Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 27 (1936)
Heft: 8

Artikel: Le câble à huile imprégné après pose
Autor: Borel, James
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057497

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 22.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

H. Weidmann A.-G., Rapperswil (St. Gallen). Presspan in Tafeln, Rollen und Bändern; Artikel aus Presspan; Pressformstücke aus Kunstharz; diverse eigene Isolierfabrikate für die Elektrotechnik.

Hoirs d'Aug. Gehr, Renens. Lustrerie; lampes de table; Fers à repasser; Radiateurs.

Johann Göldi, Batterie- und Elementefabrik, *Rüthi* (Rheintal). Trockenbatterien aller Art.

A.-G. der Eisen- und Stahlwerke vorm. Georg Fischer, Schaffhausen. Pilum-Speicherherde, elektrisch.

Carl Maier & Co., Industriestrasse 3, *Schaffhausen.* Schaltkasten; Oelschalter; Starkstromapparate; Schaltkastenbatterien usw.

Rauscher & Stoecklin A.-G., Sissach. Hochspannungs-Oelschalter; Schaltkasten mit Hochleistungssicherungen; Hochleistungssicherungen für Hoch- und Niederspannung; Kleinschützen mit Trockenschalter; Oelschützen 15—200 Amp.; Rohr- und Griffsicherungen; Gekapselte Schaltanlagen; Licht-Verteilkasten; Schaltkasten; Hochspannungs-Schubtrennschalter mit automatischer Drucklufterzeugung für die Lichtbogenlöschung; Freileitungs-Hörnerschalter; Konzentrische und andere Klemmen; Transformatoren; System-Wandler.

Autophon A.-G., Ziegelmattstr. 3—5, *Solothurn.* Telephonapparate und Umschalter; Lichtsignalanlagen; Zahlensignalanlagen; Feuermelde-, Alarm- und Sicherheitseinrichtungen; Verstärker, Lautsprecheranlagen; Radio- und Telephonrundspruchgeräte; Radio-Telephonrundspruch-Grammo-Kombinationen; Radiobestandteile.

Fr. Ghielmetti & Co. A.-G., Biberiststrasse 286, *Solothurn.* Zeit- und Sperrschalter; Schaltuhren; Temperaturschalter; Thermoregulatoren; Schaufenster- und Treppenlicht-Automaten; Fernschalter; Relais; Schaltautomaten für Oelfeuerungen.

Paul Truninger, dipl. El.-Ing., Langendorfstr. 19, *Solothurn,* und *Ferro-Arc Elektroden A.-G.,* Sternegg 10, *Luzern.* Elektrische Lichtbogenschweissapparate; elektrische Lötkolben. Elektroden und Schweisszubehör; Musterschweissungen; Gasmantel-Schweisselektroden.

J. G. Baer, Turmuhrenfabrik, *Sumiswald.* Mutteruhren; elektrische Uhren für Stromanschluss; Sumiswalder Pendules; elektrische Nebenuhren; Mutteruhren mit Quecksilberrelais.

B. A. G. Broncewarenfabrik A.-G., Turgi (Aargau). Beleuchtungskörper; Bronzearbeiten.

Leclanché S. A., Avenue de Grandson 19, *Yverdon.* Piles électriques en tous genres; batteries de piles pour la T. S. F.; lampes électriques de poche; lanternes électriques portatives; batteries pour lampes électriques de poche; Condensateurs électriques; Accumulateurs stationnaires et transportables; Batteries pour automobiles; Batteries au plomb système Planté; Batteries fer-nickel et cadium-nickel.

Landis & Gyr A.-G., Zug. Elektrizitätszähler; elektrische Schaltapparate; elektrische Uhren.

Albsiwerk Zürich A.-G., Albisriederstr. 245, *Zürich.* Feuer- und Polizeimeldeanlagen; automatische Telephonanlagen; Signalanlagen; Zubehör und Hilfseinrichtungen für Telephonie; Draht- und Rundfunkgeräte.

Elektro-Material A.-G., Zürich-Basel, St. Albanvorstadt 80; *Appareillage Gardy S. A., Genève; S. A. des Câbleries et Tréfileries, Cossonay-Gare.* Installationsmaterialien wie: Sicherungen, Schalter, Steckdosen, Fassungen, Trennschalter, Oelschalter usw.; isolierte Drähte und Kabel, Bleikabel, blanke Kupferdrähte und Seile, Isolierrohre.

Otto Fischer A.-G., Sihlquai 125, *Zürich.* Elektrotechnische Bedarfsartikel.

F. Freitag, Stampfenbachstr. 34a, *Zürich.* Näh- und Leselampen (elektrische).

Oskar Locher, Baurstrasse 14, *Zürich.* Elektrische Waschapparate; elektrische Glättemaschine; elektrothermische Apparate für Gewerbe und Industrie.

Bureau für Motoren-Installation Zürich der Maschinenfabrik Oerlikon, Zürich-Oerlikon. Einphasen-Lichtbogen-Schweisstransformatoren; Schweiss-Umformergruppen; Drehstrom-Motoren in normaler Ausführung; Flanschmotoren mit horizontaler und vertikaler Welle; Drehstrom-Motoren mit Oberflächenkühlung; Motorschutzschalter mit Druckknopf oder Handgriff; Stecker und Dosen; Paketschalter.

MICAFIL A.-G., Badenerstrasse 796, *Zürich-Altstetten.* Kunstharz-Pressteile für allgemeinen und technischen Bedarf; an der Strangpresse gefertigte Stangen, Rohre und Profile.

Rolos A.-G., Fabrik für elektrische Leitungsdrähte und Trockenbatterien, Badenerstrasse 41, *Zürich 4.* Elektrische Leitungsdrähte; Isolation GS; Trockenbatterien.

H. A. Schlatter & Co., Limmatquai 92, *Zürich.* Elektrische Widerstandschweissmaschinen: Punkt-, Stumpf-, Abschmelz- und Rollenschweissmaschinen. Schweisszeitregler. Lichtbogenschweissmaschinen und Zubehör; Elektroden.

SIEMENS Elektrizitäts-Erzeugnisse A.-G., Löwenstrasse 35, *Zürich.* Sicherungsmaterial.

Trüb, Täuber & Co. A.-G., Ampèrestrasse 3, *Zürich 10.* Elektrische Messinstrumente und wissenschaftliche Apparate.

Le câble à huile imprégné après pose.[1])

Par *James Borel,* Cortaillod.

621.315.211.3

L'imprégnation des câbles s'est effectuée jusqu'à maintenant déjà à l'usine.

La réalisation des canalisations électriques à très hautes tensions, constituées par des câbles à huile, pouvant s'installer avec le maximum de facilité et de sécurité, a conduit l'auteur à étudier l'imprégnation des câbles uniquement après pose et les conditions à remplir pour que la qualité des câbles ainsi imprégnés soit au moins égale à celle des meilleurs câbles imprégnés à chaud à l'usine.

Das Imprägnieren von Kabeln wurde bis heute bereits in der Fabrik ausgeführt. Das Bestreben, Hochspannungsleitungen mit Oelkabeln von hohem Sicherheitsgrad in einfacher Weise zu verwirklichen, hat den Autor dazu geführt, das Imprägnieren nach der Verlegung und in kaltem Zustande eingehend zu studieren und die Bedingungen zu ermitteln, damit dieser für die Qualität des Kabels so wichtige Vorgang sich mit mindestens ebenso grosser Sicherheit ausführen lässt wie in der Fabrik im warmen Zustand des Kabels.

De tout temps avec beaucoup de raison, l'imprégnation a été considérée comme une opération très importante de laquelle les qualités des câbles dépendent pour une large part.

Aussi de nombreuses études ont-elles été faites pour mieux connaître le mécanisme de cette opération, pour la mieux contrôler et, si possible, pour la mieux diriger.

Il est résulté de ces études que la bienfacture de l'imprégnation dépend non seulement des propriétés du papier et de celles de la matière imprégnante, mais aussi du «degré» de vide réalisé dans les cuves d'imprégnation et de la température qui y règne.

[1]) Suite de l'article paru dans le Bulletin de l'ASE 1935, No. 16.

Si, par suite de la complexité des nombreux problèmes posés par la réalisation de la meilleure imprégnation, les avis n'ont jamais été unanimes sur toutes les solutions qui ont été proposées, il n'en est pas moins vrai que l'on considérait comme indispensable le maintien d'une température assez élevée pendant l'imprégnation, que l'imprégnant soit de la matière visqueuse ou de l'huile fluide.

La nécessité admise par tous les fabricants de réaliser cette température, qui varie suivant les avis entre 80° et 140° C, semblait donc réserver strictement à l'usine l'opération de l'imprégnation, car il n'est pas possible, pratiquement, de chauffer à près de 100° C des câbles posés, par suite de leur grande surface de refroidissement. En effet, le calcul montre que pour porter à 100° C la température de la corde de cuivre d'un câble posé ayant 1 km de long, 150 mm² de section de cuivre et dans lequel le rapport $\frac{R}{r}$ serait égal à 2,7, il faut disposer d'une puissance d'environ 45 kW, en supposant la température du sol égale à 15° C.

Le calcul montre aussi que la température moyenne du câble est loin d'être de 100°, car la chute de température à travers l'isolant du câble, dans les conditions indiquées, est de 53° C, de sorte que la température du plomb n'est que de 47° C.

Imprégner un câble après pose en le chauffant à la température admise à l'usine serait, non seulement coûteux, mais exigerait un matériel compliqué et pas facile à transporter sur le terrain.

Il faut reconnaître, du reste, qu'il n'y aurait aucun intérêt à imprégner après pose des câbles à matière. Par contre, il est non moins évident que la possibilité d'imprégner des câbles à huile après pose présente de grands avantages. Pour mémoire, rappelons-en les principaux:

L'huile ayant un coefficient de dilatation beaucoup plus grand que celui du plomb, le câble, s'il est imprégné à l'usine, doit déjà être en relation constante avec un réservoir de compensation au moins, pendant une partie de sa fabrication, son transport, sa pose et pendant la confection des extrémités et jonctions. Cette précaution est évidemment inutile pour les câbles imprégnés après pose exclusivement. Ces câbles, au surplus, possèdent le sérieux avantage de pouvoir subir de sévères contrôles des propriétés mécaniques de la gaîne de plomb.

Il est facile à comprendre qu'un changement aussi profond dans la façon d'effectuer l'opération très importante de l'imprégnation des câbles n'a pas été réalisé sans que de nombreuses expériences aient mis en évidence les conditions les meilleures à remplir pour obtenir un câble à diélectrique sans défaut, dans les conditions qui étaient jugées habituellement défavorables.

Imprégner un câble dont le papier est supposé desséché, c'est substituer de l'huile au gaz qu'il contient. Ce gaz ne se trouve pas uniquement dans les espaces existants entre les fibres du papier, mais aussi, à l'état condensé, à la surface de ces fibres et dans les pores et les canaux qu'elles renferment. L'huile ne pouvant pratiquement pas chasser d'elle même le gaz qu'elle doit remplacer, ce gaz doit être évacué dans une opération préliminaire.

L'évacuation des gaz, se ferait très aisément si l'on pouvait assimiler le volume du gaz contenu dans le câble à un volume équivalent de gaz occupant exclusivement l'intérieur d'une enceinte métallique.

Or, cette similitude est bien loin d'exister. On connaît en effet la propriété que possèdent les corps poreux de condenser les gaz à leur surface. L'exemple le plus frappant est celui du charbon de bois, qui peut condenser des volumes considérables de gaz. C'est ainsi qu'il condense dans ses pores 90 fois son volume de gaz ammoniac.

Les fibres de cellulose présentent de nombreux pores, ainsi que des canaux, qui augmentent leur surface et par cela la propriété des fibres de retenir les gaz. L'essai suivant le met en évidence:

Soit un câble dans lequel le volume non occupé par les fibres est de 100 litres par exemple. Ce volume, ainsi que nous l'avons déjà dit, est à peu près égal au volume occupé par les fibres de cellulose. Soit, d'autre part, un tuyau en métal, en plomb par exemple, d'une contenance de 100 l également, et évacuons le gaz par une extrémité du câble et du tuyau, le vide étant mesuré à l'autre extrémité à l'aide d'une jauge MacLeod (voir fig. 1).

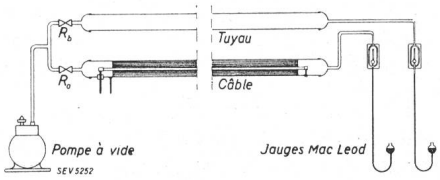

Fig. 1.
Schéma du dispositif utilisé pour comparer l'évacuation du gaz contenu dans un câble et dans un tuyau de plomb.

Si l'on porte sur un graphique le temps en abscisses et la pression résiduelle en ordonnées, le phénomène de l'évacuation du gaz pour l'un et l'autre des cas cités est rendu respectivement par les courbes *a* et *b* de la partie I de la fig. 2.

S'il est possible, après un temps T_1, d'une heure par exemple, d'obtenir à l'intérieur du tuyau un vide mesuré par une très faible pression résiduelle, qui peut être, suivant les conditions de l'essai, de l'ordre de grandeur de quelques centièmes de millimètre de mercure, il n'en est pas de même pour le câble, où la pression résiduelle est un multiple très élevé de la précédente. Cette pression résiduelle, nous le verrons plus loin, peut varier d'un câble à l'autre, suivant la nature du papier et celle du gaz qu'il contient.

La différence entre la pression résiduelle du câble et du tuyau s'accentue encore si l'on arrête la pompe à vide et ferme les robinets R_a et R_b (partie II de la fig. 2).

La très faible pression réalisée dans le tuyau se maintient, tandis que la pression dans le câble augmente. Cette augmentation s'explique facilement. Supposons que le gaz condensé par le papier était, avant l'évacuation, en équilibre avec le gaz compris entre les fibres, équilibre qui peut être schématiquement représenté par la fig. 3.

Lorsque la pression diminue, l'équilibre est rompu et du gaz quitte la fibre pour aller dans l'atmo-

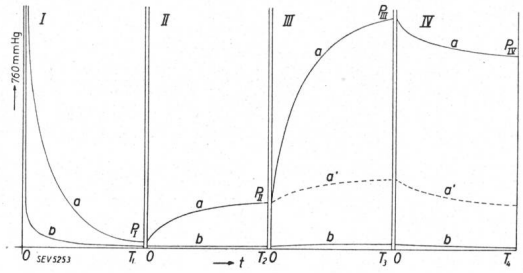

Fig. 2.

Pression résiduelle mesurée sur le câble, courbe a, et sur le tuyau, courbe b.

I. Les gaz sont évacués pendant le temps T_1.
II. Les robinets R_a et R_b sont fermés et la pompe à vide est arrêtée. Dans le tuyau, la pression reste pratiquement constante. Dans le câble, la pression augmente beaucoup et pendant longtemps par suite de la reddition du gaz condensé par les fibres.
III. Le câble et le tuyau sont chauffés. Dans le tuyau, la pression augmente à peu près conformément à la loi des gaz. Dans le câble, l'augmentation de pression (courbe *a*) est bien supérieure à celle calculée à l'aide du coefficient de dilatation (courbe *a'*).
IV. Le câble et le tuyau sont refroidis. Dans le tuyau, la pression revient à peu près à la valeur d'avant l'échauffement. Dans le câble, la pression descend bien moins qu'elle n'est montée, la pression finale P_{IV} est très supérieure à la pression initiale P_I.

sphère qui se trouve entre les fibres. Ce mouvement ne cessera que lorsqu'un nouvel état d'équilibre sera atteint. L'expérience montre que cet équilibre ne s'établit que très lentement. Si l'on admet que le phénomène est réversible, ce qui est très vraisemblable, il faudra de nombreux mois, sinon des années, pour atteindre une pression d'équilibre voisine de celle obtenue en chauffant et en refroidissant le câble comme il est indiqué dans la légende de la fig. 2, parties III et IV.

La chaleur, augmentant le mouvement des molécules, permet à l'équilibre de se réaliser plus ra-

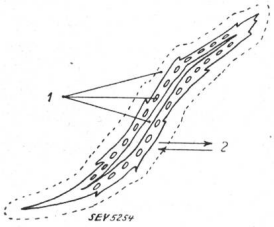

Fig. 3.

Schéma de l'équilibre entre le gaz condensé à la surface et à l'intérieur des fibres (*1*) et celui qui se trouve entre les fibres (*2*).

pidement. L'augmentation de pression constatée est beaucoup plus élevée que celle que l'on peut calculer à l'aide du coefficient α de dilatation des gaz; aussi, après refroidissement, la pression obtenue P_{IV} est-elle loin de reprendre sa valeur primitive P_{II}.

Quant à la pression résiduelle dans le tuyau de plomb, elle a augmenté très légèrement plus que ne le veut la loi des gaz, par suite de la reddition par la surface du plomb d'un peu de gaz, qui, en faible quantité, est condensé à sa surface.

La variation de pression à l'intérieur d'un câble auquel on a fait subir le traitement décrit plus haut, ainsi que la pression résiduelle P_{IV}, dépend de deux facteurs: le papier et le gaz. Le papier condense d'autant plus de gaz que la surface de ses fibres est plus mouvementée et que ces fibres renferment davantage de canaux et de pores, visibles ou non au microscope. D'autre part, la vitesse avec laquelle le gaz traverse le papier dépend de la compacité de celui-ci, c'est-à-dire de la finesse du feutrage des fibres de cellulose.

La complexité de la fibre, ainsi que la compacité du papier, peuvent varier dans de grandes proportions. Il est facile de trouver dans le commerce des papiers destinés aux câbles à haute tension, qui permettent d'obtenir, toutes choses égales d'ailleurs, des pressions P_{IV} pouvant varier dans le rapport de 1 à 20.

Pour un même papier, la quantité de gaz condensé dépend en partie du poids moléculaire du gaz. En règle générale, elle augmente avec lui. Ainsi l'azote, de poids moléculaire 28, est condensé en plus grande quantité que l'hydrogène, de poids moléculaire 2. La condensation dépend d'autre part de la constitution stéréochimique des molécules du gaz, constitution qui, pour certains gaz, peut jouer un rôle prépondérant. Ainsi, la quantité d'acide carbonique condensée par le papier est hors de proportion avec celle que l'on pouvait prévoir par la considération de son poids moléculaire. Dans les mêmes conditions expérimentales, la pression P_{IV} peut varier dans la proportion d'environ 1 à 20 lorsqu'on remplace l'azote par l'acide carbonique. Par conséquent, en faisant varier papier et gaz, la quantité de gaz qui restera dans un câble, dans les mêmes conditions, peut varier dans la proportion de 1 à 400 environ.

La quantité de gaz que l'huile aura à dissoudre lorsque le câble s'imprégnera sera donc très différente selon les cas. L'influence des gaz dissous sur la valeur de l'huile est complexe. Elle dépend en partie de la solubilité des gaz dans l'huile. A cet égard, l'acide carbonique compense dans une certaine mesure son affinité pour le papier.

Les nombreux essais de laboratoire qui ont été entrepris sur l'imprégnation des câbles à froid, dans des conditions analogues à celles que l'on peut réaliser après pose, ont eu pour but de préciser les conditions optima que doivent présenter le papier, l'huile et le gaz, pour que, d'une part, l'imprégnation s'effectue facilement et que, d'autre part, les qualités électriques du câble soient irréprochables, caractéristiques qui ne varient pas forcément dans le même sens.

En principe, le papier doit être le plus perméable possible, sans toutefois que soit compromis le rôle de «barrière diélectrique» qu'il doit jouer. On sait en effet que l'huile lamellée par des couches de papier possède une rigidité diélectrique notable-

ment supérieure à celle de l'huile seule. Cette amélioration provient en partie de la diminution du libre parcours des molécules ionisées par le champ électrique, et de la suppression de l'alignement suivant les lignes de force du champ électrique des particules solides éventuelles que peut contenir l'huile.

Ces particules alignées entre les électrodes peuvent, ainsi qu'on le sait, constituer des «ponts» de moindre résistance.

Il est évident que l'efficacité de la barrière diminuera lorsque la porosité du papier augmentera, autrement dit lorsque les fibres de cellulose seront moins serrées. Pourtant, la loi qui lie ces deux propriétés est loin d'être simple, elle se complique notamment de l'effet des constantes diélectriques différentes de la cellulose et de l'huile.

L'huile doit être peu visqueuse, posséder une rigidité diélectrique élevée, être stable dans le champ électrique jusqu'à des valeurs voisines de celle qui produira la disruption, accuser des pertes diélectriques faibles et peu dépendantes de la température, et pouvoir dissoudre sans amoindrissement l'inévitable gaz résiduel contenu dans le câble dont on a évacué le gaz au mieux.

Il serait trop long de passer en revue dans cet article tous les essais entrepris au laboratoire pour déterminer la meilleure combinaison des quatre variables, papier, gaz, huile, fabrication, permettant de réaliser dans de bonnes conditions l'imprégna-

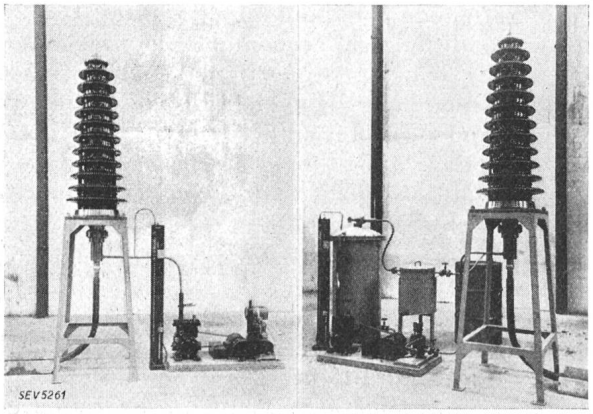

Fig. 4.
Groupe moto-pompe pour l'évacuation du gaz.

Fig. 5.
Groupe moto-pompe utilisé pour la dessication et le dégazage de l'huile et pour l'imprégnation.

tion après pose de câbles qui doivent être sans défaut. Les résultats de ces essais peuvent se résumer dans cette constatation de grande importance pratique:

Il est possible d'imprégner après pose, à froid, des câbles destinés à la haute et à la très haute tension, de qualité égale à celle des meilleurs câbles imprégnés à l'usine, et pour lequel on a mis en œuvre le matériel perfectionné que comportent les installations d'imprégnation à poste fixe.

Pour évacuer le gaz contenu dans le câble, pour préparer l'huile et accomplir l'imprégnation, de petits groupes et de petites installations transportables ont été mis au point. Ils sont respectivement représentés par les fig. 4 et 5. Ajoutons que l'imprégnation des câbles après pose peut être conduite avec une grande sécurité et même plus rapidement qu'à l'usine. Pourtant, si ce résumé suffit pour caractériser la valeur pratique de ce nouveau mode d'imprégnation, il est indiqué de le compléter de quelques considérations théoriques et de résultats de mesures de laboratoire, qui permettront de se

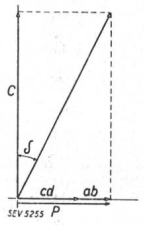

Fig. 6.
Diagramme des courants dans un condensateur ordinaire.
c courant capacitif;
p courant de pertes = courant de conduction + courant d'absorption.

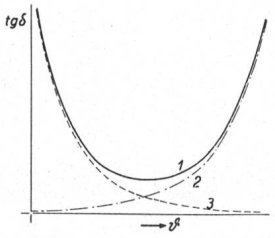

Fig. 7.
Variations des pertes d'un câble en fonction de la température.
1 Pertes totales.
2 Pertes dues à la conduction.
3 Pertes dues à l'absorption.

rendre compte par des chiffres de la qualité des câbles obtenus.

Les gaz sont les seuls diélectriques parfaits, les seuls dont les pertes sont nulles tant que la tension d'ionisation n'est pas atteinte. Tous les autres isolants sont caractérisés par des pertes diélectriques provenant d'une part de leur conductibilité et d'autre part de leur pouvoir «d'absorber» de l'électricité.

Considérons deux condensateurs sous tension alternative et isolés, le premier avec de l'air, le second avec un diélectrique autre qu'un gaz, par exemple avec du papier imprégné. Le courant dans le condensateur à air sera décalé exactement de 90° par rapport à la tension. Le condensateur isolé au papier imprégné sera le siège de deux courants, l'un capacitif, décalé de 90° comme précédemment, l'autre en phase avec la tension, provenant de la conductibilité et de l'absorption de l'isolant.

Graphiquement, ce phénomène peut être rendu par la fig. 6 dans laquelle le vecteur *c* représente le courant de capacité, tandis que le vecteur *p* représente le courant correspondant aux pertes du condensateur. L'angle δ est appelé angle de pertes et sa valeur est généralement exprimée par celle de sa tangente.

Le courant de conduction et le courant d'absorption sont d'origines très différentes. Ils n'ont que ceci de commun qu'on ignore presque tout de leur origine et que l'un et l'autre constituent des pertes. Le courant d'absorbtion semble être dû à des changements d'orientation de molécules polarisées et le courant de conduction à des déplacements d'ions ou de particules chargées électriquement.

L'une des caractéristiques qui différencient très nettement les deux courants, c'est que le premier

décroît [2]) et que le second croît avec la température.

Aussi est-il relativement facile de faire le partage des pertes dues à l'un et l'autre de ces courants. Considérons, en effet, les pertes si caractéristiques d'un câble à matière. Elles sont représentées graphiquement par une courbe dont l'allure, qui rappelle un V, provient de la somme des courbes caractérisant, l'une l'absorption, l'autre la conduction (fig. 7). Les pertes sont surtout dues à gauche du minimum à l'absorption, à droite à la conduction.

Ceci dit, l'examen de la figure 8 permet de se rendre mieux compte des propriétés du diélectrique des câbles à huile imprégnés après pose, tant au point de vue de leurs valeurs absolues, qu'à celui de leur comparaison avec les valeurs caractérisant les câbles à matières. Ce qui se dégage à première vue de l'examen de cette figure, c'est que les pertes des câbles à huile sont très petites et que leur minimum se trouve à une température voisine de 85° C, au lieu d'environ 38° pour les câbles à matière. On peut donc en déduire que les câbles à huile peuvent fonctionner en toute sécurité jusqu'à des températures voisines de 100°. L'expérience a confirmé cette déduction.

Le câble à matière le mieux imprégné présente toujours un peu d'ionisation. L'angle de pertes augmente avec la tension. Pour les câbles à huile, par suite de leur imprégnation totale, cet angle n'augmente pas, mais baisse au contraire avec la tension aux températures élevées. A —40° C l'huile commençant à se figer, une très légère ionisation apparaît. Sur la fig. 8 on a reporté aussi la tangente de l'angle de pertes des deux composants de l'isolant

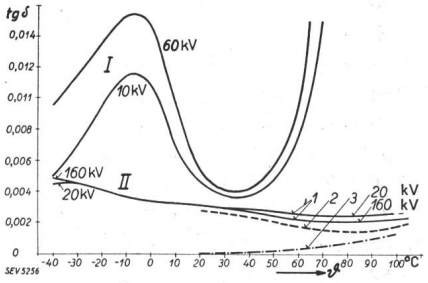

Fig. 8.
Variation de l'angle de pertes des câbles à huile et des câbles à matière, en fonction de la température et de la tension, et variations en fonction de la température de l'angle de pertes du papier et de l'huile utilisée pour l'imprégnation des câbles après pose.
I Câbles à matière. *II* Câbles à huile.
1 Câbles. *2* Papier sec. *3* Huile.

du câble, le papier et l'huile. La tg δ du câble est, grosso modo, la somme de tg δ de l'huile et de tg δ du papier.

Comme pour les câbles à matière, il est indiqué de faire subir aux câbles à huile imprégnés après pose un essai de tension continue. C'est pourquoi nous nous sommes procuré un générateur à courant continu permettant d'obtenir de très hautes tensions.

Ce générateur, construit suivant un nouveau principe mis au point par la Compagnie générale de Radiologie à Paris, se compose de 4 transformateurs élémentaires semblables, dont chacun permet d'une part de produire une tension redressée de 120 kV, d'autre part de transmettre la basse ten-

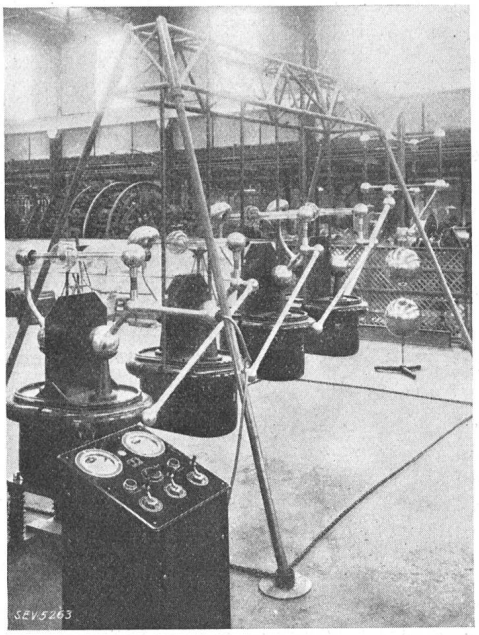

Fig. 9.
Générateur à courant continu 450 kV.

sion nécessaire à l'alimentation d'un autre élément. Il est donc possible de mettre en série le nombre des éléments nécessaires pour obtenir la tension voulue. Pour avoir une installation facilement transportable et facile à bâcher sur le terrain en cas de mauvais temps, les transformateurs n'ont pas été placés sur des plateformes isolantes, mais suspendus à un châssis de métal (fig. 9).

Chacun des éléments de ce générateur se compose d'une cuve métallique, qui contient un bâti magnétique de transformateur sur lequel se trouvent deux enroulements secondaires: l'un pouvant donner une tension de 120 kV max. et l'autre une basse tension de 220 V pour l'alimentation de l'élément générateur suivant. Ces enroulements sont convenablement isolés entre eux et par rapport à la cuve. Le couvercle de la cuve comporte deux traversées haute tension, qui servent à la fois de support et de connexion à un kénotron placé horizontalement et pouvant supporter deux fois la tension fournie par le transformateur, soit 240 kV.

L'alimentation d'un transformateur se fait par la cathode du kénotron et c'est la cuve du transformateur qui est portée à la haute tension produite par le générateur. La polarité de cette tension par rapport à la terre est négative, de manière que le champ électrique dirigé sur les kénotrons ne gêne pas leur émission électronique.

Le dernier élément du générateur est relié à un spintermètre par une résistance d'amortissement de 3,5 mégohms. Ce spintermètre sert à la fois de limiteur de tension et d'appareil de mesure de la tension appliquée au câble, qui est relié au milieu de la résistance d'amortissement.

Quel que soit leur nombre, les éléments du générateur sont alimentés par l'intermédiaire d'un autotransformateur et d'un rhéostat montés dans un pupitre de commande. Ce pupitre est muni notamment de boutons poussoirs «marche-arrêt» pour la commande du contacteur, d'un voltmètre indiquant la tension primaire d'alimentation et d'un milli-

[2]) Pour les câbles imprégnés de matière ordinaire contenant de la résine, le courant d'absorption aux basses températures croît lorsque la température s'élève. Il diminue avec l'accroissement de la température lorsque celle-ci dépasse —5° C.

ampèremètre permettant de mesurer le courant débité par le générateur.

Avant de mettre un câble sous tension, il faut tout d'abord régler le spintermètre pour la tension d'alimentation à laquelle on désire essayer le câble et connecter convenablement

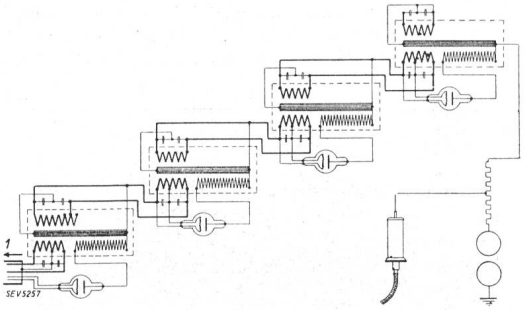

Fig. 10.
Schéma de fonctionnement du générateur à courant continu 450 kV de la Compagnie Générale de Radiologie, Paris.
1 Vers le pupitre de commande.

l'autotransformateur. On appuie ensuite sur le bouton «marche» et l'on manœuvre le rhéostat plus ou moins rapidement de manière à atteindre la tension d'essai dans le temps désiré.

La fig. 10, représente le schéma de fonctionnement du générateur.

Après de nombreux essais de laboratoire, tous concluants, et dont l'un portant sur 300 m de

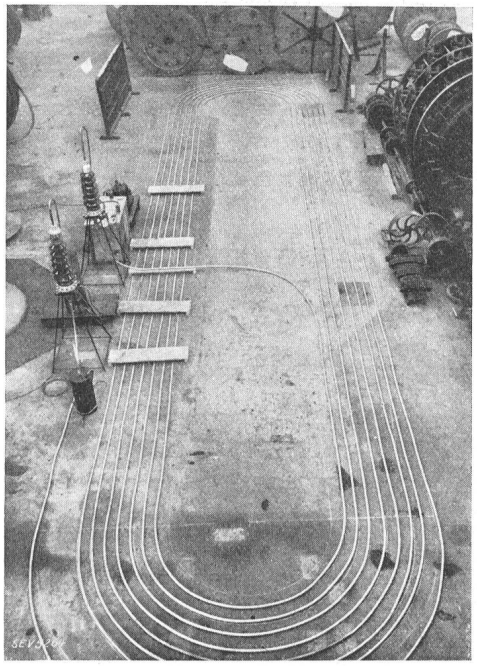

Fig. 11.
Câble d'essai sur la plateforme du laboratoire.

câble est rendu par la fig. 11, nous avons procédé aux installations suivantes de câbles imprégnés après pose:

I. Canalisation d'essai triphasée, 50 kV, installée à la sous-station de la Voltastrasse du Service électrique de la Ville de Bâle.

En 1932, grâce à l'obligeance du Service électrique de la Ville de Bâle, nous avons eu l'occasion de placer à l'intérieur de sa nouvelle station de la Voltastrasse, en série avec des câbles à matière, une canalisation d'essai triphasée, 50 kV, formée de trois câbles à huile d'une longueur de 68 m chacun et présentant les caractéristiques suivantes:

Conducteur	95 mm², diamètre	15 mm
Isolant	épaisseur	5 mm
Plomb	»	2,5 mm

(Le plomb est fretté d'un ruban de cuivre recouvert de jute asphalté.)

Gradient maximum . . . . . 7,55 kV/mm

Ainsi qu'il ressort de ces chiffres, l'essai a été rendu intéressant, malgré la valeur de la tension relativement basse pour des câbles à huile, grâce à un choix approprié des données constructives du câble: L'isolement présente une épaisseur telle que le gradient maximum, sans être très élevé, est tout de même approximativement le double de celui du câble à matière connecté en série.

Après leur imprégnation, qui ne nécessita que 2 h, y compris l'évacuation du gaz, les câbles furent soumis à un essai de tension continue de 116 kV pendant une heure. Les mesures d'angle de pertes avant la mise en service des câbles et après une année, puis deux années, puis trois années de fonctionnement, ont montré la grande stabilité de ces câbles, qui ne présentent pas d'ionisation. Cette stabilité a été mise en évidence de façon frappante par l'essai de laboratoire suivant: Une éprouvette de 35 m de câble, prélevée sur l'excédent de fabrication du câble décrit, fut soumise aux épreuves très sévères que résume le tableau I.

Tableau I.

Epreuve	Tension	Gradient max.	Température °C		Durée de l'essai	Temps	Angle de pertes tg $\delta \cdot 10^{-4}$					
No.	kV	(kV/mm)	Pb	Cu	mois	jours	20 kV	30 kV	40 kV	50 kV	60 kV	70 kV
1	60	15,7	15	15	6	0	39	39	39	38	38	38
						30	31	31	30	30	29	29
						153	32	31	31	30	30	30
						183	32	32	32	31	31	30
2	60	15,7	100	117	1	214	32	32	31	31	31	30
3	60	15,7	100 (le jour) 15 (la nuit)	117 15	5	365	33	33	33	33	33	33

L'échauffement du câble dans les essais 2 et 3 fut réalisé en induisant dans le conducteur un courant de 380 A correspondant à une densité de 4 A/mm². Sur une partie de sa longueur, le câble fut isolé thermiquement, ce qui permit d'atteindre une température de 100° au plomb et de 117° au conducteur. Cette température de 117° correspond à l'échauffement qu'aurait produit un courant de 750 A, soit 7,9 A/mm². La considération des valeurs trouvées pour la tangente des angles de pertes permet de faire deux constatations intéressantes:

1° La mise sous tension du câble a eu comme effet de diminuer les pertes. Nous avons eu l'occasion de constater ce curieux phénomène à quelques reprises déjà sur les câbles à huile.

2° Pendant ce sévère essai de tension d'une année, les pertes sont restées pratiquement constantes. La dernière mesure fut faite dans d'autres conditions et avec un autre pont que les précédentes, ce qui peut expliquer la très petite différence enregistrée.

II. Canalisation d'essai monophasée, 132 kV, installée à la Centrale de Vernayaz des CFF (fig. 12).

Cette canalisation est formée de deux câbles de 690 m chacun, ayant les caractéristiques suivantes:

Conducteur	150 mm², diamètre	20 mm
Isolant	épaisseur	9 mm
Plomb	»	2,5 mm

(Le plomb est fretté de deux rubans de cuivre recouverts de jute asphalté.)

Gradient maximum . . . . . 10,3 kV/mm

Ces deux câbles ont chacun une capacité de 0,19 μF et peuvent par conséquent amortir les surtensions qui se produisent sur une ligne aérienne (voir à ce sujet le rapport

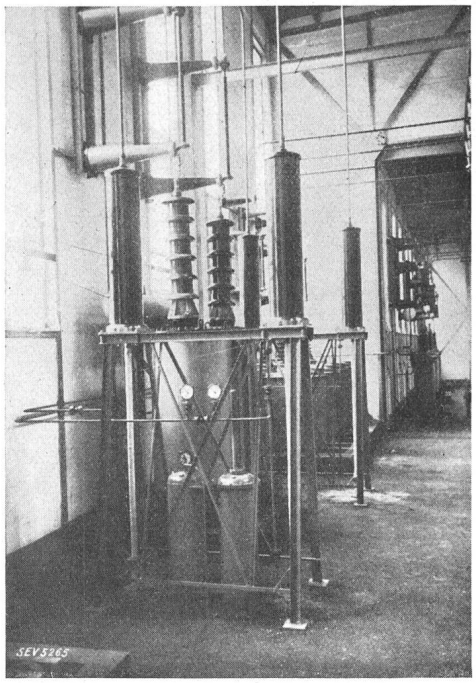

Fig. 12.
Câble d'essai 132 kV. Centrale de Vernayaz. Extrémités et réservoirs de compensation.

présenté par K. Berger à la session 1931 de la CIGRE, tome III, pages 316—352). Ces câbles sont respectivement placés en série avec les phases U et V, service B, dont il est fait mention aux pages 325 et 326 du dit rapport. Ce service est le plus exposé aux surtensions (fig. 13).

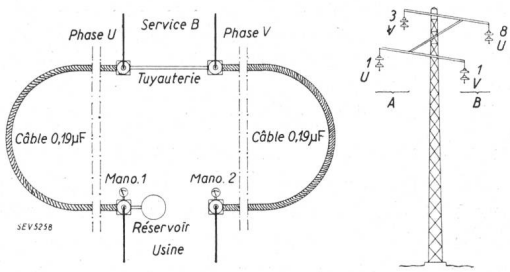

Fig. 13.
Schéma de l'installation des câbles à huile, à Vernayaz. Les chiffres placés en regard des phases indiquent le nombre de contournements causés par la foudre pendant les étés 1929 et 1930.

L'imprégnation des deux câbles se fit simultanément. L'évacuation du gaz dura 11 h et l'imprégnation proprement dite 8 h. La vitesse d'imprégnation n'est donc pas inférieure à celle qui est réalisée à l'usine, où souvent même cette vitesse n'est pas atteinte.

La fig. 14 montre le résultat du contrôle de la variation de capacité pendant l'imprégnation. Les câbles furent éprouvés par un essai en courant alternatif de 150 kV pendant 15 min et par un essai en courant continu de 280 kV pendant 1 h. Les gradients maxima furent respectivement 23, 4 et 43,6 kV/mm. La tangente de l'angle de pertes, mesurée de 10 kV jusqu'à 70 kV, fut trouvée petite, $32 \cdot 10^{-4}$ pour l'un et $30 \cdot 10^{-4}$ pour l'autre, et indépendante de la tension.

Pour contrôler par un essai pratique la facilité d'écoulement de l'huile dans le canal formé par le conducteur, de nombreux essais d'échauffement ont été faits, pendant les-

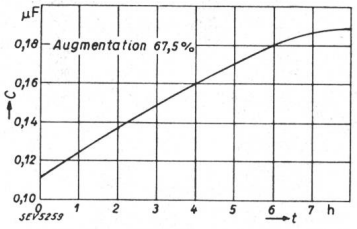

Fig. 14.
Variation de la capacité pendant l'imprégnation.

quels furent relevées des lectures de pression des manomètres M_1 et M_2 (fig. 13). Le manomètre M_1 situé près du réservoir de compensation resta presque constant. Le manomètre M_2 situé à l'autre extrémité de la canalisation longue de 1380 m accusa des surpressions pendant l'échauffement et des dépressions pendant le refroidissement, ainsi que le montre la fig. 15.

Dans la pratique, la charge du câble étant généralement inférieure à 200 A et les variations de charge beaucoup moins

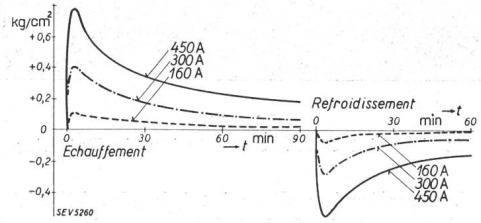

Fig. 15.
Surpression et dépression pendant l'essai d'échauffement, à 450 A, 300 A et 160 A.

brusques que celles réalisées au cours des essais, les surpressions et dépressions furent très petites, de 0,05 atm. au maximum, soit près de 10 fois moins que les valeurs trouvées pour l'échauffement brusque à 300 A, valeurs qui sont bien loin de compromettre le fonctionnement du câble.

Les câbles sont en service depuis le mois d'août 1934. Leurs pertes, mesurées après une année de fonctionnement, furent trouvées identiques à celles du début.

III. Canalisation d'essai triphasée à 150 kV installée à la sous-station de Bottmingen des Usines électriques Olten-Aarbourg.

Cette canalisation d'essai est formée de trois câbles de 100 m chacun, ayant les caractéristiques suivantes:

Conducteur	95 mm², diamètre	15 mm
Isolant	épaisseur	15 mm
Plomb	»	2,5 mm

(Le plomb est fretté d'un ruban de cuivre recouvert de jute asphalté.)

Gradient maximum . . . . . 10,6 kV/mm

Ces câbles, posés en juillet 1934 et essayés à une tension continue de 380 kV, gradient maximum 46,4 kV/mm, fonctionnent comme condensateurs. Ils sont reliés à une ligne aérienne par l'intermédiaire de fusibles haute tension en série avec une résistance (fig. 16).

L'angle de pertes de ces câbles est indépendant de la tension entre les limites mesurées, soit 10 et 70 kV; sa tangente atteint $32 \cdot 10^{-4}$.

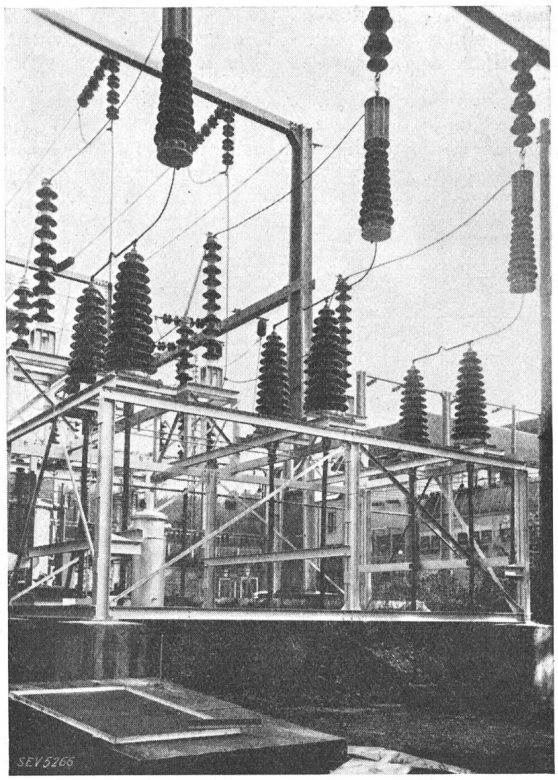

Fig. 16.
Câble d'essai 150 kV. Sous-station de Bottmingen.

IV. Canalisation d'essai triphasée, 150 kV, installée à la centrale de Mühleberg des Forces motrices bernoises.

Cette canalisation est formée de trois câbles d'une longueur de 300 m chacun, ayant les caractéristiques suivantes [4]:

Conducteur	150 mm², diamètre	20 mm
Isolant	épaisseur	13 mm
Plomb	»	2,5 mm

(Le plomb est fretté de deux rubans de cuivre recouverts de jute asphalté.)

Gradient maximum . . . . . 10,5 kV/mm

Trois jonctions, dont deux à cloison et une simple, furent montées sur ces câbles, ainsi que le montre la fig. 17.

Comme nous l'avons dit dans notre premier article, les jonctions à cloison permettent d'établir ou d'interrompre à volonté, par la manœuvre d'un robinet, la communication de l'huile d'un tronçon de câble à l'autre. Elles possèdent les tubulures nécessaires à l'évacuation du gaz, à l'introduction de l'huile et au couplage éventuel avec un réservoir de compensation. Malgré les dimensions très réduites de ces jonctions, leur sécurité est encore supérieure à celle du câble.

Avant d'être mis en service, les câbles furent essayés pendant une heure à une tension continue de 348 kV correspondant à un gradient maximum de 41,5 kV/mm. L'angle de pertes fut mesuré de 30 kV à 150 kV. Voici, à titre d'exemple, les résultats obtenus sur l'un de ces câbles:

Tension entre Cu et Pb (kV)	31	62	93	121	152
Gradient max. kV/mm . .	4,2	7,4	11,2	14,5	18,3
$tg \cdot \delta \cdot 10^{-4}$	29	29	30	30	31

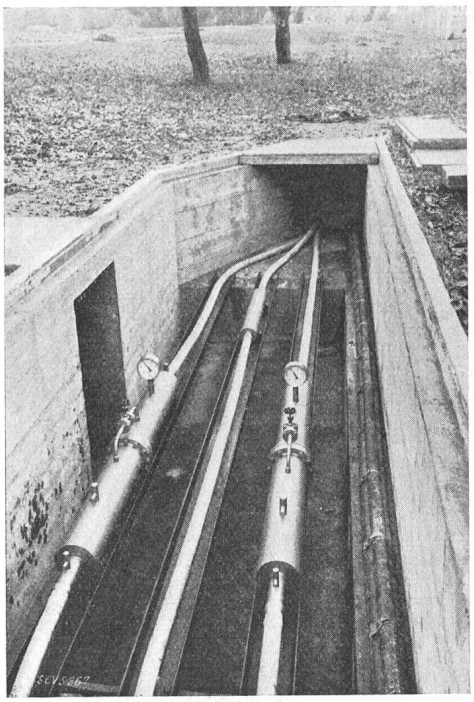

Fig. 17.
Jonctions à cloison et jonction simple.

V. Canalisation triphasée, 70 kV, installée à la centrale de Hauterive des Entreprises électriques fribourgeoises.

Cette canalisation comprend quatre câbles, dont un de réserve, de 160 m chacun. Leurs principales caractéristiques sont les suivantes:

Conducteur	95 mm², diamètre	15 mm
Isolant	épaisseur	6 mm
Plomb	»	2,5 mm

(Le plomb est fretté de deux rubans de cuivre recouverts de jute asphalté.)

Gradient maximum . . . . . 9,2 kV/mm

Les valeurs mesurées pour l'angle de pertes de ces câbles, de 18 kV jusqu'à 60 kV, entre cuivre et plomb, ont montré, comme dans les cas précédents, l'excellence de ces câbles, mis sous tension en novembre 1934.

En conclusion, les câbles imprégnés après pose ont d'intéressantes propriétés électriques; ils se fabriquent et s'installent très facilement et peuvent, dès leur mise sous plomb jusqu'aux préparatifs pour l'imprégnation, être soumis à de sévères épreuves de pression permettant de contrôler les propriétés mécaniques de la gaîne de plomb, propriétés qui jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tous les câbles électriques et des câbles à huile spécialement.

[4]) Un échantillon de ce câble est représenté sur la fig. 12 parue dans l'article précédent, voir Bull. ASE 1935, p. 450.