

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 29 (1938)
Heft: 10

Artikel: Technique des câbles en général
Autor: Schneeberger, P.E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058973>

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: 09.01.2026

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:

Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité, Zurich 8

ADMINISTRATION:

Zurich, Stauffacherquai 36 ♦ Téléphone 51.742
Chèques de postaux VIII 8481

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXIX^e Année

N° 10

Vendredi, 13 Mai 1938

La Technique des câbles.

Compte-rendu de la journée de discussion de l'ASE, du 27 novembre 1937,
à la Tonhalle de Bienne.

621.315.2

La journée de discussion de Biene, qui traita de tous les domaines de la technique des câbles, attira environ 150 participants, membres et hôtes. Elle fut dirigée par le président de l'ASE, Monsieur M. Schiesser, Dr. h. c., administrateur-délégué de la S. A. Brown, Bovéry et Cie, Baden. Nous reproduisons ci-après les 3 conférences principales, savoir:

a) Technique des câbles en général, par P. E. Schneeberger, Câbleries de Brougg S. A.

b) Câbles pour la haute et très haute tension, par J. Borel, Dr. ès sc., Sté d'exploitation des Câbles électriques, système Berthoud, Borel & Cie, Cortaillod.

c) Les essais des câbles électriques, par E. Foretay, Câbleries et Tréfileries de Cossy.

Les autres conférences et interventions seront publiées plus tard.

Technique des câbles en général.

Par P. E. Schneeberger, Brougg.

L'auteur expose les questions fondamentales de la construction, de la pose et de l'exploitation des câbles électriques à courant fort. Il dit également quelques mots des câbles à courant continu et des câbles à haute fréquence.

Es werden die Grundfragen des Baues, der Verlegung und des Betriebes des Starkstromkabels dargelegt. Dabei werden auch die Gleichstromkabel und die Hochfrequenzkabel gestreift.

Un aperçu général de l'état actuel de la technique des câbles doit tenir compte que cette branche de l'industrie n'est pas seulement basée sur la technique générale de l'électricité et des machines, mais également sur la physique et la chimie. En effet, aussi bien les câbles téléphoniques ordinaires que les câbles à haute fréquence les plus modernes exigent l'application de nombreux domaines spéciaux de la technique des courants forts et celle de toute la science des courants faibles. Pour mesurer les câbles les plus simples, comme les plus compliqués, on doit avoir recours à un nombre impressionnant d'appareils, allant du pont de Weathstone à l'oscillographe cathodique et de la pile sèche au transformateur à très haute tension et à l'installation de choc. On conçoit donc qu'il ne sera possible que de traiter partiellement ou d'effleurer seulement quelques-uns des nombreux aspects de la technique des câbles, au cours de cette brève conférence.

On laissera de côté les questions relatives aux câbles sous-marins et transatlantiques, sauf le cas des câbles sous plomb pour pose immergée. Les câbles sous-marins constituent en effet une catégorie importante, dont la construction diffère en principe de celle de tous les autres types de câbles,

car ils ne comportent pas de gaine de plomb pour protéger leur isolation contre l'humidité. Leur isolation à la gutta-percha est résistante à l'humidité; il suffit donc qu'ils soient munis d'une ou de plusieurs protections métalliques, qui ne sont pas nécessairement étanches et qui les protègent contre les dépréhensions et supportent les efforts de traction. De même, on ne s'occupera pas ici des fils et câbles isolés pour installations intérieures et autres applications de ce genre, qui ne sont également pas munis de gaines de plomb. Enfin, on s'abstiendra de parler des câbles téléphoniques, qui ont été traités en détails par M. le professeur Forrer lors de la journée de discussion du 23 novembre 1935, à Olten¹⁾.

On ne s'occupera donc que des câbles électriques à gaine de plomb destinés au montage souterrain, soit directement dans le sol, dans les caniveaux ou autres, soit sous l'eau.

La presse à plomb.

La construction des câbles sous plomb et le développement de la technique des câbles n'ont été

¹⁾ Bull. ASE 1936, No. 20, p. 557.

pratiquement possibles que grâce à l'invention de la presse à plomb, qui permet d'enrober d'une gaine de plomb absolument étanche, de longueur quelconque, les conducteurs isolés.

Au début, on a tenté de protéger contre l'humidité les fils et les câbles isolés en les introduisant dans des tubes de plomb d'un diamètre intérieur suffisant, que l'on faisait ensuite passer dans des calibres afin de ramener leur diamètre à celui des fils isolés. Ce procédé très incomplet n'a toutefois jamais acquis une grande importance pratique. Le progrès ne fut réel que grâce à l'invention de la presse à plomb, qui permet de recouvrir directement d'une gaine de plomb étanche les fils et câbles isolés, comme cela se fait encore de nos jours. Par une coïncidence curieuse, mais assez fréquente en technique lorsque la solution d'un problème devient de plus en plus impérieuse pour les milieux intéressés, cette presse fut conçue presque simultanément par deux inventeurs fort éloignés. C'est ainsi qu'à la suite des inventions de François Borel et de Werner von Siemens, en 1877 et 1878, les premières presses à plomb furent construites en 1879. Ces presses étaient monocylindriques et le câble les traversait verticalement de haut en bas ou des bas en haut. Ce type de presse n'est plus utilisé.

En 1881 déjà, la presse de Huber construite tout d'abord à Vienne fut fabriquée par Krupp sous une forme plus perfectionnée. Il s'agissait d'une presse horizontale à deux cylindres latéraux. Le câble traversait horizontalement cette presse.

Toutefois, à côté de cette presse horizontale, les presses verticales reprirent bientôt de l'importance, sous forme de types beaucoup plus puissants. Dans toutes les presses verticales modernes, le câble traverse horizontalement la presse, comme dans la presse Huber et non plus comme dans les premières presses de Borel et de Siemens.

Construction du câble.

Le câble à courant fort comporte généralement quatre parties essentielles:

- 1° le conducteur;
- 2° le diélectrique;
- 3° la gaine de plomb;
- 4° la protection de la gaine de plomb.

Le conducteur est normalement une torsade de fils de cuivre ou d'aluminium, afin que le câble soit aussi souple et aussi maniable que possible. Le procédé de retordage dépend de la section du conducteur et parfois de l'emploi prévu du câble. Les fils de cuivre disposés en plusieurs couches sont retordus de façon à présenter une forme ronde ou une forme sectoriale, dans des machines spéciales.

Une fois le conducteur confectionné, on place l'isolation constituée de nos jours, spécialement

pour les câbles à haute tension, par un papier dont la qualité doit évidemment répondre à des exigences tout à fait particulières. Dans la plupart des usines, le papier est préalablement coupé à la largeur la mieux appropriée, puis mis en place par

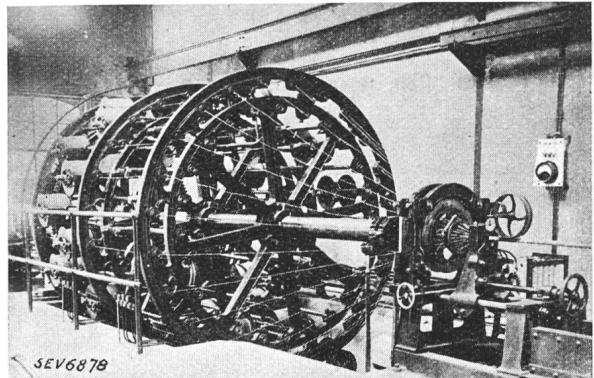


Fig. 1.
Machine à câbler les conducteurs.

des machines à isoler tangentielles. On cherche surtout à ce que le papier soit soigneusement appliqué sur le conducteur sans pli, afin d'éviter les vides et de réaliser un diélectrique homogène. Ceci est particulièrement important pour les câbles à haute tension, où les épaisseurs d'isolation doivent parfois atteindre jusqu'à 24 mm (pour les câbles à 220 kV).

Lorsqu'il s'agit de câbles à plusieurs conducteurs, les conducteurs isolés sont câblés ensemble sur des machines spéciales.

Le câble est alors prêt au séchage et à l'imprégnation. Ces deux traitements sont de la plus haute importance pour la sécurité de service des

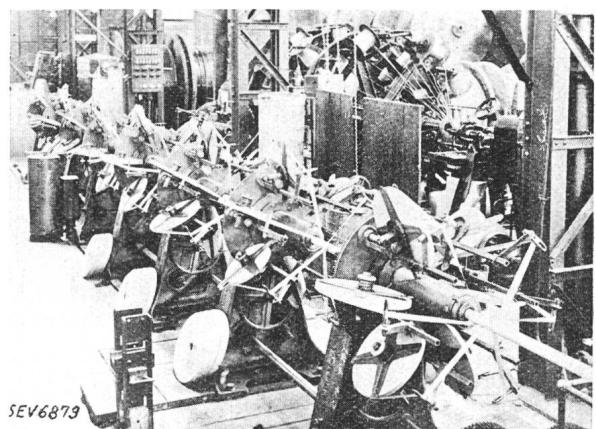


Fig. 2.
Machine à isoler tangentielle.

câbles et exigent toute l'attention des constructeurs, ainsi que les installations les plus soignées. Le séchage et l'imprégnation se font dans des cuves à vide, munies des instruments enregistreurs les plus perfectionnés. Ces cuves permettent l'emploi du vide, de la pression, ainsi que d'un échauffement

et d'un refroidissement artificiel. La fabrication des câbles modernes à très haute tension, câbles à gaz sous pression et câbles à huile fluide, nécessite également de tels dispositifs, du moins en partie.

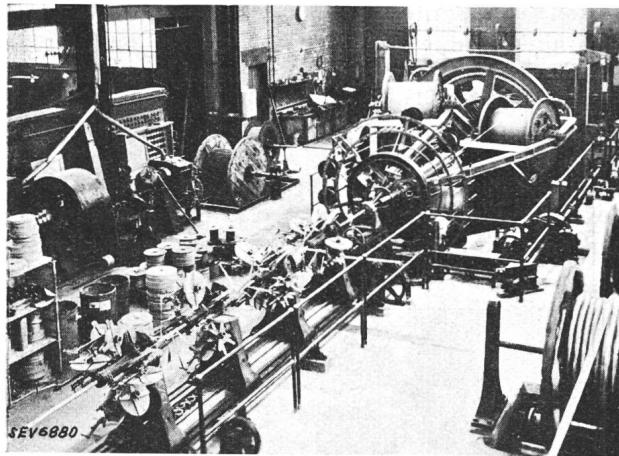


Fig. 3.

Machine à câbler pour câbles à conducteurs multiples.

Le câble imprégné est alors enfermé dans une gaine de plomb qui le protégera contre toutes les sollicitations extérieures d'ordre mécanique et chimique. La presse qui sert à la confection de cette gaine de plomb est certainement la machine la plus intéressante de l'industrie des câbles.

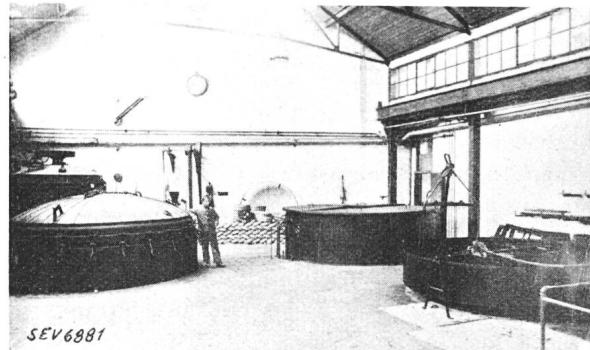


Fig. 4.
Cuve à vide.

La gaine de plomb.

Le fonctionnement de la presse à plomb est le suivant: Le plomb est fondu dans des chaudières

spéciales, chauffées généralement au charbon, au mazout ou à l'électricité, ceci uniquement dans le but de pouvoir remplir les récipients de la presse. Dans ceux-ci, le plomb se solidifie immédiatement, puis il est réchauffé bien au-dessous du point de fusion, afin de lui donner la plasticité nécessaire au pressage et de faciliter son moulage autour du câble. On doit veiller à ce que le plomb dans les récipients n'atteigne pas une trop haute température, trop proche de celle de l'état liquide, sinon le plomb pourrait exploser hors du bloc de la presse, du fait de l'énorme pression à laquelle il est soumis dans les récipients et dans le bloc.

Le plomb à l'état solide est donc pressé à l'intérieur de la presse entre un poinçon et une matrice sous la forme d'une gaine plaquée autour du câble. Le câble passant dans le poinçon creux est entraîné par la gaine de plomb qui avance peu à peu. Le ou les pistons de la presse sont actionnés par pression hydraulique, fournie généralement par une pompe à triple effet.

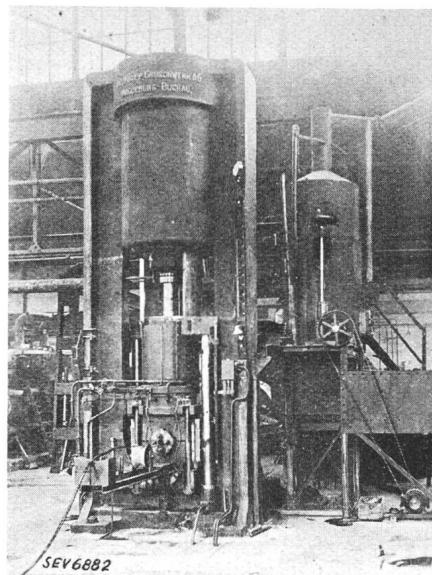


Fig. 6.
Presse à plomb verticale.

Dans les presses Huber horizontales de Krupp, la pression hydraulique est au maximum de 300 kg/cm² et la pression spécifique exercée sur le plomb dans les récipients atteint environ 3300 kg/cm², lorsque le rapport entre la surface du pis-

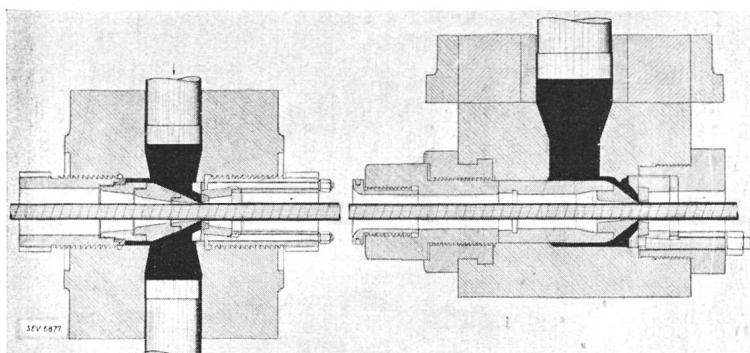


Fig. 5.

A gauche:

Presse à plomb horizontale, système
Huber, en coupe horizontale.

A droite:

Presse à plomb verticale, système
Krupp, en coupe verticale.

ton de la pompe et celle du piston de la presse est de 11 : 1. Dans le cas de la presse Krupp verticale, la pression hydraulique maximum est de 400 kg/cm² et la pression spécifique sur les plomb de 5600 kg/cm² (le rapport des surfaces étant de 14 : 1). Si l'on tient compte de la surface du piston de la presse, la pression totale atteint donc environ 1 150 000 kg dans les presses Huber et environ 1 800 000 kg dans les presses Krupp.

Le remplissage utile, c'est-à-dire la quantité de plomb qui peut être pressée à chaque recharge est de 150 à 200 kg dans les presses Huber et de 300 à 1200 kg dans les presses Krupp verticales.

L'augmentation continue des diamètres des câbles sous plomb rend de plus en plus importante la question de l'étanchéité et de la résistance à la pression des gaines de plomb. Les «coutures» de la gaine de plomb jouent un rôle particulier à ce point de vue. En effet, du fait que le plomb pénètre dans la matrice par deux lumières et qu'il se produit un changement de direction entre le sens de déplacement du piston et le sens de sortie de la gaine, il pourrait facilement se former des «coutures en long» dans la gaine, si la liaison à l'intérieur du bloc de la presse n'était pas absolument parfaite.

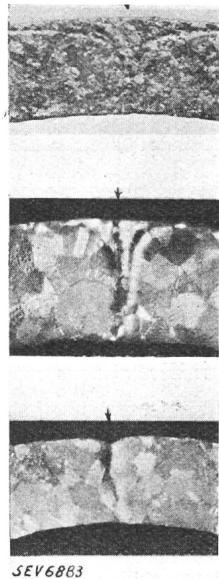


Fig. 7.
Coutures longitudinales d'une gaine de plomb.

dans le cas des presses horizontales. Enfin, il faut que le chauffage des récipients à plomb soit correct, ainsi que celui du bloc dans les presses verticales. La température du plomb peut varier entre 100° C au minimum et 140° C au maximum dans les récipients, et entre 140° C et 180° C (jusqu'à 210° C pour le plomb à l'étain) dans le bloc de la presse.

Depuis quelque temps, les exigences de plus en plus sévères que posent à ce point de vue les types de câbles modernes rendent encore plus important le problème d'une fabrication de gaines réellement sans coutures et aussi résistantes que possible à la pression. Les nouvelles constructions de câbles à huile et à pression pour hautes tensions de service posent des exigences tout à fait spéciales en ce qui concerne la résistance des gaines de plomb. Pour augmenter la dureté et ainsi la capacité de support

et la résistance des gaines de plomb, on peut ajouter 1 à 3 % d'étain. On prévoit notamment cette adjonction pour les câbles à courant faible à isolation au papier avec espaces d'air, qui sont particulièrement sensibles à la pression extérieure, du fait de leurs vides, ainsi que pour les câbles à haute tension à un seul conducteur, qui ne peuvent pas être munis d'une armure en fer. L'adjonction de ce pourcentage d'étain offre en outre le grand avantage de réduire dans une très large mesure la corrosion intercristalline du plomb.

La gaine de plomb n'est pas très résistante au point de vue mécanique et elle est malheureusement soumise en outre à des corrosions d'ordre

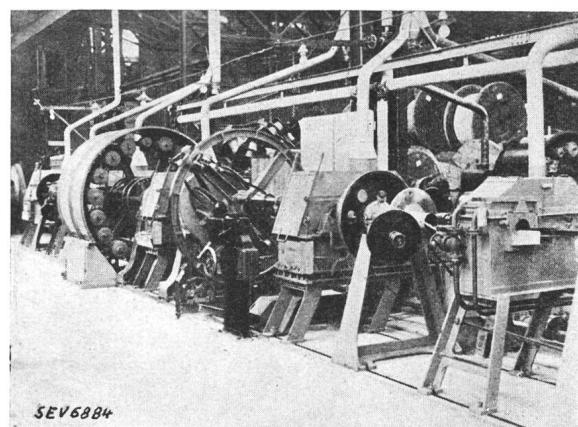


Fig. 8.
Machine pour l'application du guipage de jute et de l'armure.

chimique et électrique, aussi doit-on prévoir une protection extérieure. La protection de la gaine de plomb contre les trois principaux agents — improprement appelés corrosions — constitue un chapitre important. On distingue:

- 1^o la fragilité intercristalline;
- 2^o la décomposition chimique, ou autocorrosion;
- 3^o l'électrolyse due à des courants étrangers.

Le premier cas peut se présenter lorsque le plomb est soumis pendant longtemps à des vibrations. Ces corrosions intercristallines se produisent dans les câbles placés à proximité de ponts, de passages sous-voie ou suspendus à des câbles aériens, etc. Le plomb corrodé se décompose en petites particules et le métal offre l'aspect d'une décrystallisation. Comme on l'a dit, une adjonction de 1 à 3 % d'étain ou d'une plus faible quantité d'antimoine rend les gaines de plomb beaucoup plus résistantes à ce phénomène.

La corrosion purement chimique est due à l'action de l'ammoniaque, de l'oxygène, de l'oxyde de carbone, de la chaux et des chlorures, qui se rencontrent fréquemment dans le sol. Le produit de cette corrosion est toujours du carbonate de plomb basique ou de l'oxyde de plomb. Un bitume soigneux de la gaine de plomb à l'aide de

papier asphalté et de fils de jute constitue une protection efficace dans les sols normaux.

La *corrosion électrolytique* se produit lorsque des courants continus vagabonds pénètrent dans la gaine de plomb à un endroit quelconque du sol et utilisent l'enveloppe métallique comme conducteur. A certains endroits, ces courants quittent la gaine de plomb. Il en résulte une électrolyse qui attaque chimiquement la surface de la gaine. Cette action se produit normalement au point de sortie, selon le genre du courant actif et selon la disposition générale. Il se forme du chlorure de plomb, du sulfate de plomb, du peroxyde de plomb (oxyde puce), etc. La présence de l'oxyde puce est caractéristique pour ce genre de corrosion. L'intensité considérée par les spécialistes de la corrosion comme n'étant plus dangereuse est de 0,2 à 0,8 mA/dm², selon les prescriptions de divers pays²⁾. La protection idéale contre la corrosion électrolytique serait certainement un isolement absolu de la gaine de plomb contre la terre. Cela n'étant toutefois pas réalisable sans de très grandes difficultés, on a entrepris récemment de grands travaux sur les mesures à prendre en vue d'éviter cette corrosion. Outre les études entreprises pour les réseaux de câbles, les études pour les canalisations de gaz et d'eau ont largement contribué à élucider cette question. Tous les systèmes de protection proposés au cours de ces dernières années, par exemple le filtre électronique³⁾, la protection à la gutta-percha, les compounds isolants et autres traitements, offrent de l'intérêt. Les essais pratiques que l'on entreprend actuellement permettront prochainement de décider de la valeur de ces divers procédés.

Le diélectrique.

Lors de la transmission de l'énergie, il se produit une transformation continue d'énergie de champ électrique en énergie de champ magnétique, et vice-versa. Un diélectrique qui n'est pas sans pertes s'échauffe par suite de processus moléculaires et également par effet Joule. Lorsque cet échauffement augmente de plus en plus, il peut s'ensuivre une avarie.

Si l'on considère dans un câble à un seul conducteur la *répartition du champ*, on constate que l'intensité de champ n'est pas homogène, comme dans le cas d'un condensateur à plaques. Elle diminue en effet progressivement du conducteur à la gaine de plomb, c'est-à-dire que le gradient de potentiel diminue quand le rayon augmente. La contrainte électrique est donc la plus grande près du conducteur et la plus faible près de la gaine de plomb. Cette répartition peut être calculée avec précision pour les câbles à un conducteur, tandis que les calculs sont beaucoup plus compliqués pour les câbles à plusieurs conducteurs. Ce calcul

des gradients de potentiel permet généralement de constater la rigidité électrique d'un câble, en admettant que le diélectrique conserve sa répartition de champ jusqu'à la perforation. La rigidité diélectrique, resp. la sécurité de service, peut alors être déduite de l'intensité de champ en service et de

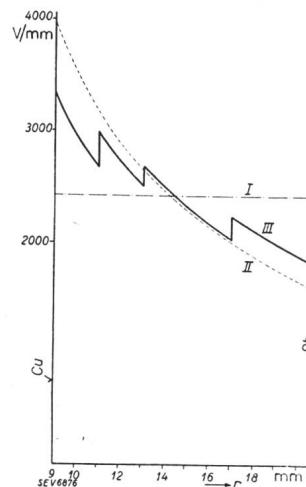


Fig. 9.

Courbes théoriques de la sollicitation du diélectrique, câble de $1 \times 180 \text{ mm}^2$, isolement de 12 mm.
 $U = 50\sqrt{3} \text{ kV}$. Cu conducteur de cuivre, P gaine de plomb. I sollicitation idéale. II sollicitation d'un isolant homogène. III sollicitation d'un isolant à 4 couches.

l'intensité de champ à la perforation, déterminée expérimentalement.

Ces calculs se font surtout pour les câbles à haute tension de service, car l'isolement des câbles à basse tension doit être largement dimensionné pour des raisons d'ordre mécanique. On sait par expérience que les câbles à haute tension de fabrication normale et soignée présentent un coefficient de sécurité suffisant, lorsqu'un gradient de potentiel de 4 kV/mm n'est pas dépassé, en tenant compte des exigences thermiques des câbles à matière.

L'examen théorique des gradients de champ montre qu'il est possible d'améliorer la répartition inégale du champ en modifiant les constantes di-

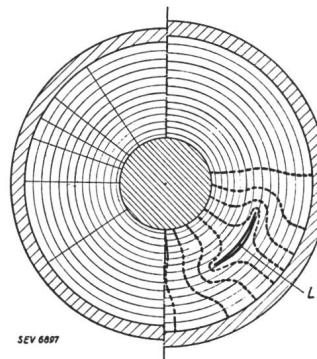


Fig. 10.

Principe de la formation des vacuoles dans l'isolant.

A gauche: section de câble avant la charge.
A droite: section de câble après la charge.
L vacuole.

électriques des diverses couches isolantes, à l'aide de papiers présentant des constantes diélectriques différentes. Toutes ces considérations théoriques sont naturellement basées sur un diélectrique homogène, c'est-à-dire une couche isolante dont la composition est partout identique. Qu'en est-il en réalité dans un câble? Si l'on considère la façon dont l'isolement d'un câble est établi, on conçoit qu'il faut surtout que le papier et l'imprégnant soient intimement liés l'un à l'autre. Il est toutefois fort dif-

²⁾ Cf. Travaux de la commission de corrosion, à laquelle collaborent non seulement l'ASE et les PTT, mais également des spécialistes des canalisations de gaz et d'eau, ainsi que les chemins de fer.

³⁾ Bull. ASE 1937, No. 3, p. 54.

ficle d'obtenir une liaison de ces deux matières, de telle sorte que les gaz occlus et leur humidité soient absolument éliminés. Or, s'il existe en un point quelconque du diélectrique un espace vide ou une bulle gazeuse, une telle bulle peut même dans certains cas se trouver à la périphérie de l'isolation, c'est-à-dire près de la gaine de plomb, et présenter alors une intensité de champ dépassant celle qui avoisine le conducteur! Ces espaces creux sont responsables dans une large mesure des phénomènes d'ionisation qui se produisent parfois dans les câbles à haute tension. Leur élimination aussi complète que possible est l'un des progrès réalisés dans la fabrication de ces câbles. Ces espaces creux peuvent se former non seulement au cours de la fabrication, mais également durant le service.

Il reste toujours quelques traces d'air entre les couches de papier et dans le papier lui-même, car on ne peut pas réaliser pratiquement un vide absolu dans les cuves d'imprégnation. De même, malgré toutes les mesures de précaution, la masse d'imprégnation renferme toujours de l'*air occlus*. Dans les câbles à ceinture isolante en particulier, où les papiers isolants ne peuvent pas plaquer de façon parfaite, le danger d'une ionisation est toujours plus grand que dans les câbles dont le diélectrique est parfaitement cylindrique.

En service, les espaces vides sont dûs principalement à l'action thermique du courant transporté, qui provoque un élargissement de la gaine de plomb, qui ne peut plus revenir à sa position primitive du fait de son manque d'élasticité. La section du diélectrique du câble augmentant de ce fait, sans qu'une plus grande masse de remplissage soit disponible, il en résulte inévitablement des espaces vides, qui conduisent à une altération du câble. La connaissance de ces phénomènes électriques et mécaniques dans les câbles à haute tension a permis aux constructeurs d'améliorer les méthodes de fabrication et les matières utilisées, et a conduit aux types modernes de câbles à huile, à pression et à gaz.

Le papier.

Le papier est encore actuellement la principale matière utilisée pour le diélectrique des câbles. Le papier manille (papier de chiffons) utilisé ces dernières années est de plus en plus remplacé par du papier de cellulose dans la technique des isolants. Ce papier doit naturellement être soigneusement traité de la machine à papier au câble terminé. Les papiers pour câbles sont des papiers de cellulose à la soude, dont la finesse est nettement délimitée. Ils doivent présenter une certaine résistance mécanique exigée par l'isolement des conducteurs à la machine, ainsi qu'une certaine capacité d'absorption de matière d'imprégnation et une certaine stabilité à l'état terminé. Il va de soi que ces papiers ne doivent renfermer aucune inclusion de matières métalliques, ni de sels métalliques anorganiques. L'homogénéité d'un diélectrique est le facteur essentiel des conditions de fonctionnement favorables dans le champ électrique. Le papier pour câbles est

donc fabriqué à partir de la cellulose, c'est-à-dire de la fibre de bois ayant subi une cuisson préalable, et non pas à partir de pâte de bois, comme c'est le cas pour la fabrication du papier ordinaire, où la pâte préparée mécaniquement sert de matière première.

Ces papiers sont soumis à des températures assez élevées au cours du séchage et de l'imprégnation,

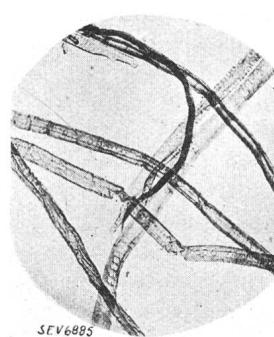


Fig. 11.
Cellulose de conifère.

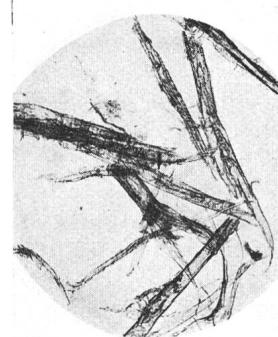


Fig. 12.
Pâte de bois blanche, de conifère.

aussi doivent-ils également répondre à certaines prescriptions relatives à leur résistance à la chaleur. Une de leurs caractéristiques la plus importante est leur perméabilité. Si l'on examine le papier au microscope, on constate qu'il se compose d'un assemblage de fibres, disposées sans ordre et formant ainsi une quantité de petits canaux. Plus un papier est fortement calandré, plus ces canaux sont petits et plus sa constante diélectrique est grande. Ces canaux permettent à l'imprégnant de pénétrer dans le papier. Comme on le voit, cette propriété du papier pour câbles est extrêmement importante. On contrôle régulièrement cette perméabilité à l'aide du porosimètre d'Emanueli.

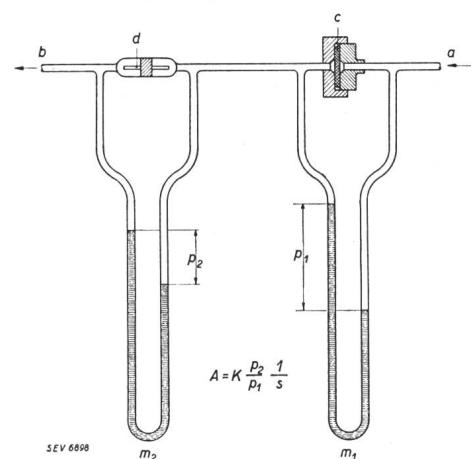


Fig. 13.
Porosimètre d'Emanueli.

Après avoir subi ces différents essais, les papiers sont admis pour la fabrication des câbles. Au cours de cette fabrication, le papier est enroulé autour des conducteurs et subit ensuite d'autres traitements. On doit tout d'abord éliminer toute trace d'humidité, afin que le papier soit prêt à absorber

l'huile isolante et puisse servir d'isolateur. Les traces d'humidité jouent toujours un rôle dangereux dans les câbles soumis à de fortes contraintes. Dans des conditions normales, le papier renferme environ 8 à 10 % d'eau pour une humidité ambiante normale d'environ 50 %. Une feuille de papier absolument sèche atteindra à nouveau ce degré de saturation au bout de 2 heures environ. Il s'ensuit que l'imprégnation du câble doit se faire à l'abri de l'air atmosphérique, qui est normalement humide.

Les masses d'imprégnation.

La matière utilisée normalement pour l'imprégnation des câbles à masse est l'huile minérale, à laquelle on ajoute dans la règle un certain pourcentage de résine.

L'une des données les plus importantes d'une huile isolante pour câbles est sa viscosité, dont dépend dans une très large mesure le procédé d'imprégnation. Une autre caractéristique essentielle de ces huiles est leur coefficient de dilatation thermique qui est surtout important pour la stabilité de service du câble. L'adjonction de résine ne doit pas modifier sensiblement ce coefficient de dilatation.

Le coefficient d'absorption de gaz a également une extrême importance, surtout pour les câbles modernes à huile fluide. Lorsqu'un gaz entre en

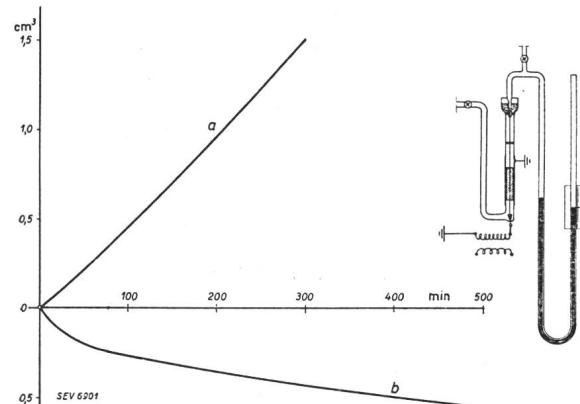


Fig. 14.

Mesure de l'absorption de gaz de deux sortes d'huile différentes, a et b.

contact avec l'huile, une partie de celui-ci peut, le cas échéant, se dissoudre dans l'huile. Comme on l'a dit, toute inclusion de gaz exerce un effet défavorable sur le fonctionnement du diélectrique et il est toujours avantageux d'utiliser une huile qui possède un faible pouvoir absorbant relativement aux gaz, qui peut facilement éliminer du gaz occlus ou qui peut absorber entièrement certains gaz, comme cela se présente parfois dans les câbles à huile.

Il va de soi que les propriétés électriques d'une huile isolante ont une grande importance. La résistance diélectrique de ces huiles, c'est-à-dire leur pouvoir isolant, est très élevée aux basses températures, mais elle diminue rapidement à mesure que la température s'élève.

Un autre phénomène important est l'action des métaux sur la matière isolante. Des essais très approfondis de la Detroit Edison Cy. ont conduit récemment à de fort intéressantes conclusions, qui permettent maintenant de considérer le problème de l'imprégnation des câbles sous d'autres points de vue.

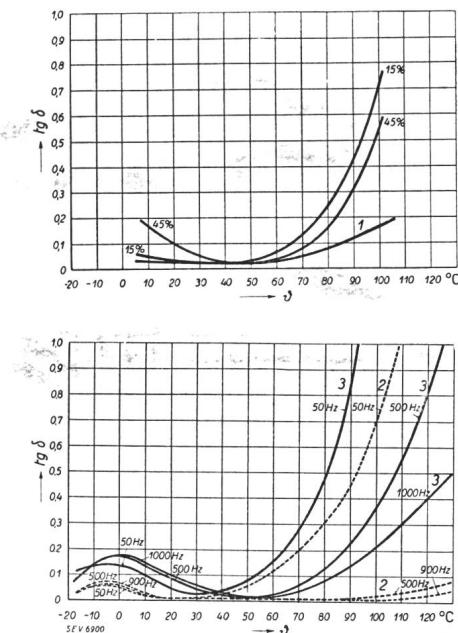


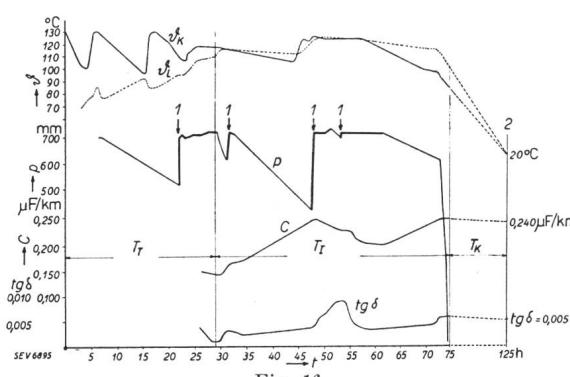
Fig. 15.

En haut: influence d'une adjonction de résine sur les pertes diélectriques d'une huile pour câbles.

En bas: influence de la température et de la fréquence sur les pertes diélectriques d'un huile pour câbles.

1 huile de câble à huile, 2 huile d'imprégnation,
3 matière d'imprégnation.

Il est impossible de mentionner ici toutes les discussions et suppositions théoriques et pratiques, qui concernent la valeur et l'opportunité d'une mesure de pertes diélectriques des huiles isolantes. On se bornera à montrer à l'aide d'un diagramme quel est l'effet de la température et de la fréquence sur les pertes diélectriques d'une huile. Un second diagramme montre quel est l'effet d'une adjonction



Processus d'imprégnation d'un câble à haute tension. ϑ_K température du câble, ϑ_L température du conducteur, p vide dans la cuve, C capacité du câble, $tg \delta$ angle de perte, T_I période de séchage, T_R période d'imprégnation, T_K période de refroidissement.

A 1, la pompe est en action.
A 2, c'est-à-dire après 125 h, l'imprégnation est terminée et le câble passe dans la presse à plomb. Température de pressage 20° C, capacité finale 0,24 $\mu\text{F}/\text{km}$ et $tg \delta = 0,005$.

de résine pour les mêmes conditions de fréquence et de température.

Papier imprégné.

La qualité d'un câble dépend du papier imprégné. Au cours du séchage et de l'imprégnation on vérifie les propriétés du diélectrique et les propriétés électriques du câble avant son passage dans la presse. Les pertes diélectriques et l'isolement

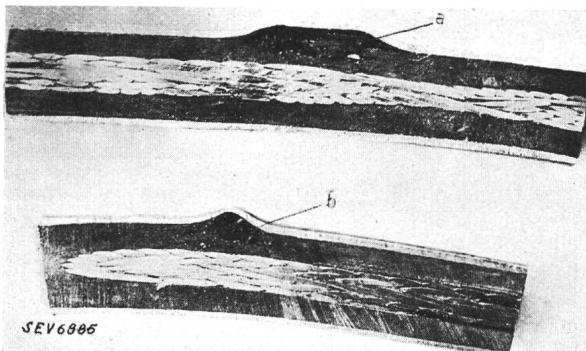


Fig. 17.
Perforations.

donnent une idée assez correcte de l'état de séchage et du facteur de remplissage du câble.

Un autre essai est celui de la perforation, que l'on entreprend surtout lorsque le câble est terminé, soit par un essai de longue durée qui conduit à une perforation thermique, soit par un essai de brève durée qui conduit à une perforation par ionisation. Depuis quelque temps, ces essais sont également effectués à l'aide d'installations de choc avec onde de choc exactement définie.

Types de câbles.

Ce qui précède est valable pour tous les types de câbles à courant fort et ne diffère que dans les applications pratiques. Il en va de même pour les

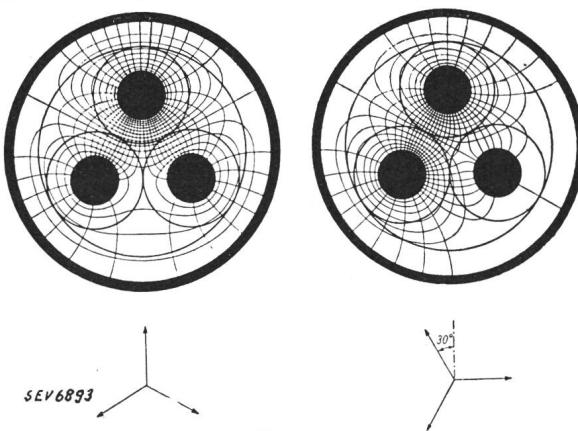


Fig. 19.
Lignes de champ dans un câble à ceinture isolante.

différentes constructions de câbles. Au point de vue mécanique, on distingue les câbles à un seul conducteur et les câbles à plusieurs conducteurs; parmi ces derniers, les câbles à conducteurs ronds et ceux à conducteurs sectoriaux. En ce qui concerne la structure électrostatique, on considère les câbles à ceinture isolante complète ou réduite, et

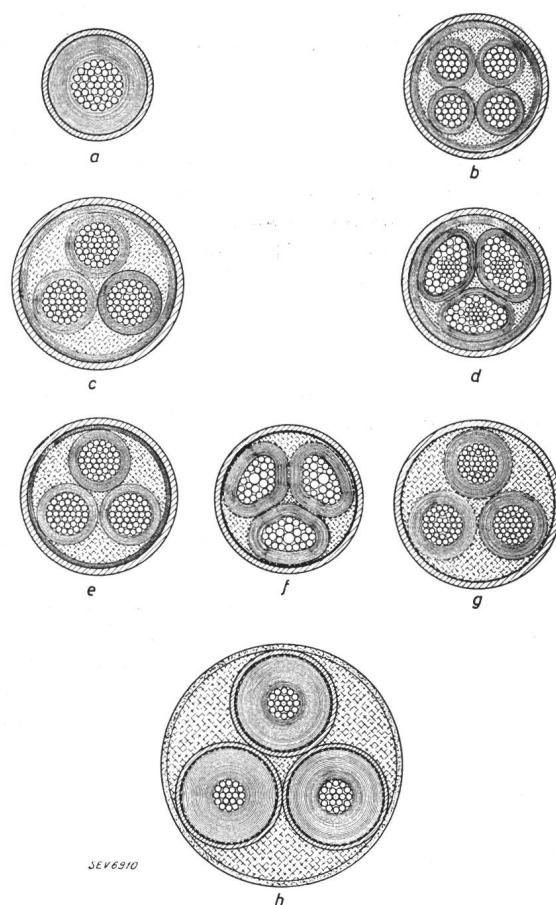


Fig. 18.
Types de câbles, échelle 3 : 1.

- a 1 × 240 mm², 16 kV.
- b 4 × 100 mm², 11 kV, câble à ceinture isolante.
- c 3 × 185 mm², 12 kV, câble à ceinture isolante.
- d 3 × 185 mm², 12 kV, câble à conducteurs sectoriaux et à ceinture isolante.
- e 3 × 150 mm², 15 kV, câble à ceinture isolante réduite.
- f 3 × 150 mm², 12 kV, câble à conducteurs sectoriaux, à protection Höchstädtter.
- g 3 × 150 mm², 15 kV, câble à conducteurs ronds, à protection Höchstädtter.
- h 3 × (1 × 95 mm²), 50 kV, câble triplomb.

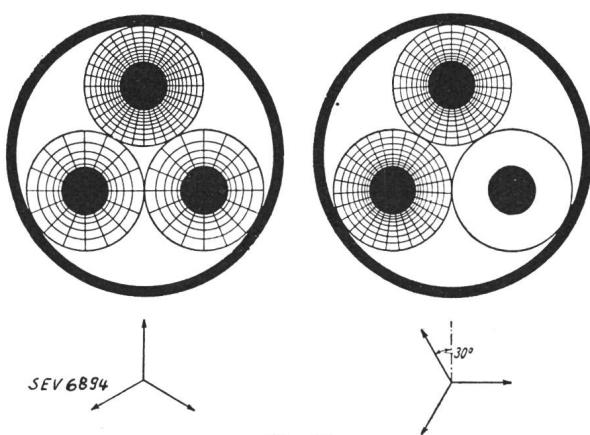


Fig. 20.
Lignes de champ dans un câble Höchstädtter à 3 conducteurs.

les câbles à surfaces équipotentielles, câbles métallisés ou câbles triplombs.

Le câble en service.

On a surtout considéré jusqu'ici les problèmes d'ordre purement électrique, et particulièrement les supports du champ électrique. Les effets de

l'énergie électrique transportée ont également une grande importance et sont liés aux phénomènes électriques par des phénomènes thermiques.

Pour des raisons économiques et afin de tenir compte de l'échauffement et ainsi du service du câble, les pertes de transmission ne doivent pas dépasser une certaine valeur. On peut réaliser une exploitation rationnelle et économique en choisissant d'une façon appropriée la section du conducteur et les conditions de pose.

L'échauffement d'un câble est dû aux trois causes suivantes:

- 1° Les pertes par effet Joule dans le conducteur parcouru par le courant de charge;
- 2° les pertes d'énergie dans la gaine de plomb;
- 3° les pertes diélectriques dans l'isolation.

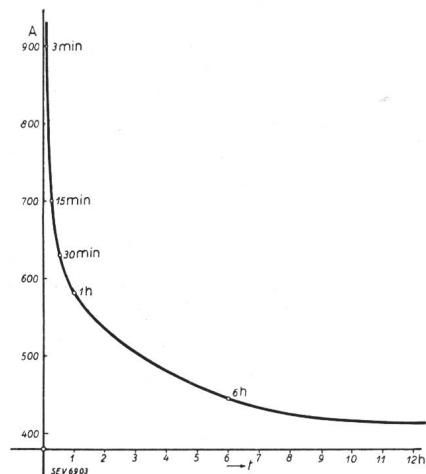


Fig. 21.
Possibilités de charge d'un câble à 50 kV, 1 × 240 mm².

La cause la plus importante de l'échauffement est naturellement due aux pertes dans les conducteurs. La chaleur ainsi produite doit s'écouler par le diélectrique et, selon la résistance thermique spécifique de l'isolation (environ $600 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{ °C}}$), on obtient le diagramme de la conduction thermique. Entre le cuivre et le plomb, il existe toujours une chute de température qui atteint 10 à 20°C, selon l'épaisseur de l'isolation, en cas de pose normale (directement dans le sol ou dans des caniveaux avec remplissage), et sous charge nominale permanente. Actuellement, il est possible de déterminer avec assez de précision les échauffements additionnels d'une installation de câbles en fonction de l'énergie à transmettre, ceci grâce aux nombreuses expériences et à l'étude mathématique des problèmes relatifs à la charge et contrôlés expérimentalement.

Les pertes d'énergie dans la gaine de plomb sont dues aux tensions induites dans la gaine par le courant du câble. Elles n'ont toutefois une certaine importance que dans les installations de câbles à un seul conducteur. Une armure en fer augmenterait excessivement les pertes dans la gaine et rendrait ainsi impossible toute transmission économique de l'énergie. On peut toutefois réduire ces

pertes supplémentaires à une valeur acceptable en subdivisant le circuit magnétique de l'armure. La solution la plus simple est dans ce cas le montage d'un câble triplomb. La grandeur des courants dans la gaine de plomb dépend en outre de l'emplacement relatif des divers câbles⁴⁾.

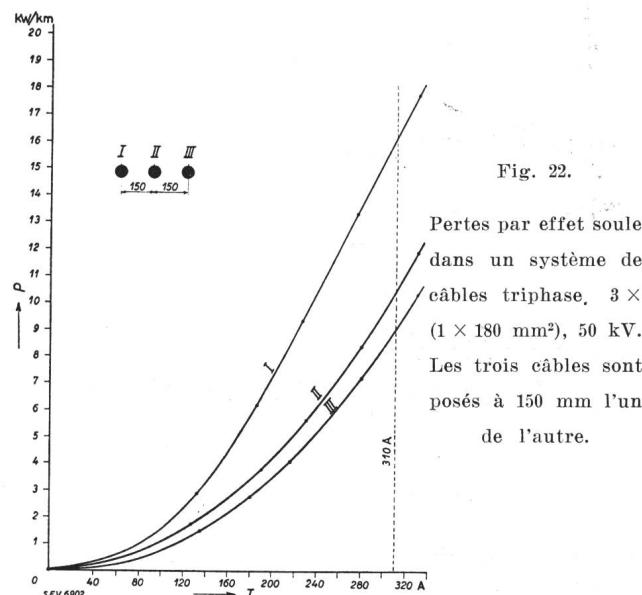


Fig. 22.

Pertes par effet soule dans un système de câbles triphasé, 3 × (1 × 180 mm²), 50 kV. Les trois câbles sont posés à 150 mm l'un de l'autre.

En service normal, la perte diélectrique ne joue aucun rôle au point de vue purement économique et thermique, aussi peut-on en général la négliger.

Dans cet ordre d'idées, il y a également lieu de mentionner les effets d'un court-circuit dans un réseau de câbles. Ces effets sont de nature thermique et mécanique.

Si l'on considère tout d'abord l'effet thermique d'un court-circuit dans un câble, on constate que

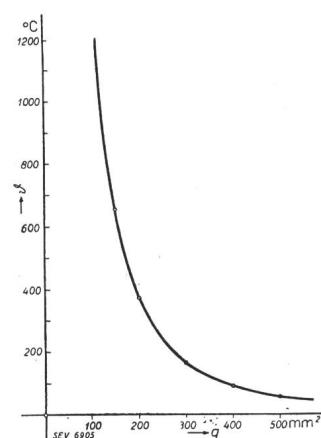


Fig. 23.

Effet calorifique d'un courant de court-circuit de 50 000 A valeur efficace pendant 1 seconde, pour différentes sections q .

l'échauffement d'un conducteur ne dépend pas seulement de la valeur du courant, mais également de la durée de son action. Un câble d'une section de 240 mm² avec isolation de 12 mm supporte normalement une charge permanente de 400 A. En calculant d'après cette charge normale les charges et les temps, on obtient un diagramme qui indique les possibilités de surcharge sans avarie du câble. Quoique la durée d'un courant de court-circuit jusqu'au déclenchement ne soit que de quelques

⁴⁾ Bull. ASE 1927, No. 11, p. 707.

secondes ou fractions de seconde, elle suffit parfois pour provoquer de graves avaries dues à un suréchauffement. Les essais ont montré que dans un câble soumis à de fortes contraintes électriques, le diélectrique se modifie très rapidement lorsque la

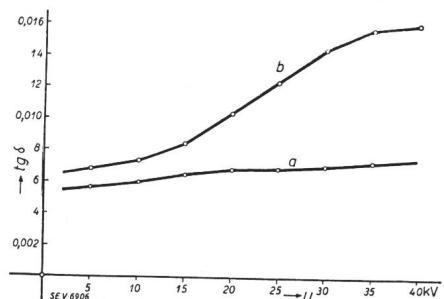


Fig. 24.
Angle de perte
15 kV.

température atteint 200° C. Le suréchauffement du conducteur provoqué par des courts-circuits ne devrait pas dépasser

200° C pendant 1 s
180° C » 3 s
150° C » 5 s.

Les forces électrodynamiques qui se manifestent lors de sévères courts-circuits ont également une grande importance pour la technique des câbles. Il se produit une transformation d'énergie électrique en travail magnétique et par conséquent en travail mécanique. Ce travail a pour résultat deux genres d'efforts, l'un entre conducteurs et l'autre dans le sens du conducteur. Le second cherche à rapprocher, tandis que le premier cherche à écartier

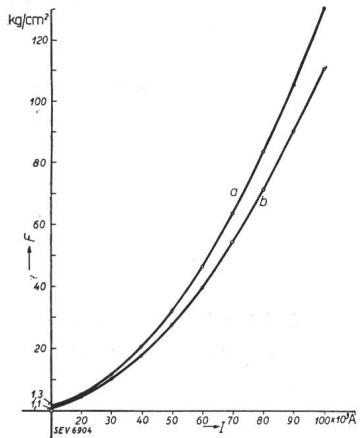


Fig. 25.
Effets électrodynamiques
sur un câble de 10 kV,
 $3 \times 95 \text{ mm}^2$.
a) Câble à ceinture isolante.
b) Câble Höchstädtner.

les conducteurs d'un système de câbles. Ces forts courts-circuits se présentant surtout dans les installations de 6 à 10 kV, où l'on utilise encore généralement des câbles à ceinture isolante, qui sont les plus sensibles à cette sollicitation mécanique, il y a lieu de prendre certaines précautions. Une armure appropriée empêchera cependant tout danger de destruction électrodynamique du câble.

Depuis quelque temps, les *installations de câbles servant de protection contre les surtensions* ont acquis beaucoup d'importance, d'autant plus qu'elles présentent une grande sécurité contre les contraintes par choc. La tâche principale d'une protection contre les surtensions est de ramener à une valeur non dangereuse la hauteur et la raideur d'une onde. L'action exercée sur une onde à front

raide par un câble formant condensateur peut être décrite comme suit: L'onde venant d'une ligne aérienne s'affaiblit fortement à son entrée dans le câble, en raison de la résistance d'onde du câble, qui est plus faible que celle de la ligne aérienne.

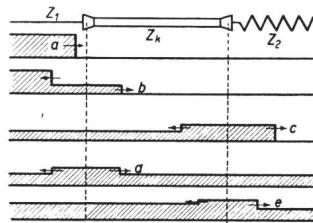


Fig. 26.

Jeu de la tension aux bornes d'un câble servant de condensateur.



La résistance d'onde d'un câble varie entre 20 et 60 Ω, tandis que celle d'une ligne aérienne est de 300 à 500 Ω; elle dépend de la constante diélectrique et des données géométriques du câble.

Le simple exemple suivant illustrera l'action d'un câble servant de liaison entre une ligne aérienne et un transformateur: A l'entrée du câble, l'onde s'affaiblit; il ne pénètre dans le câble qu'une partie de la tension de choc. La réflexion sur la ligne aérienne est également moins forte, par suite de l'affaiblissement dû au câble, que ce ne serait le cas pour une ligne aérienne à l'extrémité libre. A la sortie du câble, il se produit un accroissement de tension par suite de la résistance d'onde plus élevée.

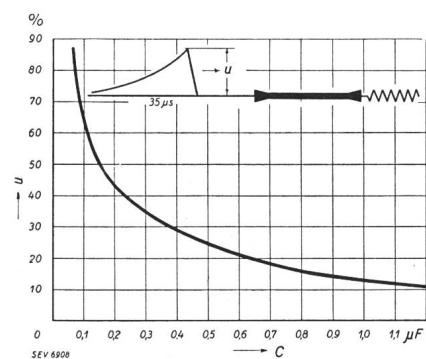


Fig. 27.

Réduction de la hauteur du front d'onde en fonction de la capacité du câble.

vée du transformateur. Une partie de l'onde est alors réfléchie dans le câble. Ce jeu se répète et les fronts d'ondes ainsi créés atteignent l'enroulement du transformateur. La hauteur des fronts allant en diminuant, la contrainte exercée sur l'enroulement offre théoriquement l'aspect d'un escalier. La largeur des échelons de cet escalier dépend directement de la longueur du câble et correspond au double de cette longueur. A l'aide des résultats d'essais et de service, on peut calculer la protection assurée par un câble et prévoir ainsi pour chaque tension de service et chaque genre de ligne, l'installation de câbles appropriée. La tension de choc que peuvent supporter les parties de l'installation sert de point de départ au calcul de la capacité de protection. La valeur de la capacité à choisir

se détermine d'après la longueur d'onde et le rapport entre la hauteur d'onde maximum admissible et la hauteur d'onde maximum qui peut pratiquement se présenter. La capacité du câble se calcule d'après la capacité de la ligne aérienne qui serait nécessaire pour absorber la tension de choc réduite.

Pour les raisons ci-dessus, on peut se demander si les câbles modernes à haute tension sont capables de supporter ces fortes sollicitations qu'exige leur emploi en qualité de protection contre les surtensions. Les essais récents ont fourni des indications précises sur la résistance diélectrique de l'isolation des câbles lors de contraintes par chocs. Les essais de perforation ont été entrepris avec des ondes normales d'une raideur d'environ 1 μs et d'une durée de demi-amplitude de 30 μs avec polarité positive et négative.

La résistance à la perforation lors de contrainte par choc varie entre environ 80 kV/mm pour un choc positif et 100 kV/mm pour un choc négatif, ceci pour les câbles à masse et ceux à huile. A la fréquence de service (de l'ordre de 50 pér./s) on a les valeurs suivantes:

	Câbles à masse kV/mm	Câbles à press. et à huile kV/mm
Contrainte permanente (pendant des heures) . .	15 à 20	35 à 40
Contrainte de brève durée . .	30 à 35	40 à 45

Ces résultats d'essais montrent que, lors de l'établissement de projets de câbles, la contrainte spécifique ne doit pas seulement être basée sur la tension normale de service, mais également sur la contrainte par choc.

Câbles à courant continu.

Les progrès réalisés ces derniers temps dans la construction de mutateurs à haute tension a rendu actuel le problème du transport d'énergie à très haute tension continue. Il y a quelques années déjà, nous avons entrepris des essais pour étudier si les câbles à haute tension se prêtent aussi à ce nouveau mode de transmission de l'énergie. En principe, la construction du câble restera la même pour les hautes tensions continues. La résistance à la perforation en continu est environ 2,5 fois plus élevée qu'en alternatif 50 Hertz de même tension efficace. Cependant, on a trouvé que la sollicitation par la tension est une fonction de la chute de température entre le conducteur et la gaine de plomb. Cette sollicitation ne peut plus être calculée selon la formule de O'German

$$\frac{dU}{dr} = \frac{U}{r \cdot \lg \frac{r^2}{r}}$$

mais selon la formule

$$\frac{dU}{dr} = \frac{U}{r \epsilon \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r \epsilon}}.$$

On voit que la constante diélectrique joue ici un rôle dans le calcul et, comme elle dépend de la

température, que la chute de température dans le diélectrique a son importance. La fig. 28 reproduit la sollicitation spécifique d'un câble de 50 kV en fonction de la température du conducteur.

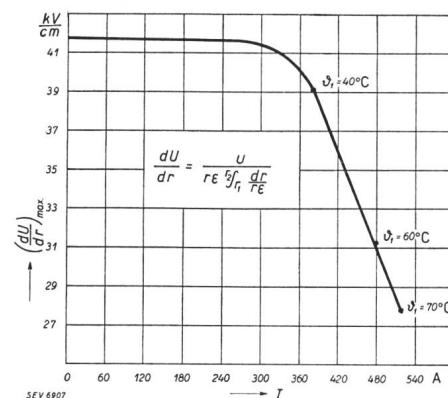


Fig. 28.
Gradient maximum de tension dans les câbles à courant continu, sous diverses charges.

Les essais effectués jusqu'à présent montrent clairement qu'il sera possible de transmettre des tensions continues jusqu'à 600 kV avec deux câbles, sans difficultés spéciales. Les pertes par conductance des isolateurs en porcelaine étant très fortes en continu, il semble que le câble est appelé à devenir le système de transport d'énergie continue à haute tension le plus économique et offrant la plus grande sécurité.

Pose des câbles.

Comme on vient de le voir, la fabrication des câbles exige de grands soins et un travail impeccable. La pose des câbles l'exige également, ce qui n'est malheureusement pas toujours le cas! Le fait qu'une installation de câbles soigneusement posée et montée n'est presque jamais le siège de perturbations devrait pourtant inciter à prendre toutes précautions utiles lors des travaux. La pose de gran-

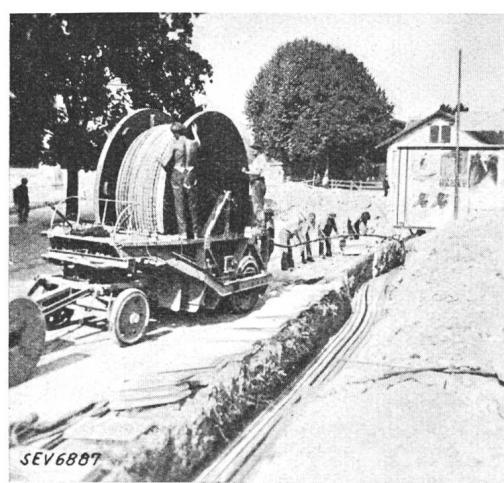


Fig. 29.
Déroulage d'un câble dans la tranchée.

des longueurs de câbles exige des travaux préparatoires, un personnel et un matériel en suffisance. Les wagons spéciaux et les tambours de pose permettent actuellement de travailler avec un nombre d'ouvriers plus restreint et de mettre en place des poids considérables sans risques d'avaries. Cepen-

dant, la pose idéale directement du wagon à câbles n'est pas toujours réalisable. Suivant les conditions du terrain et le type de câble, on peut prendre déjà diverses mesures lors de la commande, qui garantiront une pose sans danger. On commet trop souvent l'erreur de poser les câbles pour toutes tensions de service à des températures trop basses. Il ne faut pas oublier, en effet, que les diverses couches de papier doivent conserver une certaine souplesse. Avec un câble gelé, l'isolation peut se casser et les résultats sont une suppression de l'homogénéité de l'isolation et une réduction de la sécurité de service.

Un autre point important que l'on oublie souvent est le maintien d'un certain rayon de courbure. Pour un câble de 50 kV, le rayon minimum est de 100 cm, soit environ 20 fois le diamètre sur le plomb. Selon la tension de service, c'est-à-dire selon l'épaisseur de l'isolation, le rayon de courbure ne doit pas être inférieur à 15 fois le dia-

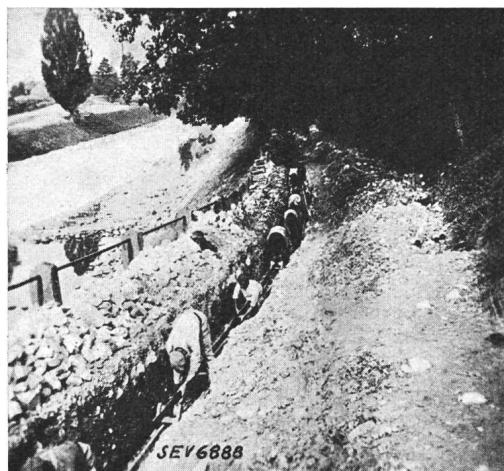


Fig. 30.
Transport de câble sur roulettes dans la tranchée.

mètre du câble sur le plomb. Cette proportion s'entend pour les câbles à basse tension; elle augmente jusqu'à 20 fois pour les tensions plus élevées.

Quand il s'agit de câbles à armure spéciale, la pose purement motorisée donne également d'excellents résultats pour les câbles télégraphiques et les câbles à courant fort.

Un genre de pose de plus en plus fréquent en Suisse, où les lacs et les fleuves sont nombreux, est la pose immergée. Une brève description de la pose d'un câble sous-lacustre effectuée les 16 et 17 août 1937 dans le lac de Zurich, entre l'usine de l'Etzel et Rapperswil, illustrera ce genre de pose très intéressant.

Le câble téléphonique à armure spéciale monté sur un tambour en fer fut expédié à Tiefenbrunnen sur un wagon spécial des CFF. Un autre tambour, entraîné par une machine à poser les câbles fut monté sur un chaland.

Le câble fut alors dévidé depuis le wagon et renvidé sur le tambour du chaland, puis conduit à Rapperswil. Les rampes d'abordage ayant été soigneusement prévues à l'avance, la pose a pu commencer dès le lendemain matin. Elle fut

terminée en 5 heures, après qu'un scaphandrier eut encore vérifié la position du câble au bassin de dragage côté Rapperswil. La pose proprement-dite en pleine eau s'est effectuée à la vitesse d'environ 1,5 m/s, soit en 30 minutes, pour



Fig. 31.
Pose d'un câble dans le lac de Zurich.

la distance de 2500 m. Le poids du câble était de 25 tonnes. Cette disposition permet de poser des câbles d'un poids de 50 tonnes en un seul tronçon.

Armatures.

Aucune construction n'est plus résistante que sa partie la plus faible. On ne tient pas toujours assez compte de cet axiome lors du montage des câbles. Les statistiques des défauts relèvent les trop nombreuses exécutions défectueuses de montages dans les boîtes de jonction et d'extrémité.

Toutes les armatures, que ce soient des boîtes d'extrémité ou des boîtes de jonction, peuvent être classées en deux catégories: D'une part les armatures à masse de remplissage, qui sont les plus courantes, et d'autre part les armatures à diélectrique reconstitué.

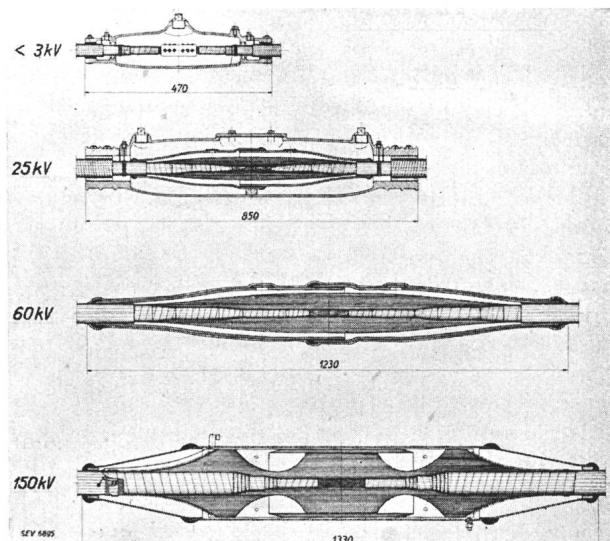


Fig. 32.
Manchon de raccord, type M.

Les parties essentielles d'une armature à masse de remplissage sont:

- a) les manchons à vis ou à soudure, qui fixent les conducteurs;
- b) le boîtier de protection, qui enferme de toutes parts la jonction;

c) l'isolant, qui remplit complètement l'espace libre entre le câble et le boîtier de protection, en vue de l'isolation de la jonction.

L'isolant est une masse de remplissage qui est liquide à l'état chaud, mais solide à l'état froid. Elle doit présenter non seulement une résistance d'isolation élevée et une bonne résistance électrique, mais satisfaire également aux exigences suivantes: Sa dilatation thermique doit être aussi faible que possible, afin que les variations périodiques de volume avec la température restent modérées. Elle ne doit être ni poreuse, ni cassante et doit adhérer au fer, au plomb et aux barres de séparation, afin qu'il ne puisse pas se produire de chemins de pénétration pour l'humidité. Enfin, la composition de la masse de remplissage doit être adaptée à chaque genre d'utilisation: Pour les boîtes d'extrémité de câbles logées dans un local de machines chaud, il faut utiliser une masse plus dure, à point de fusion plus élevé, tandis que pour une boîte de jonction souterraine normale, la masse doit être plus plastique et à point de fusion moins élevé.

Depuis quelques années, on n'utilise pour les hautes tensions de service que des boîtes à diélectrique reconstitué. Ces boîtes à enrubannage offrent

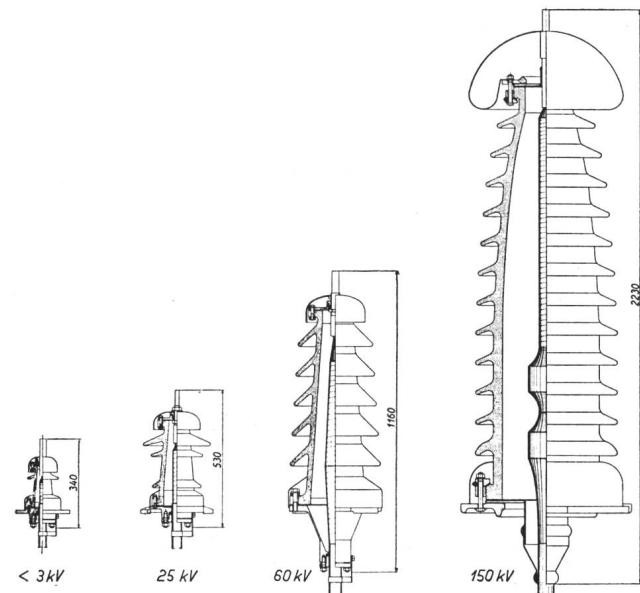


Fig. 33.

Boîte d'extrémité verticale, type VEF.

le grand avantage que les sollicitations tangentielle et en général les variations du champ électrique y sont beaucoup plus faibles. L'isolation est constituée par un enrubannage manuel de bandes de papier; l'enrubannage est ensuite protégé par une enveloppe de plomb. Dans un pareil cas, il est important que le conducteur ne provoque aucune modification du champ électrique après sa jonction. Cette dernière est assurée par le montage d'une borne dans le conducteur ou par brasage des deux extrémités des conducteurs; ce procédé s'est avéré excellent pour les installations de câbles à masse jusqu'à 66 kV. Pour les câbles à huile, on utilise avec succès le procédé à la presse de Pirelli, qui

assure un parfait passage de l'huile, ainsi qu'une jonction absolument sûre, aussi bien au point de vue mécanique qu'électrique.

Grâce à l'amabilité de nos collègues, MM. le Dr. J. Borel et E. Foretay, ing., notre tâche a été facilitée en ce sens que M. Borel s'est chargé de la conférence sur les câbles modernes à très hautes tensions, et M. Foretay de la conférence sur la technique de mesure des câbles. Ces deux conférences traiteront les points que nous avons dû laisser de côté dans cet exposé général et complèteront ainsi la revue de l'état actuel de la technique des câbles. Avant de terminer, nous aimerions toutefois mentionner un nouveau type de câble qui sera prochainement utilisé en diverses exécutions. Il s'agit du

Câble à haute fréquence,

et plus spécialement d'un câble qui a été construit par les Câbleries de Brougg pour la nouvelle installation d'antenne du poste de radiodiffusion de Beromünster.

Il faut également mentionner que, pour l'émetteur à ondes courtes de l'Ecole Polytechnique Fédérale, actuellement en montage, on utilise également un câble d'essai à haute fréquence, dont les isolateurs sont composés d'un produit suisse, la cibaniite. Les résultats obtenus jusqu'à présent fournissent des indications précieuses pour le développement des câbles à haute fréquence pour la téléphonie multiple et pour la télévision.

Le système de transmission actuellement appliquée en téléphonie comprend une gamme de fréquences allant jusqu'à 10 000 Hertz au maximum. Les câbles téléphoniques devaient pouvoir satisfaire à cette gamme de fréquences. Le développement de la transmission sur large bande et la nécessité de transmettre également par câbles l'énergie à haute fréquence, ont conduit à la construction du câble à haute fréquence. Les fréquences que ce nouveau type de câble pourra transmettre sont de l'ordre de 0,1 à 20 MHz (100 000 à 20 000 000 pér./s). La bande de fréquences jusqu'à 1 MHz sera normalement réservée à la radiophonie et la bande supérieure à 1 MHz à la télévision.

Pour la transmission de l'énergie à haute fréquence, on doit naturellement appliquer les mêmes principes que ceux qui régissent la transmission des signaux, car pour ces deux systèmes la fréquence de service détermine la construction.

Le problème posé consistait à construire une liaison par câble d'une longueur d'environ 1600 m, capable de transmettre une puissance de 100 kW sous une tension de pointe de 7000 V à la fréquence normale de 556 000 Hz, avec un rendement de 95 %/km. En outre, on désirait que la résistance d'onde dépasse 60 Ω, afin d'obtenir un accord favorable entre l'émetteur, le câble et l'antenne. Enfin, les parties de la construction ne devaient pas donner lieu, entre elles, à des phénomènes de réflexion, car dans les lignes à haute fréquence on doit éviter à tout prix l'apparition d'ondes à front

raide, afin que toute l'énergie fournie par l'émetteur soit livrée à l'antenne.

Outre l'amortissement, la principale caractéristique d'un tel câble à haute fréquence est sa résistance à la perforation. Contrairement au cas des

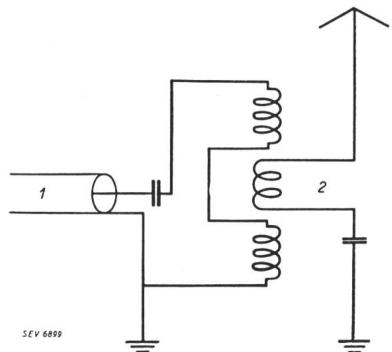


Fig. 34.
Montage d'adaptation, 1 câble d'antenne, 2 système d'antenne.

câbles à large bande, on a donc dû considérer attentivement ce facteur, lors du calcul du câble.

Le câble à haute fréquence se laisse aisément déterminer mathématiquement, car les trois valeurs

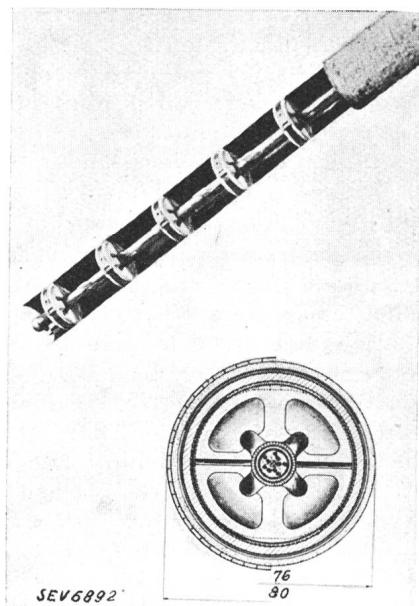


Fig. 35.

Câble d'antenne; puissance transmise 100 kW, fréquence 356 kHz, tension d'exploitation 7000 V.
En bas: section. A gauche: du câble de pylône. A droite: du câble souterrain.

inductivité, capacité et résistance d'onde ne dépendent que du rapport entre les rayons du conducteur extérieur et du conducteur intérieur.

A ces fréquences élevées, le champ magnétique est presque totalement repoussé de l'intérieur du

conducteur et le courant ne circule plus que dans une mince couche à la surface du conducteur.

L'amortissement d'un câble de ce genre consiste en un amortissement dû à la résistance et en un amortissement dû aux pertes à travers le diélectrique. Contrairement à l'amortissement par résistance, qui diminue quand la section du câble augmente, l'angle de pertes à vide (c'est-à-dire l'amortissement par pertes dans le diélectrique) reste constant. Il s'ensuit que le diélectrique d'un câble à haute fréquence doit être une matière dont l'angle de pertes reste également très faible aux fréquences élevées.

Les Câbleries de Brougg ont utilisé dans ce but un produit en céramique, dont les propriétés diélectriques satisfont aux exigences de la transmission à haute fréquence. Ce produit, appelé calite, est une matière à base de silicate de magnésium qui présente un facteur de pertes de $3,2 \cdot 10^{-4}$ sous 50 MHz ($\lambda = 6$ m) à $4,1 \cdot 10^{-4}$ sous 0,3 MHz ($\lambda = 100$ m) pour une constante diélectrique de 6,5 (le facteur du papier étant d'environ $300 \cdot 10^{-4}$). Le désavantage de la valeur élevée de cette constante diélectrique est autant que possible compensé par la disposition des disques de calite formant un corps creux et par un écartement suffisant entre les disques. La puissance de transmission à haute fréquence de 100 kW, relativement élevée, donne pour la résistance d'onde de 65Ω une tension normale de 2560 V, qui pourra atteindre une valeur de pointe de 7160 V avec une modulation de 100 %. Pour que cette tension puisse être transmise avec un coefficient de sécurité suffisant, le câble a dû être prévu comme câble à pression, car à la pression atmosphérique la résistance à la perforation de l'espace vide n'aurait pas offert une sécurité suffisante. Pour cette raison, le câble sera rempli en service d'une atmosphère gazeuse à la pression qui correspond aux conditions du service. Selon les essais les plus récents, le gaz de remplissage le plus favorable est l'oxygène, dont les excellentes propriétés sont très semblables à celles de l'air sec. Comme l'ont montré les expériences faites par M. Lange à l'Institut de Physique de l'Ecole Polytechnique d'Aix-la-Chapelle, l'azote pur n'est pas approprié, car son caractère électropositif favorise l'apparition plus rapide des effluves. Une innovation intéressante est le montage, dans le conducteur du câble, d'un câble auxiliaire de signalisation qui permettra de mesurer le courant à haute fréquence dans les boîtes de jonction, à l'aide d'un transformateur spécial. Les résultats de service de cette première installation importante seront précieux pour le développement futur de la technique des câbles à haute fréquence.