

2 = Papier compact.

Le résultat favorable obtenu par un *apprêt convenable* est visible sur la figure 2. La partie de gauche représente les variations des facteurs de pertes de deux cylindres de papier de qualités différentes, pendant leur séchage à 110°C dans une étuve. La partie de droite montre la diminution des facteurs de pertes après le séchage lors du refroidissement.

La figure 3 montre l'installation de contrôle, à titre d'essai, du processus de l'apprêt d'un transformateur à très haute tension. Le séchage est obtenu au moyen de ventilateurs qui aspirent de l'air

Fig. 3. — Installation d'essai pour le séchage et pour le mesurage des pertes diélectriques comme contrôle du processus de séchage.

Comme ce transformateur d'essai pour très hautes tensions est une première exécution, le séchage a été contrôlé dans la fabrique par des mesures fréquentes.

qui, après réchauffage, est chassé dans le transformateur. Des manomètres à liquide contrôlent le débit d'air, tandis que les propriétés diélectriques du transformateur sont mesurées avec l'appareillage de mesure, à gauche sur la figure, par comparaison avec un condensateur à gaz comprimé.

Ce ne sont pas seulement les dispositifs d'essais qui se sont développés, mais aussi les installations des ateliers de fabrication qui permettent l'apprêt optimum des plus gros transformateurs. Ainsi, la figure 4 montre un four horizontal dans lequel on peut mettre des transformateurs s'inscrivant complètement dans le gabarit des chemins de fer, au moyen d'une plate-forme de service de plus de 6 m de long. Le four lui-même est pourvu de toutes les installations qui sont nécessaires au séchage, au dégazage, à l'imprégnation, ainsi qu'à la surveillance de ces processus.

Lorsque nous étudierons ci-dessous plus en détails les

propriétés diélectriques du papier

nous admettrons l'accroissement de la tension de claquage comme but évident et connu, et nous ne nous occuperons plus que des propriétés diélectriques spécifiques. Ces dernières dépendant essentiellement du facteur de pertes et de son coefficient de température; nous considérerons les principes de physique que pour autant qu'ils sont nécessaires à la compréhension du phénomène et représenterons l'influence des caractéristiques des matériaux à l'aide d'un graphique simple.

Les pertes diélectriques engendrent dans l'isolant un échauffement qui est, la plupart du temps, très faible.



Mais comme en général les pertes diélectriques croissent avec la température, l'échauffement qu'elles provoquent est à son tour la cause de leur augmentation. Dès que la dissipation de la chaleur dégagée par les pertes ne suffit plus, la température monte jusqu'à ce que le matériau se carbonise et claque. La tension limite inférieure pour laquelle ce phénomène apparaît est appelée « *tension critique* ». C'est une constante pour des diélectriques d'une qualité donnée. On peut démontrer de façon exacte¹⁾ que si les pertes diélectriques sont proportionnelles au carré de la tension, toute augmentation d'épaisseur de la couche isolante est compensée par une diminution de

¹⁾ Voir K. Berger: « La rigidité diélectrique à chaud des isolants solides », Revue Brown Boveri, mai 1926, page 115.

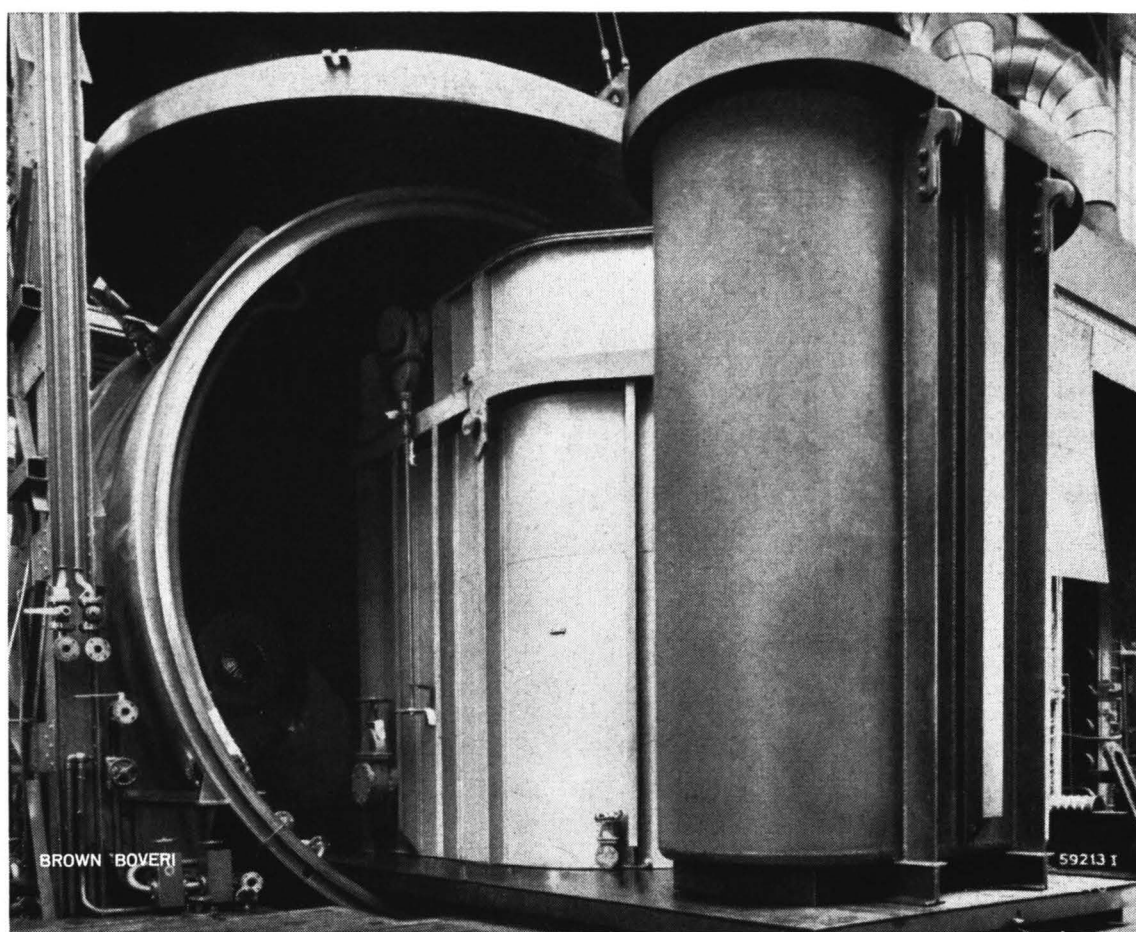


Fig. 4. — Four pour le séchage, le traitement par le vide et l'imprégnation des transformateurs.

La porte à commande hydraulique assure par ses joints étanches une fermeture hermétique.

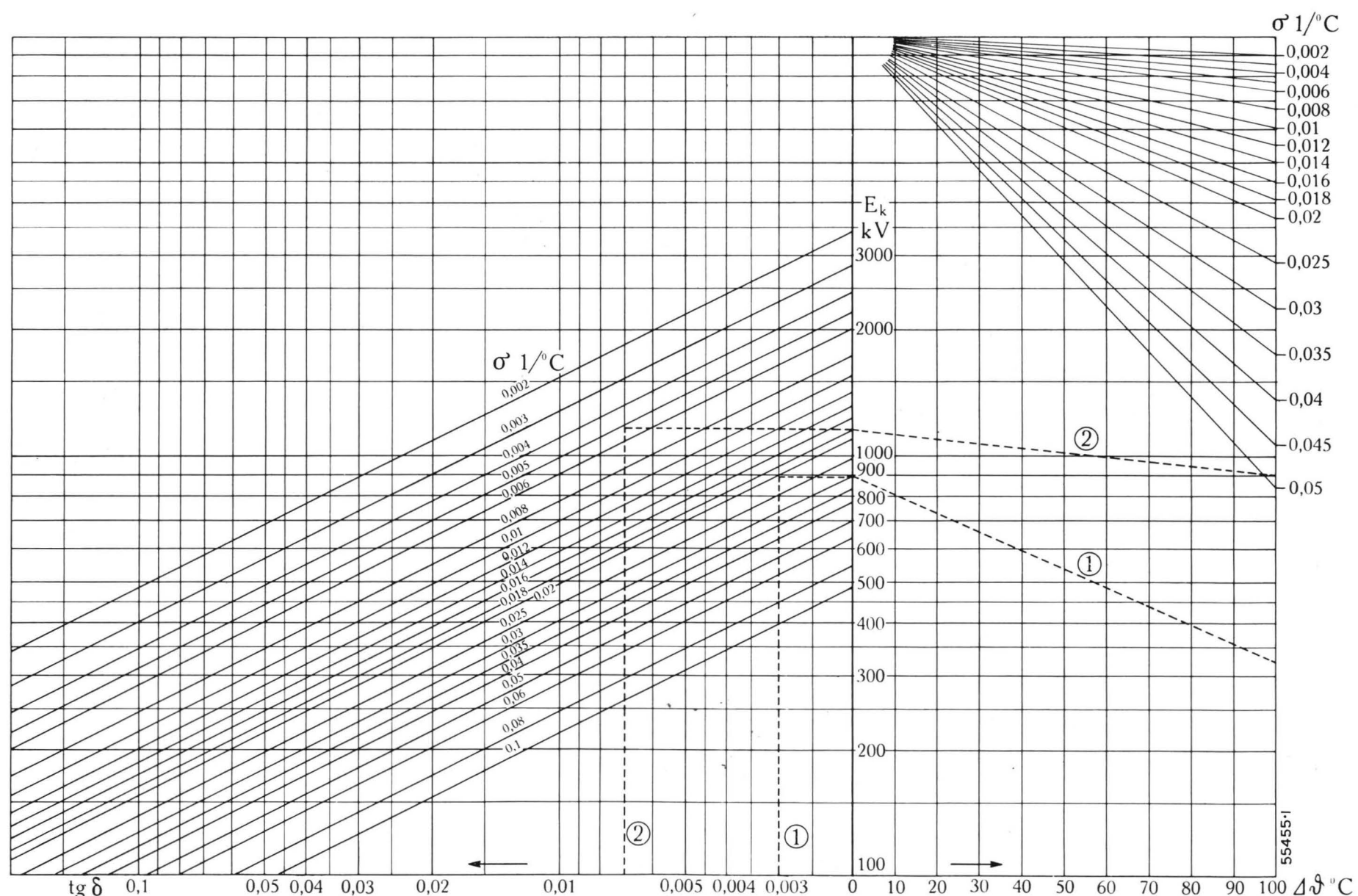


Fig. 5. — Nomogramme pour déterminer rapidement la tension critique d'une plaque isolante refroidie par des deux faces pour un domaine étendu des grandeurs diélectriques.

A gauche : en fonction du facteur de pertes ($\text{tg } \delta$) avec le coefficient de température (σ) comme paramètre.

A droite : en fonction de l'élévation de température ($\Delta \theta$) avec le coefficient de température (σ) comme lignes directrices paramétriques.

la quantité de chaleur dissipée, de sorte que la tension de claquage ne peut pas être élevée par l'augmentation de l'épaisseur de l'isolation.

Il est clair que la «tension critique» dépend de la valeur des pertes diélectriques et par là du facteur de pertes $\text{tg } \delta$. Mais l'augmentation des pertes diélectriques avec la température en est le facteur décisif¹⁾. Le coefficient de température est ainsi le plus important facteur pour estimer la qualité du matériau.

La figure 5 montre clairement quelle est l'influence des deux facteurs $\text{tg } \delta$ et σ sur la tension critique. Elle représente la tension critique d'une plaque refroidie par ses deux faces. Dans l'exemple 1, pour un facteur de pertes $\text{tg } \delta = 0,003$ et un coefficient de température $\sigma = 0,02$, la tension critique est d'environ 900 kV. Après un examen superficiel, le matériau de l'exemple 2 serait considéré comme étant de qualité inférieure avec un facteur de pertes de plus du double $\text{tg } \delta = 0,007$, mais avec un coefficient de température $\sigma = 0,005$ il accuse une tension critique de 1170 kV.

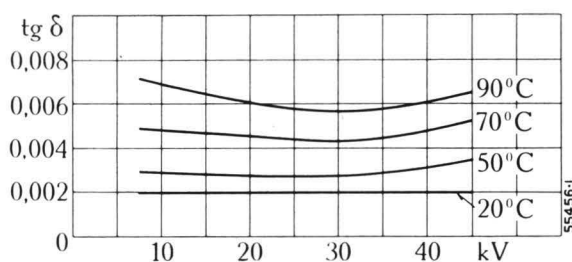


Fig. 6. — Facteur de pertes $\text{tg } \delta$ en fonction de la tension pour des papiers imprégnés à l'huile.

Ces facteurs de pertes se distinguent par une faible valeur absolue et par leur faible variation en fonction de la tension.

Il est encore plus instructif de suivre les variations des tensions critiques des deux matériaux donnés en exemple, à une température supérieure à celle de base. Dans la partie de droite de la figure 5, les différentes droites en éventail nous montrent la relation existant entre la tension critique et l'augmentation de température avec différents coefficients de température comme paramètres. Si nous traçons une parallèle à la ligne droite correspondant au coefficient 0,02 par le point représentant la tension critique à la température initiale qui, dans le premier exemple est de 900 kV, nous obtenons une ligne représentant la tension critique en fonction de l'augmentation de température. Dans le second exemple, par suite de plus petit coefficient de température, la ligne est beaucoup moins inclinée,

¹⁾ Cette augmentation est caractérisée par le coefficient de température σ , qui avec la différence de température, donne l'exposant du chiffre e pour le calcul du facteur de pertes en fonction de la température ($\text{tg } \delta_{\Delta \vartheta} = \text{tg } \delta_0 \cdot e^{\sigma \Delta \vartheta}$).

c'est-à-dire que le matériau se comporte beaucoup mieux aux hautes températures que celui de l'exemple n° 1, malgré un plus grand facteur de pertes au début.

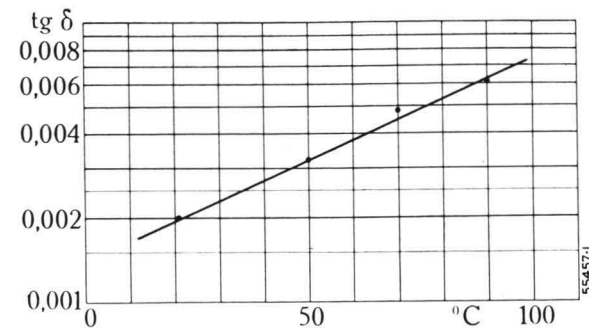


Fig. 7. — Facteur de pertes du même matériau qu'à la figure 6 à 40 kV en fonction de la température.

Le facteur de pertes répond avec une bonne approximation à la formule :

$$\text{tg } \delta_{\Delta \vartheta} = 0,002 \cdot e^{0,016 \cdot \Delta \vartheta}$$

Cela pose un problème d'essais de matériaux des plus intéressants, soit celui du choix des matériaux de base, papier et huile, avec un apprêt conduit de façon que des valeurs optima soient obtenues pour le facteur de pertes et son coefficient de température. La figure 6 montre que ce problème a été résolu. Le facteur de pertes y est très petit et ne varie que peu avec la tension.

Sur la figure 7, on a reporté le facteur de pertes du même matériau à 40 kV en fonction de la température. La courbe démontre que le facteur de pertes varie en fonction de la température selon une loi exponentielle en première approximation, car dans le système de coordonnées choisi, c'est une droite dont l'inclinaison détermine l'exposant et par là le coefficient de température qui, dans ce cas, est égal à 0,016. Avec le facteur de pertes et le coefficient ainsi déterminé, on obtient à l'aide de la figure 5 une tension critique d'environ 1200 kV à 20° C et d'environ 700 kV à 90° C. Nous remarquerons expressément que la qualité d'une isolation ne doit pourtant pas être uniquement estimée en fonction de la valeur du facteur de pertes et de son coefficient de température comme nous venons

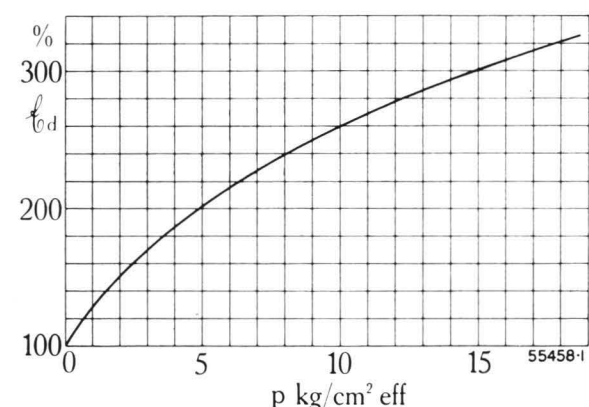


Fig. 8. — Valeur moyenne de la rigidité diélectrique du papier dans l'air comprimé en fonction de la pression et en % de la rigidité diélectrique à la pression atmosphérique.

L'inclinaison de la courbe témoigne de l'élévation de la rigidité diélectrique avec l'augmentation de la pression.

de le voir. Car, à part les constantes des matériaux considérées ci-dessus, des mesures du domaine constructif exercent aussi une grande influence sur les propriétés du dispositif d'isolation.

On a déjà maintes fois mentionné *l'effet des matières d'imprégnation*. Ces phénomènes très complexes en eux-mêmes peuvent être expliqués par un exemple simple. Les propriétés chimiques de la matière d'imprégnation restent pendant ce temps inchangées et une seule grandeur physique est modifiée. Ainsi, nous choisissons pour l'imprégnation du papier, une matière qui répond à ces exigences, soit l'air sous une pression variable.

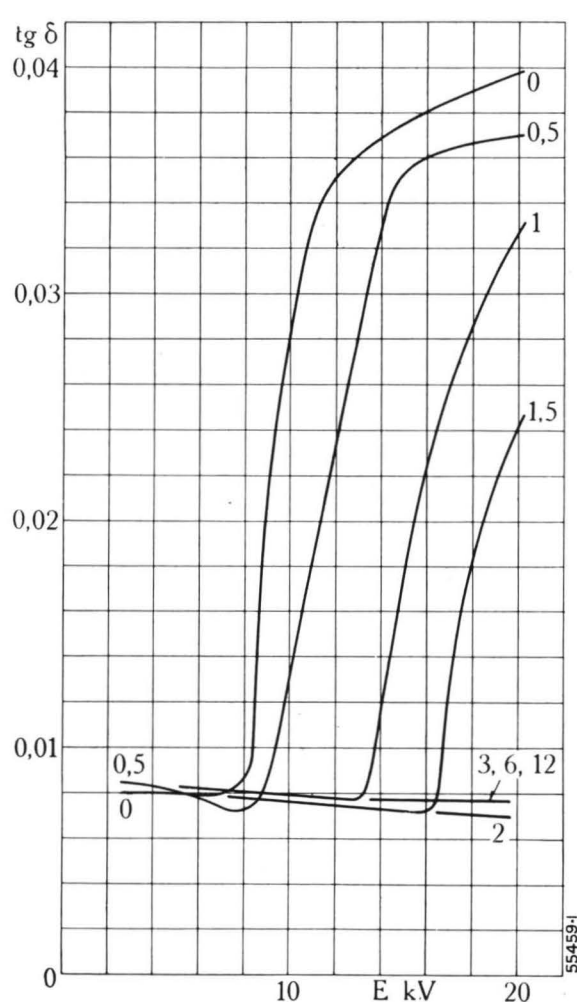


Fig. 9. — Facteur de pertes d'un dispositif d'isolation composé d'une épaisseur de 5 mm de papier et d'un espace d'air de 0,5 mm en fonction de la tension pour différentes pressions d'air en kg/cm^2 eff. comme paramètre.

La forme des courbes du facteur de pertes montrent l'élévation de la tension, pour laquelle apparaissent les décharges par effluves, par l'augmentation de la pression.

La figure 8 donne les valeurs moyennes de la rigidité diélectrique du papier dans l'air comprimé en fonction de la surpression. Le gradient de claquage est évalué en pour-cent de celui à la pression atmosphérique, pour mieux en marquer l'accroissement avec la pression. Pour 15 atm la rigidité diélectrique du papier, qui est déjà très grande à la pression atmosphérique, a triplé. On peut voir à la figure 9, d'une façon très instructive, l'influence de la pression sur le facteur de pertes. Le dispositif d'isolation considéré est formé d'une combinaison de papier avec une couche d'air. Il a donc été intentionnellement formé pour permettre des décharges par effluves. La courbe du facteur de pertes en fonction de la tension, à la pression atmosphérique, a au début une valeur à peu près constante qui monte subitement à partir d'une certaine tension pour atteindre par la suite une zone de saturation. Cette brusque montée est provoquée par les décharges par effluves. Les autres courbes montrent comment la tension minimum de décharges par effluves augmente parallèlement avec la pression et se trouve déjà en dehors de la zone considérée pour une suppression de quelques atmosphères.

Ainsi, nous venons de suivre le processus de l'apprêt du papier en tant qu'isolant et nous avons pu constater quelles sont les remarquables propriétés que cela lui confère. L'étude des matériaux s'est donc révélée très fertile dans ce domaine. Nous verrons, dans l'article traitant de l'isolation des machines, que les propriétés du papier ont une très grande influence sur la qualité des machines, non seulement par rapport à leur isolation, mais aussi sur leur comportement général¹⁾.

¹⁾ Fr. Beldi: «Le problème de l'isolement dans la construction des machines et des transformateurs modernes», page 224 de ce numéro. — A. Meyerhans: «De la légèreté dans la construction des transformateurs de grande puissance», page 291 de ce numéro.

(MS 965)

H. Hartmann. (Ve.)

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES PERTES DIÉLECTRIQUES DES HUILES ET AUTRES ISOLANTS LIQUIDES.

Indice décimal 621.315.615 : 537.226.3

Les constructeurs de transformateurs attachent aujourd'hui une grande importance à ce que les pertes diélectriques des huiles isolantes soient faibles. Les huiles qui, après un certain temps de service, accusent des pertes diélectriques trop élevées, peuvent être régénérées par un traitement approprié. Les isolants liquides de remplacement présentent en général des propriétés peu favorables. Toutefois, en les choisissant judicieusement et en subdivisant l'isolation solide, on peut les utiliser avantageusement.

Les isolants liquides comptent parmi les matériaux les plus importants de l'électrotechnique. Il n'est donc pas surprenant que l'augmentation des tensions de service et d'essai des divers appareils et machines électriques ait eu pour effet de resserrer les exigences imposées à cette classe d'isolants.

C'est sans contredit aux huiles pour transformateurs, faisant fonction à la fois d'isolant et de réfrigérant, que s'appliquent les prescriptions les plus rigoureuses. Ces huiles doivent présenter à la fois une rigidité diélectrique élevée, une faible viscosité et une grande résistance à l'oxydation. En service, les huiles minérales qui ne répondent pas à ces conditions engendrent, en vieillissant, des produits d'oxydation qui se déposent sur les parois de la cuve et sur les enroulements. Le transformateur est donc menacé de destruction totale, car son refroidissement est entravé. La figure 1 permet de se rendre compte du mauvais état d'un transformateur en service pendant plusieurs années avec une huile isolante de mauvaise qualité.

On a vu, dans l'article traitant des problèmes d'isolement des machines et transformateurs¹⁾, que l'huile sert également à imprégner le papier, utilisé aujourd'hui en grande quantité dans la construction des transformateurs. Nous nous limiterons cependant ici à la seule étude de l'huile, l'analyse du papier utilisé comme isolant faisant l'objet d'un autre article²⁾.

Afin de démontrer l'influence qu'exerce l'huile sur le papier imprégné, nous avons fait l'essai suivant.

¹⁾ Voir page 224 du présent numéro.

²⁾ Voir page 235 du présent numéro.

Après avoir été soigneusement séché, un modèle de transformateur est imprégné d'huile de bonne qualité et mis à l'étuve. En vue de son vieillissement artificiel, l'huile elle-même est cuite pendant 160 heures, au cours desquelles sa température est portée à 115° C. Pendant tout le processus, on mesure les pertes diélectriques entre l'enroulement à haute et celui à basse tension, ainsi que celles de l'huile. Les résultats de ces mesures sont rassemblés à la figure 2. Les pertes diélectriques du transformateur sont constantes pendant une durée de chauffage d'environ 80 heures. Les faibles fluctuations que l'on observe sont dues aux variations de la température, les pertes dépendant beaucoup de ce paramètre dans le domaine de température considéré. Après cette période, les pertes croissent continuellement, en parfaite corrélation avec le facteur de pertes $\tan \delta$ de l'huile. L'influence de l'huile sur la qualité de l'isolation du transformateur, et l'augmentation des pertes diélectriques lors d'un fort échauffement, se trouvent ainsi démontrées.

Nous basant sur cette constatation, nous nous sommes attachés à établir la relation qui existe entre les caractéristiques chimiques des huiles minérales et leurs pertes diélectriques, en ayant recours à de nombreux essais. Il s'agissait tout d'abord de savoir comment les pertes diélectriques se produisent dans l'huile minérale. Ces pertes proviennent d'une part de la conductibilité du diélectrique et sont donc d'origine ohmique. Elles consistent d'autre part en pertes provenant de la rotation des doublets dans

les champs électriques alternatifs. Les pertes diélectriques dépendent donc tout d'abord de la teneur en électrolyte du diélectrique et ensuite de sa teneur en molécules constituées en groupes polaires. Les huiles pour transformateurs convenablement raffinées ne devraient contenir aucune de ces substances, si ce n'est sous forme de traces. Les conditions sont toutes différentes dans le cas d'huiles déjà soumises à un

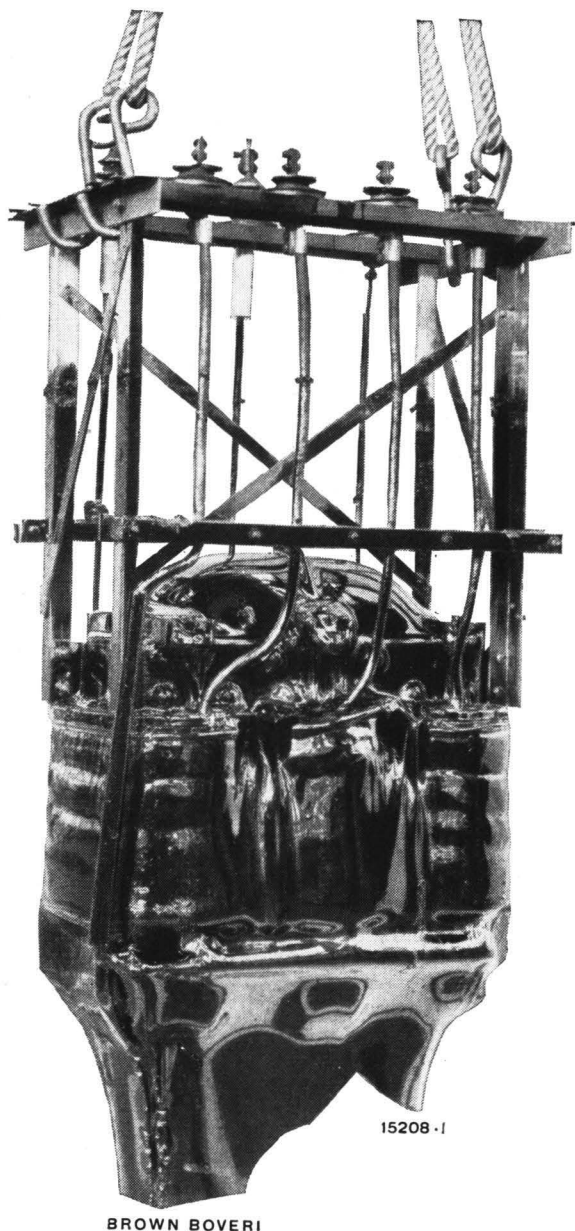


Fig. 1. — Etat d'un transformateur triphasé, après plusieurs années de service avec de l'huile de mauvaise qualité. L'huile, épaissie, a pris une consistance résineuse.

certain temps de service. Sous l'influence de l'air, les huiles s'oxydent à la température de service. Le genre d'oxydation et la nature des produits d'oxydation dépendent de la provenance et du degré de raffinage des huiles. Parmi les produits initiaux d'oxydation, on peut citer les alcools, les aldéhydes,

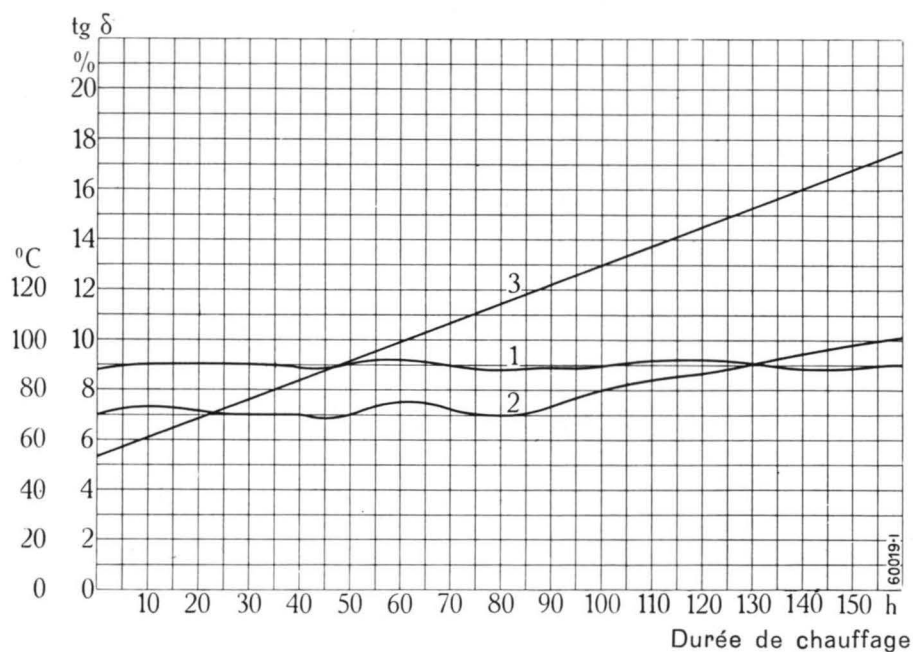


Fig. 2. — Facteur de pertes $\text{tg} \delta$ de l'isolation principale d'un modèle de transformateur, en fonction de la durée de chauffage, après vieillissement artificiel de l'huile.

- 1 = Température à l'intérieur du modèle d'essai.
2 = Facteur de pertes $\text{tg} \delta$ mesuré entre les enroulements haute et basse tension.
3 = Facteur de pertes $\text{tg} \delta$ de l'huile seule.

les peroxydes et les acides. Au cours de la réaction, la condensation et la polymérisation donnent naissance à des produits de réaction à poids moléculaire élevé. Avec l'extension de l'oxydation et la formation correspondante de substances à poids moléculaire encore plus élevé, la solubilité de ces dernières dans l'huile diminue et l'on constate avec le temps la formation de produits de vieillissement, dits boues. Bien que cette explication du mécanisme de la réaction qui se produit lors de l'oxydation des huiles minérales soit des plus sommaires, elle n'en permet pas moins de constater que, particulièrement au stade initial, se produisent aussi bien des substances contenant des groupes polaires que d'autres produits constituant des électrolytes.

Les pertes diélectriques de deux huiles isolantes en fonction de la température sont représentées à la figure 3. Dans les deux cas l'huile a été essayée aussi bien à l'état frais qu'après avoir subi divers traitements. Le tableau en bas donne ses caractéristiques et montre la façon dont elle se comporte lors d'un vieillissement artificiel. L'huile A est une qualité typique d'avant-guerre répondant en tous points aux prescriptions de l'ASE (Association Suisse des Electriciens). La marque B, par contre, est une huile de guerre provenant d'une raffinerie slovaque et importée en Suisse depuis le début des hostilités. A l'exception de son poids spécifique élevé et de sa tendance trop accentuée à la formation de boues lors du vieillissement, cette huile satisfait également aux prescriptions ASE. A l'état frais, ces deux huiles présentent pratiquement la même courbe du facteur de pertes $\text{tg } \delta$ en fonction de la température. De toutes façons les écarts minimes que l'on constate n'ont aucune importance. L'huile A a été soumise à un vieillissement artificiel selon la méthode de l'ASE et ses pertes ont été de nouveau mesurées alors qu'elle contenait encore tous les produits de vieillissement.

La courbe correspondante A_1 de $\text{tg } \delta$ est visible à la figure 3. Elle accuse une très forte diminution des propriétés diélectriques de l'huile. Nous essayerons d'en établir la cause. On a pu prouver, tout d'abord, que les produits de vieillissement solides et insolubles n'ont aucune influence sur les propriétés diélectriques. L'huile A_2 , vieillie et filtrée, présente en effet les mêmes caractéristiques de $\text{tg } \delta$ que l'huile vieillie non filtrée. Si, par contre, on malaxe cette même huile A_2 avec 10 % de terre à foulon pendant une heure à 80° C, tout en prévenant tout contact avec l'oxygène de l'air à l'aide d'azote, et fait suivre ce traitement d'un filtrage, l'huile régénérée se comporte conformément à la courbe A_3 de la figure 3. Cette courbe montre que cette huile régénérée présente des propriétés diélectriques encore meilleures que l'huile fraîche A. Ce traitement de l'huile vieillie artificiellement a pour effet d'abaisser son indice d'acidité de 0,33 à 0,11.

Propriétés chimiques et physiques des huiles pour transformateurs.

[illegible]

Afin d'établir si le reste d'acides contenus dans l'huile A_3 exerce ou non une influence néfaste sur les propriétés diélectriques de l'huile, ces acides ont été neutralisés à la soude caustique, après quoi l'huile a été lavée par trois fois à l'eau distillée. Cette expérience donne un résultat surprenant: l'huile A_4 ,

Le traitement à la terre à foulon améliore également les propriétés diélectriques de l'huile fraîche A. D'autre part, des constatations semblables à celles que nous avons pu faire avec l'huile A, après divers traitements au laboratoire, ont pu, avec l'huile B, trouver leur confirmation lors d'essais en service.

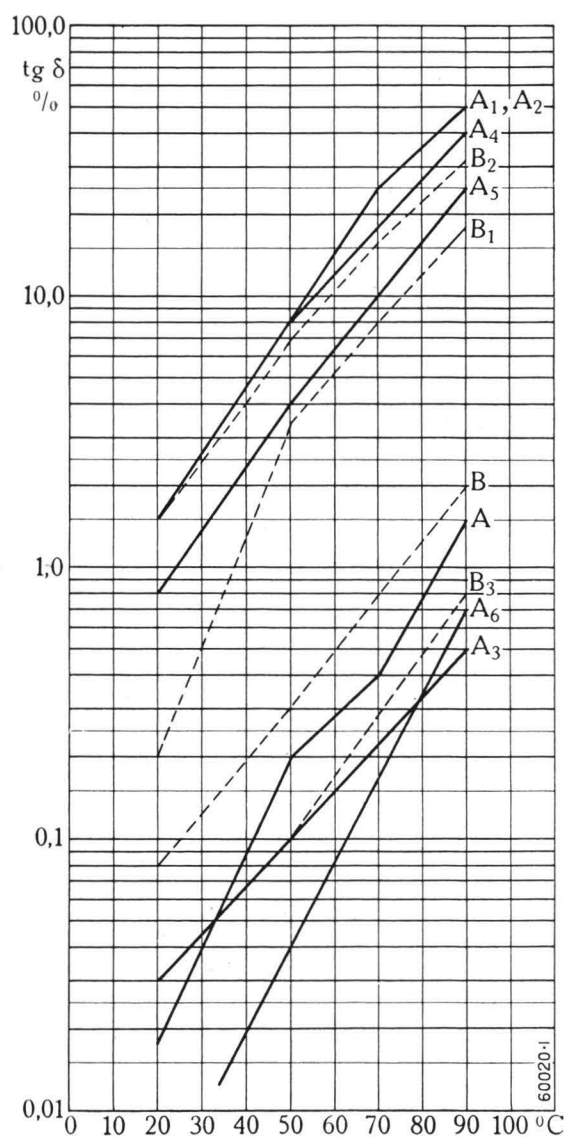


Fig. 3. — Facteur de pertes $\text{tg } \delta$ en fonction de la température, mesuré sur des huiles minérales à divers stades de vieillissement et de régénération.

Essais de laboratoire :

- A = Huile fraîche, qualité d'avant-guerre.
- A_1 = Huile A, vieillie artificiellement.
- A_2 = Huile A_1 , filtrée.
- A_3 = Huile A_2 , traitée à la terre à foulon.
- A_4 = Huile A_3 , neutralisée et lavée.
- A_5 = Huile A_4 , lavée encore une fois.
- A_6 = Huile A, traitée à la terre à foulon.

Essais de service :

- B = Huile fraîche, de qualité aujourd'hui commune.
- B_1 = Huile B soumise pendant 50 heures à une température de service de 95°C , dans un transformateur de mesure.
- B_2 = Huile B_1 utilisée pour la cuisson des transformateurs.
- B_3 = Huile B_2 traitée à la terre à foulon.

traitée de cette façon, accuse de nouveau des pertes très élevées, dont l'ordre de grandeur correspond pratiquement à celui que présente l'huile vieillie A_1 . Ce phénomène peut s'expliquer par la formation de sels lors de la neutralisation, sels qui ne peuvent être que très difficilement séparés de l'huile. Cette explication se trouve du reste confirmée par l'allure de la courbe de $\text{tg } \delta$ pour l'huile A_5 , laquelle ne se distingue de A_1 que par le fait que l'huile A_5 a été soumise à trois autres lavages à l'eau distillée.

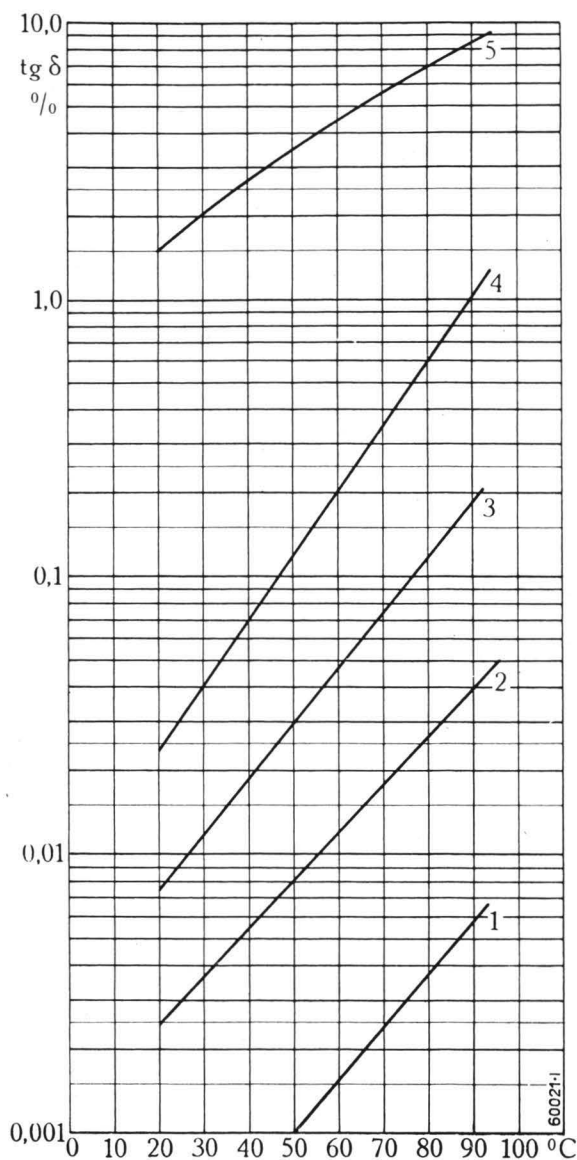


Fig. 4. — Facteur de pertes $\text{tg } \delta$ en fonction de la température, mesuré sur diverses huiles minérales et sur un isolant liquide de remplacement.

- 1 = Huile minérale de bonne qualité.
- 2 = Huile minérale de qualité moyenne.
- 3; 4 = Huile minérale de mauvaise qualité.
- 5 = Liquide de remplacement, à base de benzol.

Après une très courte sollicitation à température surélevée, se produit une diminution sensible des qualités diélectriques; un traitement à la terre à foulon suffit pour rétablir les propriétés initiales. Ceci prouve ainsi que la terre à foulon absorbe les substances nuisibles aux propriétés diélectriques de l'huile.

Nous tenons à relever expressément que la présente communication ne doit être considérée que comme le résultat d'essais préliminaires. Une autre série d'essais plus complets permettra de déceler l'ensemble des facteurs exerçant une influence sur les qualités diélectriques des huiles isolantes. On peut cependant tirer de ces essais préliminaires les importantes conclusions suivantes:

- 1° Les propriétés diélectriques des huiles isolantes sont fortement influencées par les contraintes auxquelles les huiles sont soumises en service.

- 2° Les huiles qui, par suite de vieillissement, accusent des pertes diélectriques exagérées, peuvent être régénérées par un traitement à la terre à foulon.
- 3° La valeur des pertes diélectriques des huiles fraîches ne peut être considérée comme une donnée caractéristique, car ces pertes augmentent beaucoup avec la transformation qui se produit en service. Il est donc absolument essentiel de « vieillir » ces huiles et de mesurer encore une fois leurs pertes après ce vieillissement. Ne peuvent être considérées comme huiles de qualité supérieure que celles qui présentent l'écart de pertes minimum entre l'état frais et l'état après vieillissement.

Depuis le début de cette guerre, les difficultés d'approvisionnement des pays européens en huiles pour transformateurs n'ont cessé de croître. Cette situation a contraint de nombreux constructeurs à recourir, pour le remplissage des transformateurs, à des isolants liquides de remplacement. S'il est possible de substituer à certains matériaux des substances artificielles de valeur équivalente, il n'est pas moins concevable de remplacer les huiles isolantes par des liquides présentant des propriétés semblables. La plus grande difficulté à laquelle se heurtent les spécialistes réside dans le fait que les matières premières, entrant dans la composition des liquides isolants de remplacement *de qualité*, sont aussi difficiles à obtenir que l'huile elle-même. Force est donc bien de se contenter de liquides de qualité moindre, lesquels peuvent néanmoins être utilisés sans inconvénient moyennant un traitement approprié et une construction judicieuse de l'isolation du transformateur.

Bien que la Sté An. Brown, Boveri & Cie n'ait jusqu'à présent pas été obligée de recourir à de tels isolants de remplacement, ses laboratoires ne les soumettent pas moins à une analyse complète, en vue de les utiliser soit comme tels, soit pour l'imprégnation de divers autres isolants. On peut citer parmi ces liquides de remplacement les dérivés chlorés du benzol, de la naphthaline ou du diphényl, utilisés soit séparément, soit mélangés les uns aux autres. Ils se rencontrent dans le commerce sous les noms les plus divers, tels que pyranol, afcoline, diélectrol, etc.

En ce qui concerne leur rigidité diélectrique au cheminement, aux étincelles glissantes et à la perforation, ces liquides de remplacement se comportent comme des huiles pour transformateurs de qualité moyenne. A ce point de vue, il n'y a donc nullement lieu de modifier l'isolation des enroulements par rapport à l'exécution normale. La grande différence que présentent ces liquides de remplacement par rapport à l'huile pour transformateurs réside, au point de vue électrique, dans la valeur des pertes diélectriques. A titre de comparaison, on a représenté à la figure 4, en fonction de la température, le facteur de pertes $\text{tg } \delta$ d'un isolant liquide trichloré et d'huiles minérales de diverses qualités. Il

ressort de cette comparaison que les pertes diélectriques de ce liquide de remplacement sont environ mille fois plus élevées que celles d'huiles minérales de qualité moyenne. Il en résulte pour l'isolation des contraintes d'un nouveau genre, qu'il n'a été possible d'analyser et de maîtriser qu'à l'aide d'essais méthodiques, sur lesquels il nous est malheureusement impossible de nous étendre ici, vu le manque de place. Nous nous bornerons à relater brièvement les résultats obtenus avec un transformateur de tension.

Après avoir été soigneusement séché, le transformateur fut rempli du liquide de remplacement à expérimenter, puis imprégné. Le facteur de pertes $\text{tg } \delta$ fut déterminé à 30, 50 et 70° C. La courbe 1 de la figure 5 donne les résultats de ces mesures. Les pertes sont exagérées et mettraient le transformateur en danger après une longue durée de service. Des résultats beaucoup meilleurs peuvent cependant être réalisés lorsqu'on cloisonne l'isolation liquide. La courbe 2 de la figure 5 reproduit les valeurs corres-

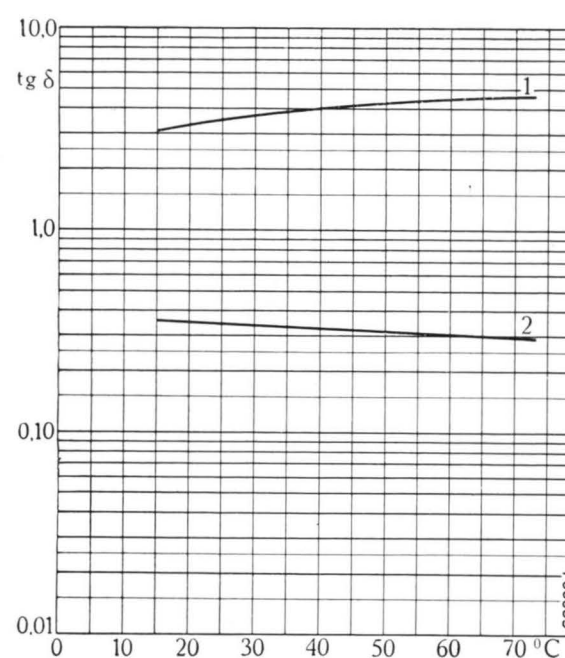


Fig. 5. — Facteur de pertes $\text{tg } \delta$, en fonction de la température, d'un transformateur de mesure rempli d'isolant liquide de remplacement. 1 = Facteur de pertes dans le cas d'isolation liquide ordinaire. 2 = Facteur de pertes dans le cas de cloisonnement de l'isolation liquide.

pondantes des pertes diélectriques. Nous sommes ainsi parvenus, malgré les pertes élevées du liquide de remplacement, à créer une isolation utilisable pour les transformateurs.

Relevons pour terminer que les qualités des liquides de remplacement diminuent en général davantage avec le vieillissement que celles des huiles pour transformateurs. Ces isolants de remplacement peuvent cependant être régénérés par des traitements semblables à ceux appliqués pour les huiles minérales.

Un refroidissement énergétique, une température de service peu élevée, une subdivision judicieuse de l'isolation, un choix correct des isolants solides et une propreté irréprochable sont autant de facteurs d'importance capitale dont il y a lieu de tenir compte dans la construction et la fabrication d'un transformateur isolé aux liquides de remplacement.

(MS 970)

A. Putzi et J. Biert. (H. D.)

L'EMPLOI DU GAZ COMPRIMÉ COMME ISOLANT.

Indice décimal 621.315.618.2.027.3

La rigidité diélectrique de l'air augmente généralement avec la pression. La mise en valeur de cette propriété a donné naissance à de nombreuses applications intéressantes, telles que disjoncteur pneumatique ultra-rapide, transformateur de mesure à air comprimé, condensateur isolé au gaz comprimé. D'autres gaz, dont l'azote et l'acide carbonique, se comportent de façon semblable. L'influence de la pression, de la forme et de la disposition des électrodes ainsi que du genre de gaz sur la rigidité diélectrique des isolants gazeux a fait l'objet de nombreux travaux de recherches, dont les résultats sont passés en revue dans le présent article.

La réalisation d'appareils à haute tension à la fois économiques et parfaits au point de vue technique, implique tout naturellement l'emploi d'isolants alliant à une rigidité diélectrique très élevée l'avantage d'une économie maximum de matière. Deux problèmes d'isolation foncièrement différents se posent au constructeur: il s'agit d'une part de respecter les distances minima d'isolation extérieure à la surface entre l'isolant solide et l'atmosphère environnante; d'autre part, il est essentiel de déterminer de façon correcte les distances d'isolation à l'intérieur des appareils. Tandis que les distances d'isolation extérieures ne dépendent que de la rigidité diélectrique de l'air, dont la valeur est maintenant suffisamment connue, et de l'emploi d'électrodes de forme correcte, l'isolation interne fait encore l'objet d'importants travaux de recherches.

Les isolants solides tels que matières céramiques et fibreuses, résines artificielles, matières pressées et les isolants liquides tels que huiles minérales ou hydrocarbures non inflammables (par exemple «Chlophen») constituent, soit seuls, soit combinés avec d'autres, les matières isolantes les plus utilisées dans la construction des appareils à haute tension. L'application des isolants gazeux n'a cessé de s'étendre au cours de ces dernières années. Les spécialistes de Brown Boveri en avaient, du reste, reconnu toute l'importance il y a déjà plus de dix ans, en vue de remplacer partiellement l'huile. Les recherches minutieuses entreprises dans ce domaine dans nos laboratoires ont dépassé le stade de l'explication de phénomènes physiques; elles ont donné naissance à des applications pratiques intéressantes. Pour le constructeur, s'il est un but séduisant, c'est bien celui de remplacer l'huile, inflammable, par une matière isolante non inflammable de qualité égale ou même supérieure, tout au moins dans les disjoncteurs et les transformateurs et condensateurs de mesure à haute tension. Les difficultés actuelles d'approvisionnement en huiles isolantes de bonne qualité, nées de la guerre, ont contribué à intensifier encore ces efforts. Preuve en soit le degré élevé de perfection des disjoncteurs pneumatiques ultra-rapides modernes. Les progrès accomplis dans

le domaine des transformateurs de tension, de mesure, à air comprimé et des condensateurs isolés au gaz comprimé utilisés avec succès pour les mesures,

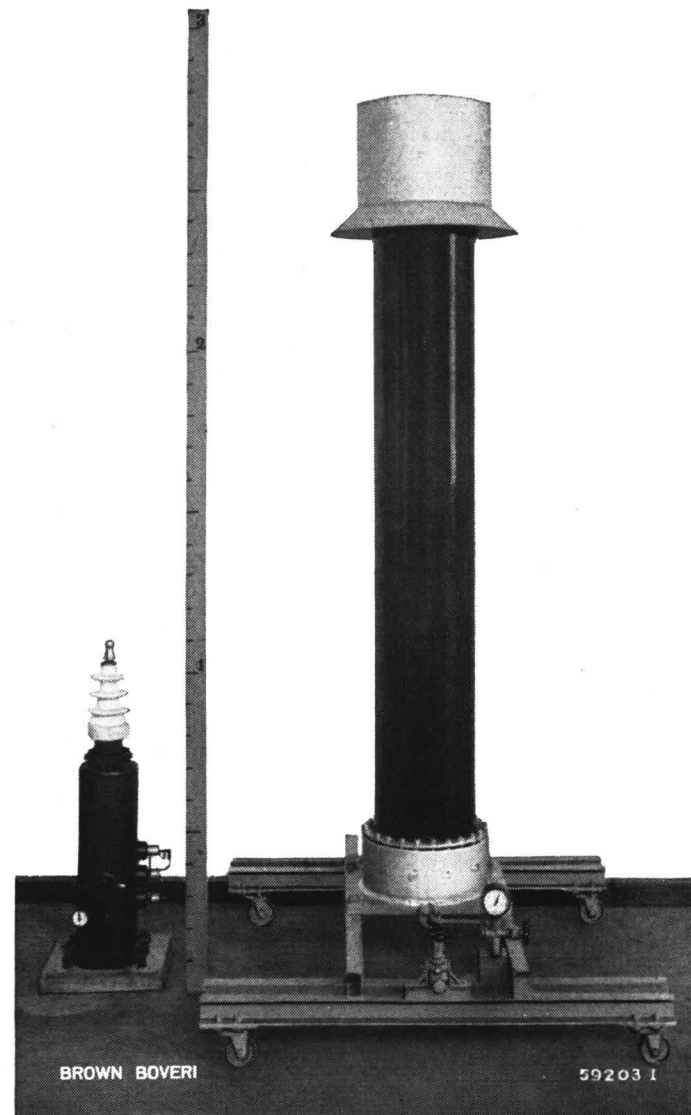


Fig. 1. — Condensateurs isolés au gaz comprimé pour des tensions de service de 400 et 60 kV. Capacité 100 pF chacun. Pression de service 12 à 14 kg/cm².

L'emploi du gaz comprimé comme isolant se traduit par une construction ramassée. Le capot à angles vifs du pôle sous tension du condensateur à 400 kV sert d'électrode de protection contre les décharges extérieures.

en particulier pour celles des pertes diélectriques à l'aide de ponts, sont dus en partie aux travaux de recherches de Brown Boveri dans ce domaine. La figure 1 représente deux condensateurs de mesure de ce genre pour une pression de service de 12 à 14 kg/cm². Le grand modèle est du type usuel avec isolateur en papier bakérisé servant de cylindre sous pression; il est construit pour des tensions jusqu'à 400 kV. La petite exécution comporte un réservoir d'acier et un isolateur spécial; c'est une construction originale pour 60 kV de tension maximum de service. L'échelle de comparaison de la figure fait ressortir l'avantage de l'air comprimé en ce qui concerne la réduction des dimensions.

La rigidité diélectrique de divers gaz sous pression.

D'après le chemin que parcourrait une décharge disruptive lors d'une augmentation suffisante de la tension d'épreuve, les distances d'isolement entre les diverses parties d'un appareil à haute tension seront de valeur différente selon qu'il s'agira :

- a) d'une distance disruptive dans une atmosphère gazeuse,
- b) d'un cheminement, ou d'un intervalle correspondant à une décharge par étincelles glissantes.

Dans le premier cas, l'arc perfore le gaz comprimé dans lequel se trouvent les électrodes sans qu'il y ait de contact direct avec des surfaces ou des parois isolantes. Dans le deuxième cas par contre, la décharge côtoie une surface isolante; la tension de contournement et la loi de sa variation avec la pression dépendent du genre d'isolant et de la nature de sa surface.

Ces deux espèces de distances disruptives se présentent en grand nombre et sous des formes diverses dans l'appareillage haute tension. Nous nous bornerons à en choisir quelques cas typiques, représentés par des électrodes de forme géométrique simple, et en étudierons la rigidité diélectrique au contournement à diverses pressions et pour divers gaz (ou liquides, à titre de comparaison). Des mesures exécutées sur des dispositifs de ce genre, le spécialiste pourra tirer des directives pour la construction rationnelle de ses appareils.

Applications relatives au champ électrostatique homogène.

Dans les condensateurs de mesure de la figure 1, deux électrodes cylindriques concentriques sont isolées par du gaz comprimé. Il s'agit donc là d'une distance disruptive dans une atmosphère gazeuse, avec répartition quasi-uniforme de lignes de force dans tout le domaine du champ électrostatique. Ce champ est dit pratiquement *homogène*; il implique une augmentation pratiquement proportionnelle de la tension disruptive avec le produit de la densité du gaz et de l'écartement des électrodes (loi de Paschen). Un autre exemple de champ homogène se rencontre entre des électrodes plan-parallèles et même entre deux sphères, tout au moins à condition que la distance disruptive reste faible par rapport au diamètre des sphères et que l'on ne considère que l'espace dans lequel se produit l'éclatement. La figure 2 représente quelques courbes de la tension de contournement en champ homogène pour l'air comprimé, résultant de mesures effectuées dans nos laboratoires. Ces courbes font ressortir clairement l'avantage que constitue la forte augmentation de la tension disruptive due à la compression.

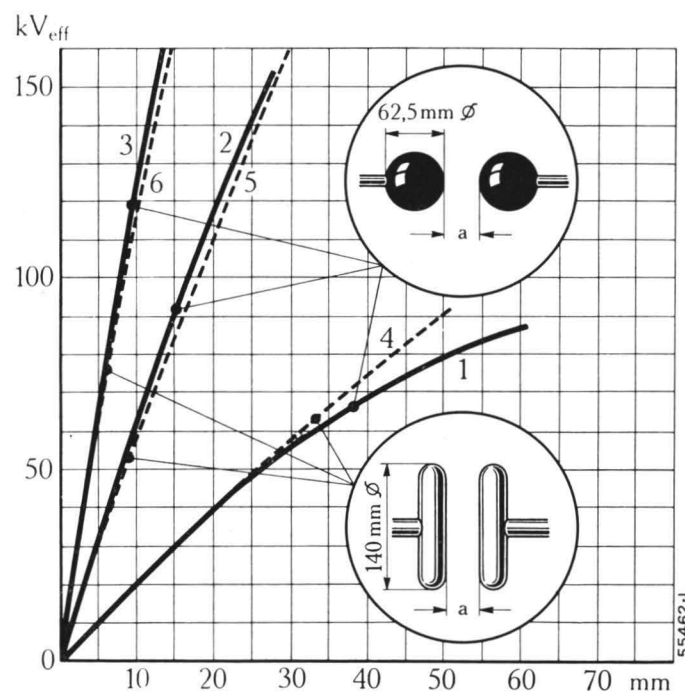


Fig. 2. — Tension disruptive dans l'air comprimé entre sphères et entre disques, en fonction de la distance disruptive a , pour des pressions de 1, 3 et 6 kg/cm². Tension alternative 50 pér/s.

1; 4 = Pression 1 kg/cm².
2; 5 = Pression 3 kg/cm².
3; 6 = Pression 6 kg/cm².

Applications relatives au champ électrostatique non uniforme.

Le but auquel tendent les constructeurs d'appareils à haute tension isolés au gaz comprimé est de réaliser un champ homogène afin d'exploiter les avantages illustrés à la figure 2 et de réduire au minimum les dimensions des appareils. Malheureusement, ce but ne peut être atteint intégralement que dans peu de cas, parmi lesquels on peut citer les condensateurs. Nombreux sont les obstacles qui s'opposent à la réalisation d'un champ homogène idéal: gradation de l'enroulement des transformateurs de mesure isolés au gaz comprimé; limites imposées aux dimensions de leur circuit magnétique; effet de pointe dû aux arêtes des électrodes dans les redresseurs à aiguilles à gaz comprimé. En fait, il n'y a guère qu'en atmosphère gazeuse qu'un champ homogène puisse être réalisé. Toute modification de la nature du diélectrique dans l'espace d'éclatement, par exemple à la surface entre isolant solide et isolant gazeux, entraîne une déformation du champ électrostatique.

On a rassemblé à la figure 3 les résultats de quelques mesures exécutées sur des distances disruptives en atmosphère gazeuse et sur des cheminements, entre électrodes en forme de pointes et d'autres comportant des arêtes. Il ressort de ces courbes que l'accroissement quasi-proportionnel de la tension disruptive avec la pression selon figure 2, n'est plus valable sur tout le domaine de la pression, pour les électrodes anguleuses. Au contraire, l'augmentation de la tension avec la pression devient de moins en moins sensible. Il n'est même pas rare que le phénomène inverse se produise — une diminution de la tension

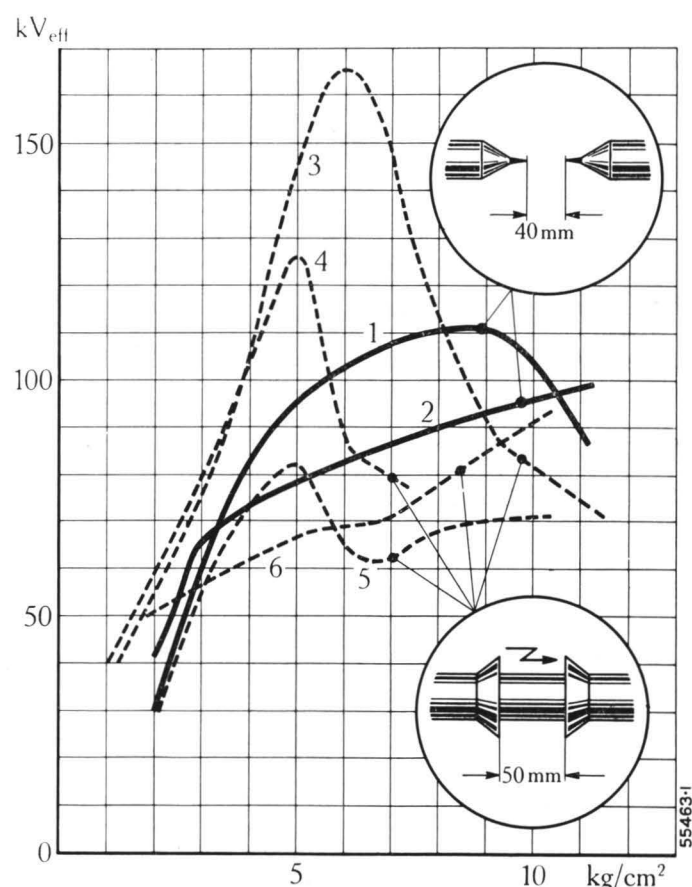


Fig. 3. — Tension disruptive en fonction de la pression du gaz pour une distance disruptive en atmosphère gazeuse: dans l'air (1, 3, 4) dans l'azote (5) et dans l'acide carbonique (2, 6) entre pointes distantes de 40 mm et le long d'un cheminement entre arêtes distantes de 50 mm.

3, 5, 6 = Eclatement le long d'un tube en porcelaine.

4 = Eclatement le long d'un tube en papier pressé.

Au-dessous de 5 à 6 kg/cm², courbe tension-pression fortement descendante pour l'air et l'azote, ascendante pour l'acide carbonique. Le cheminement le long du tube de porcelaine 3 à l'état sec donne une tension de contournement plus élevée que dans le cas du tube de papier baké 4, sensible à l'humidité.

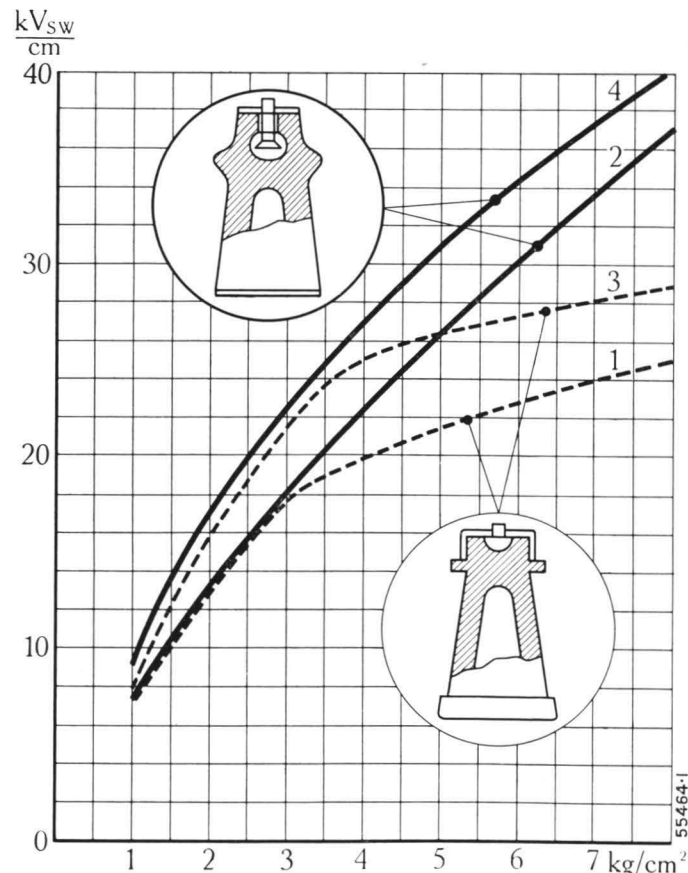


Fig. 4. — Gradient de potentiel pour la tension de contournement en fonction de la pression, pour isolateurs-supports en porcelaine dans l'air comprimé.

A droite en bas, isolateur lisse d'ancienne exécution. A gauche en haut, exécution moderne avec électrodes encastrées dans l'isolateur.

1, 2 = Gradient de potentiel pour tension alternative 50 pér/s.

3, 4 = Gradient de potentiel pour tension de choc minimum, onde positive 1/50 μs.

Dans le cas de l'ancien isolateur-support, avec électrodes en forme de calotte, on ne constate, aux pressions supérieures à 4 kg/cm², plus d'augmentation sensible de la tension de contournement (comparer courbes 1 et 2 de la figure 3). Dans la nouvelle exécution par contre la tension de contournement croît pratiquement proportionnellement avec la pression.

disruptive¹⁾—, surtout s'il existe un cheminement entre les électrodes. La figure 3 montre clairement que, pour une disposition donnée des électrodes, les divers isolants gazeux, air comprimé, azote et acide carbonique, se comportent différemment. Le genre d'isolant solide et son degré d'humidité influencent eux aussi les résultats.

L'écart considérable qui existe entre les résultats obtenus avec un champ homogène et ceux réalisés avec un champ non uniforme s'explique par la présence de décharges par effluves aux électrodes. Ce phénomène précède toujours la perforation et se présente différemment selon la forme des électrodes, le genre de gaz et sa pression. Il implique par suite des valeurs différentes de la tension disruptive.

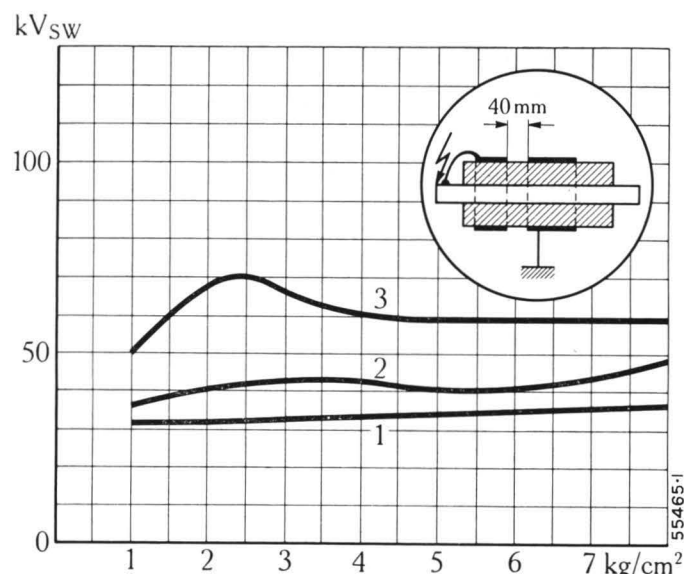


Fig. 5. — Tension de contournement dans l'air comprimé en fonction de la pression, le long d'un tube en stéatite donnant lieu à des décharges superficielles.

1 = Tension alternative 50 pér/s.

2 = Contournement sous tension de choc minimum. Onde de 1/50 μs. Boulon de traversée branché au pôle positif.

3 = Comme 2, mais boulon de traversée branché au pôle négatif.

Les courbes montrent qu'une augmentation de pression pour obtenir une élévation de la tension de contournement n'a aucune influence lorsqu'il se produit des étincelles glissantes, et ceci aussi bien à 50 pér/s qu'au choc.

Un exemple d'accroissement proportionnel de la tension de contournement avec la pression dans un champ non uniforme, est représenté à la figure 4. La tension de contournement par cm de distance disruptive (gradient de potentiel correspondant à la tension de contournement) d'un ancien isolateur-support lisse en porcelaine y est comparée à celle d'un support moderne comportant des électrodes encastrées, les essais étant exécutés sous tension alternative à 50 pér/s et sous tension de choc.

La *décharge par étincelles glissantes* constitue un cas particulier de décharge superficielle. Elle côtoie la périphérie de l'isolateur et en abaisse considérablement

¹⁾ Ce phénomène est aussi mentionné dans le traité de G. Gänger, Archiv für Elektrotechnik 34 (1940), p. 64 et suivantes.

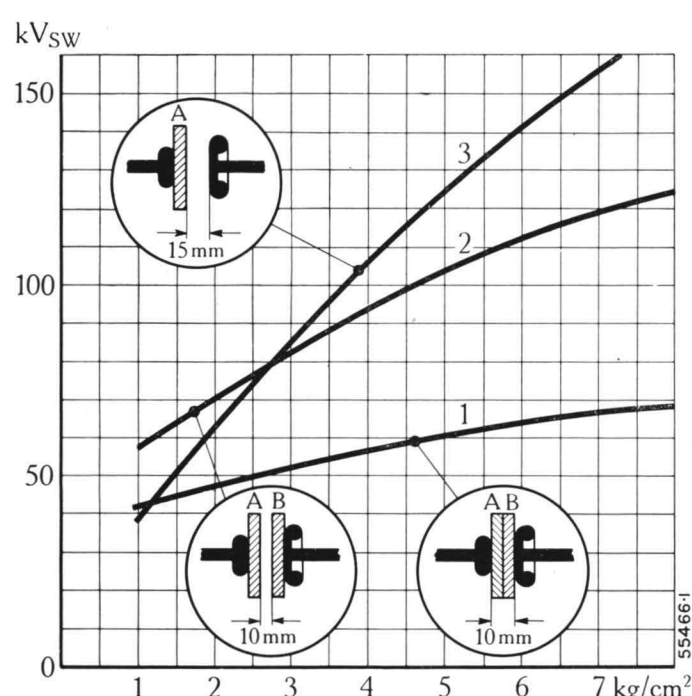


Fig. 6. — Tension de contournement dans l'air comprimé en fonction de la pression, à la surface d'une plaque isolante.

Lorsque les plaques sont appliquées l'une contre l'autre (1), de violentes décharges par étincelles glissantes sur la plaque A précèdent le contournement. Ces étincelles glissantes ne peuvent pas être combattues par une augmentation de la pression. Un écartement de 10 ou même de 15 mm absorbe par contre, lorsque la pression augmente, la presque totalité de la tension appliquée aux électrodes; de cette façon, il ne se produit jusqu'au contournement que de faibles étincelles glissantes (2) ou même aucune (3).

ment la résistance au contournement. Les recherches effectuées dans nos laboratoires ont prouvé qu'une simple augmentation de la pression du gaz est incapable de prévenir ces décharges par étincelles glissantes. La figure 5 montre que ce qui est vrai pour les tensions alternatives l'est aussi pour celles de choc.

Un éclateur, muni entre ses électrodes de disques isolants sur la surface desquelles se forment les décharges par étincelles glissantes, accuse à priori des propriétés semblables: une augmentation de la pression ne se traduit que par un très faible accroissement de la tension de contournement (courbe 1 de la figure 6). Si, par contre, un espace d'air de 10 mm est ménagé entre les disques isolants (courbe 2) ou si l'on porte cet écartement à 15 mm en retirant l'un des disques (B), le dispositif se comporte de façon semblable à celui de la figure 2, correspondant à un champ en atmosphère gazeuse. La fraction de la tension totale s'appliquant au disque isolant A se réduit, dans ce cas, par rapport à la courbe 1 de la figure 6, dans de telles proportions que malgré l'augmentation de la tension jusqu'à l'éclatement, aucune étincelle glissante ne se produit.

Toutes ces observations ont été mises en pratique dans les transformateurs de tension de mesure isolés à l'air comprimé, construits à l'origine pour des tensions de service jusqu'à 64 kV ¹⁾. Elles ont aussi été appliquées à tous les disjoncteurs pneumatiques ultra-rapides, souvent décrits dans cette Revue et dont

¹⁾ H. Hartmann, Revue Brown Boveri 1941, page 84.

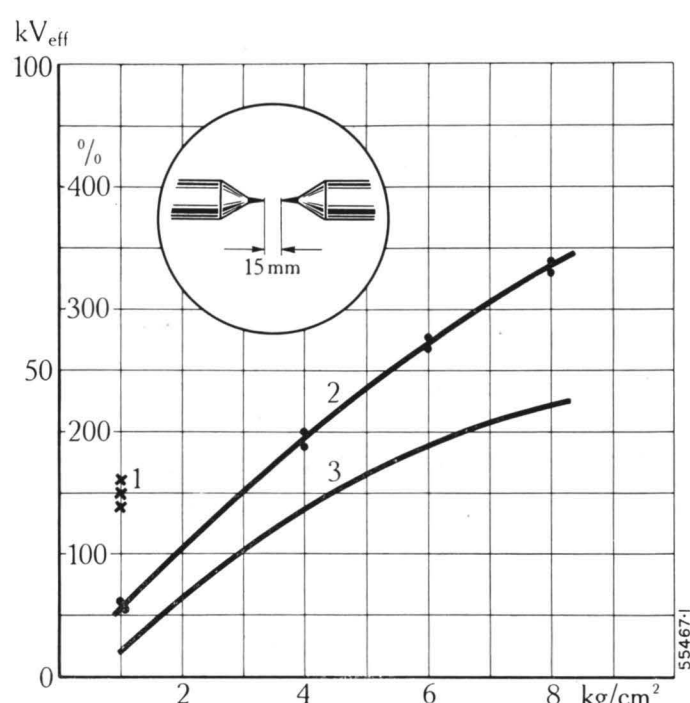


Fig. 7. — Comparaison de la rigidité diélectrique de l'huile et de l'air comprimé.

Tension disruptive à 50 pér/s, entre points distantes de 15 mm.

- 1 = Pour l'huile de transformateur.
- 2 = Pour l'air, en fonction de la pression.
- 3 = Rapport entre les tensions disruptives de l'air et de l'huile en %.

Il ressort de ces courbes qu'à partir d'une pression de 3 kg/cm² et dans le dispositif d'essai considéré, la tension disruptive de l'air comprimé est déjà plus élevée que celle de l'huile pour transformateurs.

l'isolement de la chambre d'extinction assure un pouvoir diélectrique élevé aux points de coupure.

Conclusions.

Il résulte de ce qui précède qu'une exécution rationnelle de l'isolement des appareils isolés au gaz comprimé et la réalisation d'un champ électrostatique aussi homogène que possible permettent d'obtenir des valeurs élevées de la rigidité diélectrique. Le problème de l'utilisation de pressions de service très élevées, correspondant à une rigidité diélectrique de l'ordre de plusieurs centaines de kV/cm se réduit donc à une question de résistance mécanique et d'étanchéité de la carcasse de l'appareil et de ses isolateurs de traversée. Il est donc possible dans de nombreux cas, de remplacer l'huile par les gaz comprimés comme isolants. La figure 7 donne pour un dispositif typique d'essai une comparaison du pouvoir diélectrique des deux isolants.

Dans tous les éléments d'isolement comportant un champ électrostatique non uniforme, il convient de soigner tout spécialement l'exécution des électrodes anguleuses formant saillie, celle du blindage des conducteurs contre les décharges par effluves et des parties anguleuses d'enroulements ou de carcasses. On fera bien d'éviter les constructions qui se comportent selon les courbes de la figure 3. Tout au moins devra-t-on veiller à ce que leur tension d'épreuve se trouve dans le domaine correspondant à la partie ascendante de la courbe tension-pression.

(MS 971)

M. Schultze. (H. D.)