

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band:	26 (1935)
Heft:	16
Artikel:	Un nouveau type de câble électrique pour les hautes et très hautes tensions : le câble à huile imprégné après pose
Autor:	Borel, James
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1060322

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: 23.02.2026

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

strom infolge des Alterns der Glühlampen Aenderungen unterworfen sein. Bei einer genügend grossen Zahl von Glühlampen ist das Alter der einzelnen Glühlampen verschieden und Lichtstromänderungen werden nicht merklich sein.

Die stündlichen Kosten betragen:

$$S = \frac{A}{0,95 H_n} \varepsilon^9 + \frac{B P_n}{0,95 \varepsilon^{2,4}}$$

Wir berechnen wieder die günstigste relative Betriebsspannung:

$$\varepsilon \cong \sqrt[12]{\frac{B P_n H_n}{3,75 A}}$$

Wir setzen noch den Faktor k ein, die Schwankungen der Betriebsspannungen berücksichtigend, und erhalten:

$$\varepsilon = \sqrt[12]{k \frac{B P_n H_n}{3,75 A}}$$

Aus den zuletzt erhaltenen Ergebnissen sehen wir, dass es zweckmässig ist, in jeder Beleuchtungsanlage die günstigste relative Betriebsspannung, bzw. die günstigste Glühlampennennspannung zu ermitteln. Hierbei zeigt sich, dass in den meisten Fällen die Glühlampennennspannung von der Be-

triebsspannung verschieden sein sollte. Die erhaltenen Resultate bestätigt auch die Praxis, die auch bisher in einigen Fällen Glühlampen mit einer von der Betriebsspannung abweichenden Nennspannung verwendet hat. Allerdings bemerken wir, dass in den meisten Fällen die Glühlampen mit Ueberspannung brennen müssten. Die Industrie erzeugt nämlich heute Glühlampen mit einer durchschnittlichen Brenndauer von ca. 1000 Stunden, obwohl unsere Rechnung eine niedrigere Lebensdauer von etwa 500 Stunden empfiehlt. Vielleicht ist das Vorgehen der Industrie durch die Tradition bestimmt; wahrscheinlich hält sie es jedoch für zweckmässig, etwas langlebige Glühlampen auf den Markt zu bringen. Der Durchschnittskäufer würde die häufigeren Anschaffungskosten zwecks Ersatz einer durchgebrannten Glühlampe und die mit dem Austausch verbundenen Arbeiten unangenehmer empfinden, als die ständig etwas höheren Stromrechnungen, besonders da die Ersparnis wahrscheinlich verborgen bleibt. Diese psychologische Ueberlegung kann die jetzt übliche mittlere Brenndauer von 1000 Stunden rechtfertigen, da ja auch die Kurve der Gesamtkosten in der Nähe ihres Minimums, wie alle ähnlichen Wirtschaftskurven, sehr flach verläuft. In grossen Anlagen ist jedoch sicherlich eine genaue Wirtschaftlichkeitsrechnung am Platze.

Un nouveau type de câble électrique pour les hautes et très hautes tensions: le câble à huile imprégné après pose.

Par James Borel, Cortaillod.

621.315.21

Les câbles imprégnés d'huile fluide supportent des contraintes électriques qui sont environ le triple de celles admises pour les câbles imprégnés de matière. Ils peuvent donc transporter l'énergie électrique jusqu'aux tensions les plus élevées qui sont utilisées actuellement. En raison des grandes puissances qu'ils sont appelés à transporter, et de l'importance de la régularité de fonctionnement des réseaux à haute tension, le coefficient de sécurité des câbles à huile doit être élevé et rester constant. Or la sécurité d'un câble ne dépend pas uniquement de la qualité du diélectrique mais aussi des qualités mécaniques de la gaine de plomb, qualités que l'on peut apprécier moins facilement. Pour qu'à la grande sécurité que présente le diélectrique d'un câble à huile corresponde une sécurité mécanique analogue de la gaine de plomb, un nouveau type de câble a été mis au point qui permet d'effectuer de sévères contrôles des propriétés mécaniques. Ce nouveau type de câble d'autre part ainsi que les accessoires qui ont été mis au point sont d'une réalisation qui rallie à la simplicité une grande sécurité d'exécution à laquelle correspond une grande sécurité électrique.

Die mit flüssigem Oel imprägnierten Kabel halten elektrische Beanspruchungen aus, die ungefähr dreimal so hoch sind wie die, welche für Massenkabel zulässig sind. Sie sind deshalb geeignet, elektrische Energie bis zu den höchsten heute angewandten Spannungen zu übertragen. Im Hinblick auf die grossen zu übertragenden Leistungen und in Anbetracht der Bedeutung, die einem anstandlosen Betrieb eines Hochspannungsnetzes zukommt, muss der Sicherheitsgrad der Oekabel sehr hoch und unveränderlich sein. Die Betriebssicherheit eines Kabels hängt aber nicht nur von der Qualität des Dielektrikums, sondern auch von den mechanischen Eigenschaften des Bleimantels ab, dessen Güte indessen nicht so leicht beurteilt werden kann. Um den hohen Sicherheitsgrad, den das Dielektrikum eines Oekabels aufweist, in Einklang zu bringen mit einer entsprechenden mechanischen Festigkeit des Bleimantels, wurde eine neue Kabelkonstruktion entwickelt, die ermöglicht, eingehende Kontrollen der mechanischen Eigenschaften der Kabelhülle auszuführen. Dieser neue Kabeltyp sowie die nötigen Zubehörteile sind einfach aufgebaut, wodurch eine einwandfreie Ausführung der Anlage und damit eine hohe Sicherheit in elektrischer Hinsicht gewährleistet ist.

I. Comparaison des propriétés des câbles imprégnés de matière visqueuse et des câbles imprégnés d'huile fluide.¹⁾

Parmi les essais de contrôle de la qualité d'un câble, la détermination de la tension limite est celui qui, sans conteste possible, donne les résultats les plus certains.

Rappelons que l'on entend par tension limite, la tension la plus élevée que le câble peut supporter indéfiniment.

¹⁾ Dans la suite nous parlerons par abréviation de câble à matière et de câble à huile.

Pour la déterminer, des éprouvettes de câbles sont soumises à des tensions différentes et judicieusement choisies jusqu'à ce que la rupture de l'isolant s'ensuive. Si alors l'on porte dans un système d'axes coordonnées le temps en abscisses et la tension en ordonnées, la relation entre la tension et le temps nécessaire à la rupture de l'isolant, se traduit par une courbe dont l'asymptote parallèle à l'axe des temps est la tension limite (fig. 1).

Cette courbe qui a reçu le nom très expressif de courbe de vie du câble, dépend, cela va sans dire, des données constructives du câble, et par données constructives il faut en-

tendre non seulement le diamètre du conducteur et l'épaisseur d'isolant, mais aussi les caractéristiques de papier et de l'imprégnant employés, caractéristiques difficiles à analyser et à classer avec rigueur.

Considérons deux câbles monophasés à matière ayant semblables papiers imprégnés et dont les diamètres respectifs des conducteurs et les épaisseurs d'isolant soient dans leurs rapports de deux à un. Par exemple :

	Conducteur	Isolant
Câble No. 1	ϕ	
» » 2	16 mm	14 mm
	8 »	7 »

et déterminons la courbe de vie de ces deux câbles. Si l'on représente graphiquement les résultats obtenus on obtient deux courbes qui pour mêmes abscisses ont des ordonnées qui sont à peu près dans le rapport de deux à un (fig. 1).

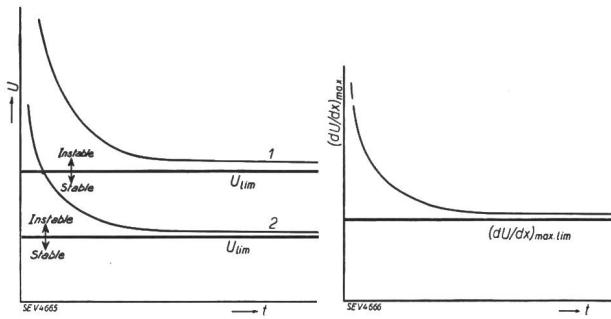


Fig. 1.
Courbes de vie de deux câbles à matière (No. 1 et 2) en fonction de la tension (U).

Fig. 2.
Courbe de vie de câbles à matière en fonction du gradient maximum. $(dU/dx)_{\max}$

Pourtant si l'on porte en ordonnées non pas la valeur absolue de la tension, mais celle du gradient de tension maximum, qui est une valeur relative dépendant non seulement de la tension, mais aussi de l'épaisseur de l'isolant et du diamètre du conducteur, les courbes de vie pour un même genre de câble, par exemple pour les câbles monophasés à matière ou encore pour les câbles monophasés à huile, se rapprochent beaucoup les unes des autres sinon se confondent. La fig. 2 se rapporte aux câbles à matière monophasés dont le gradient maximum limite est d'environ 16 kV/mm.

Rappelons qu'on entend par gradient maximum, la contrainte électrique la plus élevée que l'isolant du câble doit supporter. Ainsi qu'il est facilement compréhensible, la contrainte radiale de l'isolant du câble n'est pas uniforme. Elle décroît du conducteur vers le manteau de plomb suivant une loi hyperbolique dont la forme mathématique est la suivante :

$$G = \frac{dU}{dx} = \frac{1}{x} \cdot \frac{U}{2,3 \log \frac{R}{r}}$$

où G est le gradient, U la tension, r , R et x respectivement le rayon du conducteur, le rayon intérieur du manteau de plomb et le rayon aboutissant au point dont on calcule le gradient. Le gradient est maximum pour $x = r$ et minimum pour $x = R$. La décroissance du gradient dans l'isolant du câble est représentée graphiquement par la fig. 3.

Si sur deux câbles à huile de mêmes données constructives que les câbles à matière précédemment envisagés, sont effectués des essais de tension analogues aux précédents, les résultats obtenus permettront d'établir la fig. 4 et la courbe supérieure de la fig. 5.

De même que précédemment, pour mêmes abscisses, les ordonnées seront soit dans le rapport de deux à un, ou seront à peu près égales suivant qu'elles représenteront la tension ou le gradient maximum. Pourtant les valeurs trouvées avec les câbles à huile diffèrent notablement des précédents quant à leurs valeurs absolues et quant à la façon dont elles varient avec la tension ou le gradient maximum (fig. 4 et 5).

En effet, d'une part, le gradient maximum limite est d'environ 45 kV/mm au lieu de 16 kV/mm environ, valeur ob-

tenue pour les câbles à matière et d'autre part, il est possible d'atteindre ce gradient maximum limite en un court laps de temps avec les câbles à huile soit en 5 heures environ, tandis qu'un millier d'heures est nécessaire avec les câbles à matière. Autrement dit, un câble à huile tient indéfiniment une

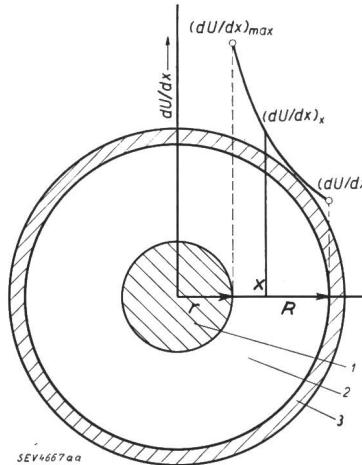


Fig. 3.

Variation du gradient (dU/dx) dans l'isolation d'un câble.

1 Conducteur.

2 Isolant.

3 Plomb.

tension qu'il a supportée pendant 5 heures, tandis qu'un câble à matière qui a supporté pendant 500 heures une tension donnée n'est pas forcément stable à cette tension.

La simple raison de ces différences très nettes entre ces deux types de câble réside dans le fait que la matière d'imprégnation joint à un coefficient de dilatation élevé une forte viscosité. Si l'huile a même coefficient de dilatation que la matière, sa fluidité est du moins suffisante pour qu'il soit possible de faire face à l'aide de réservoirs, aux variations de volume qu'entraînent les variations de température.

Ces considérations nous amènent à pénétrer plus intimement dans le mécanisme de l'imprégnation et du fonctionnement des câbles.

Les matières d'imprégnation ne devant pas s'écouler du papier qu'elles imprégnent, doivent avoir une forte viscosité à la température ordinaire. Supposons un câble se refroidissant dans son bain d'imprégnation.

À température élevée, soit aux environs de 120° la matière étant très fluide, le câble est complètement imprégné. Il le resterait en se refroidissant si papier et matière avaient même

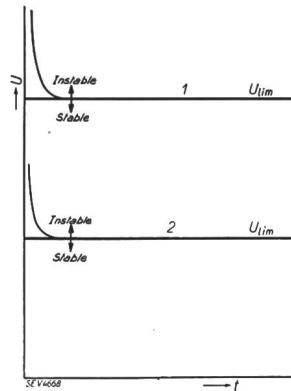


Fig. 4.
Courbes de vie de deux câbles (No. 1 et No. 2) à huile en fonction de la tension (U).

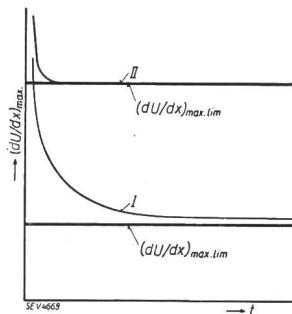


Fig. 5.
Comparaison entre les courbes de vie, établies en fonction du gradient maximum de câbles à matière (I) et de câbles à huile (II). $(dU/dx)_{\max}$

coefficient de dilatation, ce qui permettrait d'obtenir facilement le câble optimum. Mais la matière se contracte notablement plus que le papier, aussi pendant le refroidissement y a-t-il appel de matière par le câble. La possibilité de répondre à cet appel dépend évidemment de la viscosité de la matière qui doit pouvoir s'infiltrer avec une vitesse suffisante à travers les pores du papier. Aussi peu à peu, la con-

traction de la matière dont la viscosité augmente lorsque la température diminue ne sera plus contrebalancée par un apport équivalent venant par infiltration. Un câble imprégné d'une matière qui ne s'écoule pas du papier à la température ordinaire, contient donc inévitablement des vacuoles. Ces vacuoles contenant des gaz raréfiés sont de parfaits isolants en dessous de la tension nécessaire pour provoquer leur ionisation.

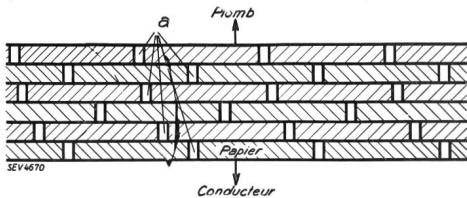


Fig. 6.

Les vacuoles se localisent spécialement dans les déjoints *a* du papier.

sation. L'expérience a montré qu'à cette tension correspond un gradient maximum d'environ 16 kV/mm. Au-dessous de cette tension le câble est stable, tandis qu'au dessus l'isolant se carbonise.

Comme les câbles à matière sont dimensionnés de telle manière que leur tension de service correspond à un gradient relativement faible, d'environ 4 kV/mm, on conçoit que malgré leur éventuel vieillissement ils fonctionnent avec une grande sécurité.

On pourrait améliorer l'état initial d'un câble à matière en obligeant, à l'aide de fortes pressions, la matière à mieux pénétrer dans le filage du câble pendant le refroidissement.

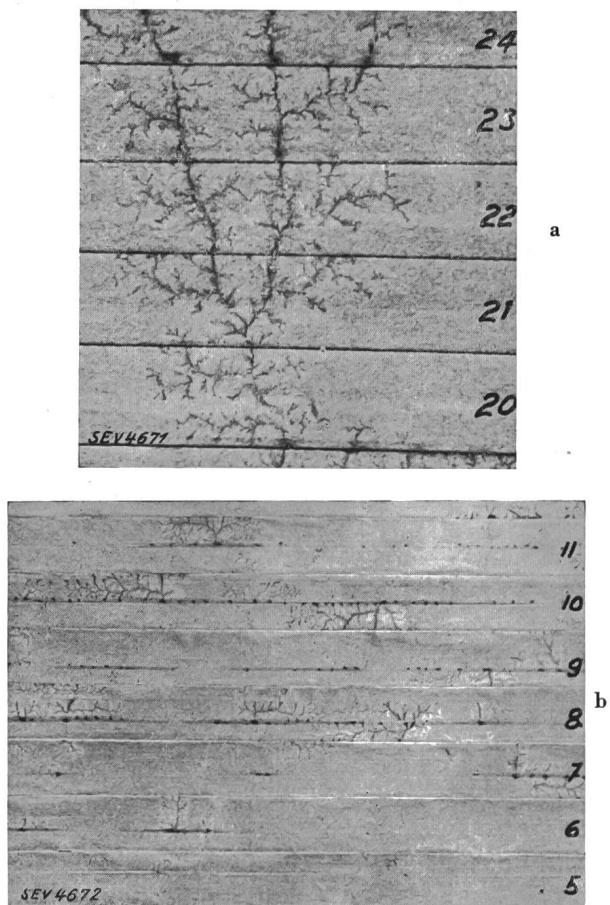


Fig. 7 a et b.

Papier prélevé sur un câble et numéroté à partir des conducteurs. Les figures montrent la face intérieure des papiers qui présente des brûlures. La face extérieure n'en présente pas. La figure 7a montre comment l'étincelle passe d'un papier à l'autre par des déjoints. La figure 7b montre que l'étincelle prend naissance dans les déjoints du papier.

Pourtant cette amélioration ne serait que passagère car l'inévitable échauffement du câble en service expulserait de la matière qui dilaterait la gaine de plomb. Pendant le refroidissement la matière expulsée ne reprendrait plus sa place, car par suite de son manque d'élasticité le plomb resterait agrandi.

Les vacuoles ne sont pas réparties uniformément dans l'isolant du câble. En effet, les forces capillaires des fibres du papier attirent la matière, aussi les vacuoles se localisent-elles spécialement dans les espaces *a* laissés par les déjoints du papier (voir fig. 6).

Il est facile de constater cette localisation en examinant les empreintes laissées sous forme de brûlures, par les étincelles qui ont peu à peu détérioré les papiers d'un câble ayant subi l'essai de tension jusqu'à rupture de l'isolant.

Cet examen permet de faire les 3 constatations suivantes:

1° Les étincelles qui se sont frayées un passage souvent très ramifié, prennent toujours naissance dans les espaces *a*.

2° Les papiers opposent aux étincelles une barrière presque infranchissable.

3° Les brûlures dues aux étincelles n'affectent que la face intérieure des rubans de papier.

Ces trois constatations permettent de se rendre compte quel est, en ses débuts du moins, le mécanisme de la rupture de l'isolant d'un câble.

Dès que le potentiel disruptif des gaz raréfiés contenus dans les espaces *a* est dépassé, l'étincelle qui se forme décompose la matière et partiellement la cellulose. Ces décompositions se font avec formation de produits gazeux. Or, ainsi qu'il est connu, lorsque des corps de constantes diélectriques différentes sont placés dans un champ électrique non uniforme, le corps de plus faible constante sera expulsé dans la partie du champ la moins dense. Donc dans un câble, où la densité du champ diminue notablement du conducteur vers la gaine de plomb, les produits gazeux seront soumis à des forces centrifuges et chercheront à gagner le plomb par le chemin de moindre résistance. L'expérience montre que ce chemin est celui qui leur permet d'aller d'une couche de papier à l'autre en les contournant par les déjoints. L'expérience montre d'autre part que la force centrifuge agissant sur les gaz est très forte. Les gaz sont plaqués contre la sur-

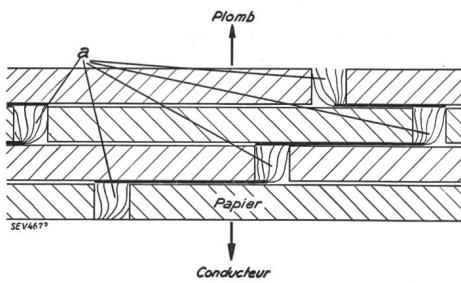


Fig. 8.

L'étincelle prend naissance dans les vacuoles localisées dans les déjoints (*a*) du papier. Elle suit, dans son cheminement, les gaz qui, par suite de leur faible constante diélectrique sont plaqués contre la surface intérieure des papiers.

face intérieure des rubans de papier où l'étincelle les suit. Ainsi de deux papiers superposés, la face intérieure de celui qui est le plus éloigné du conducteur présente des brûlures tandis que la face extérieure du papier sous jacent est indemne (fig. 7 a, 7 b et 8). Or la distance séparant ces deux faces est très petite, de l'ordre de grandeur de quelques microns.

Si le principe du phénomène de la disruption de l'isolant est celui que nous décrivons, il se complique d'inévitables accidents dûs à l'hétérogénéité de l'isolant du câble. Seule la rupture électrique des gaz obéit à des lois simples en leurs effets ce qui permet de mesurer les tensions à l'aide d'un spintermètre.

Ajoutons encore, que par suite des étincelles se produisant dans les vacuoles, étincelles analogues à celles que l'on peut faire éclater dans un tube de Geissler, la température d'un câble à matière s'élève pendant un essai de tension. Par

places même et notamment à l'endroit du claquage, la température du plomb peut dépasser 100°.

Un câble à huile, par le fait qu'il est complètement imprégné, se comporte tout à fait différemment.

A ce qu'il a déjà été dit plus haut, ajoutons, que lorsqu'on applique à un câble à huile une tension supérieure à sa tension limite qui est élevée, il cède après un court laps de temps et sans échauffement préalable notable. A l'examen, les papiers ne présentent plus les brûlures si caractéristiques des câbles à matière. A part l'endroit du claquage où, suivant

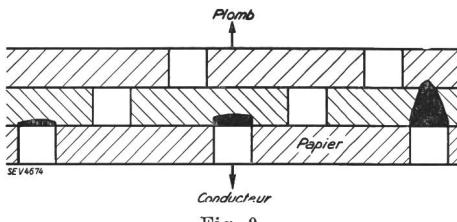


Fig. 9.

Les brûlures des papiers du câble à huile sont localisées sur le 2^e papier. Par places, pourtant, ces brûlures ont endommagé les papiers susjacentes.

un rayon, tous les papiers sont percés les seules brûlures sont localisées sur la face intérieure du 2^e papier compté à partir du conducteur, et marquent le déjoint du 1^{er} papier.

Par place pourtant les brûlures de 2^e papier l'ont déjà percé et détérioré le 3^e. C'est à ces places que la rupture de l'isolant se serait produite si ailleurs la détérioration n'avait pas été plus prononcée (fig. 9).

La raison de la localisation des brûlures s'explique facilement puisque l'huile a une plus faible rigidité diélectrique que le papier, env. 30 kV/mm au lieu de 60 kV/mm, et que ce désavantage est encore accentué par une plus faible constante diélectrique (2,2 pour l'huile et 3,5 pour le papier imprégné) en raison de laquelle la contrainte dans l'huile est plus forte que dans le papier. On sait en effet, par exemple, que si entre deux électrodes planes parallèles, se trouvent placées des couches d'épaisseur égales d'air et de verre de constantes respectives 1 et 9 la tension se répartit inversément propor-

les câbles à matière sont dimensionnés de telle manière que la température du conducteur ne dépasse pas 50°.

Les propriétés des câbles à huile sont pratiquement indépendantes de la température et peuvent, par conséquent, supporter de très fortes surcharges sans en être aucunement éprouvés.

Câbles à huile imprégnés après pose.²⁾

Les intéressantes propriétés des câbles à huile, imprégnés à l'usine comme ils l'ont été jusqu'à maintenant, ne vont pas sans quelques inconvénients dus aux trois causes suivantes: au fort coefficient de dilatation de l'huile, à sa faible viscosité et à la solubilité de l'air dans l'huile.

Le coefficient de dilatation de l'huile est environ 8 fois celui du plomb. Aussi, sous peine de rupture de la gaine de plomb, ou de formation de vides dans le câble, il est indispensable de relier le câble à un ou des réservoirs où l'huile peut s'épancher et d'où elle peut se retirer suivant que la température du câble s'élève ou s'abaisse. Ces réservoirs ne sont pas nécessaires uniquement après la pose du câble, mais aussi pendant la fabrication et son transport, ce qui exige l'emploi de bobines spéciales.

La grande fluidité de l'huile, nécessaire au bon fonctionnement du câble, exige en cours de montage des accessoires, extrémités et jonctions que des précautions spéciales soient prises pour qu'à l'huile qui peut s'écouler du câble ne se substitue pas de l'air. Cet air s'ioniserait dans le champ électrique et décomposera l'huile en donnant notamment des produits gazeux qui, augmentant l'allure du phénomène, amèneraient à brève échéance la rupture de l'isolant.

L'air se dissout rapidement dans l'huile fluide jusqu'à concurrence d'environ 15 % en volume à la température ordinaire. Cet air dissous même s'il ne sature pas l'huile peut en compromettre la valeur. Il faut donc soumettre les extrémités et les jonctions après leur confection à l'action prolongée du vide le plus poussé possible pour éliminer l'air dissous. D'autre part, l'huile contenue dans les réservoirs de compensation doit être à l'abri de l'air, ce qui nécessite l'emploi de réservoirs spéciaux.

Les câbles à huile qui font l'objet de la présente description diffèrent quant à leur mode de fabrication et quant à leurs accessoires des câbles à huile installés jusqu'à maintenant. Les installations qu'ils permettent de réaliser joignent à une grande simplicité d'exécution une grande sécurité de fonctionnement.

La considération très simple qui est à la base du nouveau mode de fabrication des câbles à huile est la suivante:

Le diélectrique d'un câble, s'il est constitué uniquement de fibres de cellulose et d'huile est excellent. La présence d'humidité, de gaz dissous ou non, en abaisse la valeur. Or, si l'eau contenue dans les fibres de cellulose ne peut s'en aller que par l'action combinée de la chaleur et du vide, il n'en

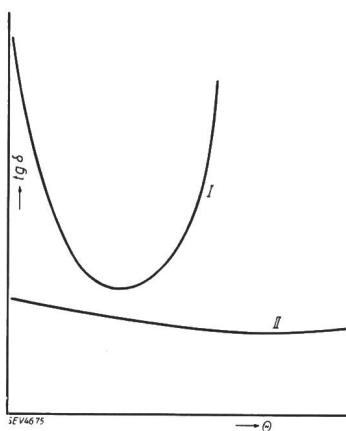


Fig. 10.

Variations, à tension constante, de l'angle de pertes (fig. 8) du câble à matière (I) et du câble à huile (II), en fonction de la température (θ).

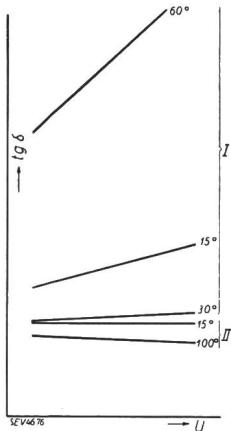


Fig. 11.

Variation de l'angle de pertes (fig. 5) du câble à matière (I) et du câble à huile (II) en fonction de la tension (U).

tionnellement à ces valeurs. Si la différence de tension est de 10 000 Volts, l'air en supportera 9000 et le verre 1000 bien que leur épaisseur soit égale.

Pour compléter la comparaison, entre câbles à matière et câbles à huile, il convient de comparer la variation de l'angle de pertes en fonction de la tension et de la température (fig. 10 et 11).

Il résulte de l'examen des courbes représentées sur la fig. 9 que les propriétés des câbles à matière sont dans une dépendance assez étroite de la température, c'est pourquoi

²⁾ Brevet suisse No. 157 438.

va pas de même de l'air ou des gaz remplissant le volume compris entre les fibres, volume à peu près égal à celui des fibres elles-mêmes.

L'expérience a montré, en effet, qu'on peut facilement réaliser à la température ordinaire, à l'intérieur d'un câble bien desséché, un vide suffisamment poussé pour que l'imprégnation s'effectue dans de bonnes conditions puisque la tension limite d'un tel câble correspond à un gradient maximum d'environ 45 kV/mm.

L'imprégnation du câble n'est évidemment possible que si l'huile peut circuler facilement le long du câble. Cette possibilité a été assurée par l'emploi d'un conducteur creux formé de lamelles de cuivre assemblées comme l'indique la figure 12.

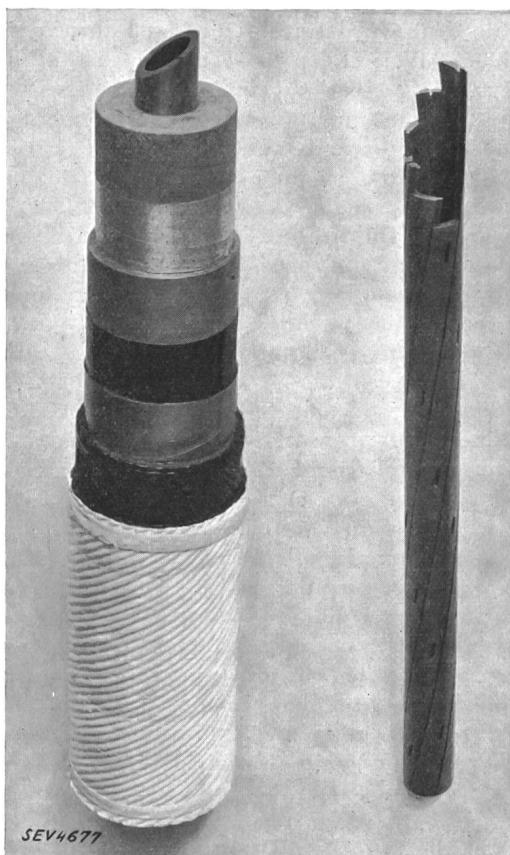


Fig. 12.
Câble et conducteur creux.

Un tel conducteur est celui qui, pour un diamètre extérieur et une section donnés possède le canal intérieur du plus grand rayon. Or selon la loi de Poiseuille, le débit de liquide dans un canal cylindrique est proportionnel à la quatrième puissance du rayon.

$$Q = \frac{\pi (p_0 - p_1)}{8 \eta L} \cdot R^4$$

où Q est le débit $p_0 - p_1$ la différence de pression entre les deux extrémités du canal de longueur L et de rayon intérieur R et η le coefficient de frottement intérieur du liquide.

Le calcul montre qu'en vertu de cette loi, dans deux conducteurs creux d'une même section de 150 mm² et d'un diamètre extérieur de 20 mm formés le premier de lamelles de cuivre, le second de fils de cuivre toronnés sur un support métallique, le débit de l'huile sera, dans les mêmes conditions, dans le rapport de 2 : 1 environ. C'est dans le rapport inverse que seront les pressions pour un débit déterminé.

En conséquence de la constatation faite plus haut, qu'à la température ordinaire, le gaz peut

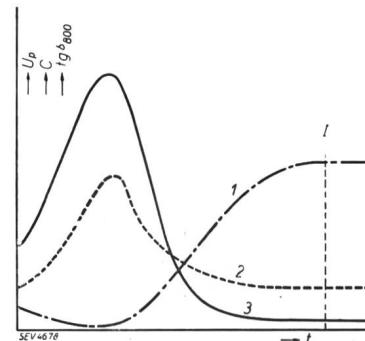


Fig. 13.
Variation de l'isolement (1), de la capacité (2) et de l'angle de pertes à 800 pér./s (3), pendant le temps t de la dessication d'un câble.
I dessication achevée.

être suffisamment évacué d'un câble, parfaitement desséché, la fabrication et la pose d'un câble selon le nouveau procédé seront les suivantes.

Le câble est desséché le plus parfaitement possible par l'action de la chaleur et d'un vide très poussé. La marche de la dessication est contrôlée par des mesures d'isolement, de capacité et d'angle de pertes à 800 pér./s. et basse tension, mesures qui permettent de se rendre compte exactement de l'état de la dessication (fig. 13). Le câble mis sous plomb subit à nouveau les mêmes mesures auxquelles est ajoutée la mesure d'angle de pertes à 50 pér./s et à une tension correspondant à un gradient maximum de 2 kV/mm. Si ces mesures donnent de bons résultats, le câble subit à l'aide d'un gaz sec, de préférence un gaz inerte, tel l'azote, une première épreuve de pression sévère tant par

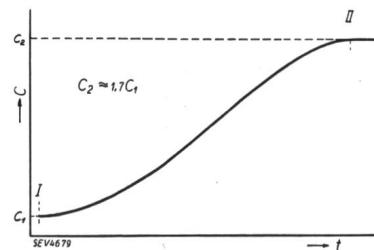


Fig. 14.
Variation de la capacité (C) d'un câble pendant le temps (t) de l'imprégnation.
I Début de l'imprégnation.
II Fin de l'imprégnation.

la valeur de la pression, qui est supérieure à celle qu'exercera l'huile, que par la durée de l'épreuve qui ne se termine qu'après la pose du câble.

Le câble n'étant pas imprégné, la confection des extrémités et jonctions se fait facilement et dans d'excellentes conditions. Pendant ces travaux, une légère surpression est entretenue à l'intérieur des câbles pour éviter toute rentrée d'air humide. La ligne terminée est soumise en totalité ou par sections à une seconde épreuve de pression à l'aide d'un gaz sec. La possibilité d'essayer une partie de

la ligne est assurée par des boîtes de jonction spéciales dont le principe est donné par la figure 17. Ces boîtes de jonction sont divisées en deux compartiments étanches par une borne de traversée formant cloison et possèdent un tuyau muni d'un robinet dont la manœuvre permet de rompre à volonté la circulation du gaz ou de l'huile.

Si l'étanchéité de la ligne, câbles et accessoires, est reconnue parfaite à une pression supérieure à celle qu'exercera l'huile, le gaz du câble est évacué, puis remplacé par de l'huile soigneusement desséchée et dégazée. L'évacuation du gaz se fait, ainsi qu'à l'usine pour les câbles qui s'imprègnent après leur mise sous plomb, à l'aide d'une petite pompe à vide de faible débit, mais donnant un vide très poussé. La marche de l'imprégnation est facilement contrôlée par la simple considération du volume d'huile introduit, ou encore par des mesures de capacité. Ces mesures fournissent des résultats intéressants et assez précis puisque, par l'imprégnation, la capacité du câble augmente dans une forte proportion, soit de 65 à 70 % (fig. 14).

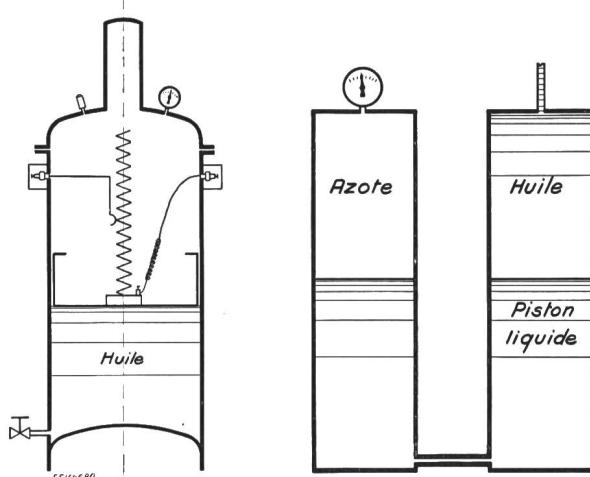


Fig. 15.

Réservoir de compensation avec piston solide muni d'un dispositif électrique de signalisation du niveau de l'huile, et réservoir de compensation à piston liquide.

Le principe sur lequel repose la construction des nouveaux réservoirs de compensation est simple.³⁾ Il consiste à interposer entre l'huile et le gaz comprimé ou non, que contient le réservoir, un piston solide ou liquide ou encore une combinaison de ces deux sortes de pistons (fig. 15). Les mesures faites au laboratoire sur de l'huile prélevée dans de tels réservoirs ayant fonctionné artificiellement dans des conditions beaucoup plus sévères que celles réalisées dans la pratique, ont montré l'efficacité de la protection qu'assurent ces pistons. Practiquement on constate dans les cas où l'huile est mise sous pression par un gaz comprimé, que la pression de ce gaz ne baisse pas, ce qui aurait lieu s'il se dissolvait dans l'huile.

Les câbles n'étant pas imprégnés à l'usine, le rôle des réservoirs de compensation est grandement

³⁾ Brevet suisse No. 157141.

simplifié, puisqu'ils n'ont à intervenir ni pendant la fabrication, le transport et la pose du câble. Leur rôle ne commence qu'après que toutes les opérations délicates sont terminées.

Les boîtes de jonction des câbles à huile sont de deux espèces suivant qu'elles assurent ou empêchent l'écoulement de l'huile d'une longueur de câble à l'autre.

Les premières sont simples et ne se différencient pas beaucoup des jonctions des câbles à matière. Les secondes sont plus compliquées. En principe, elles consistaient jusqu'à maintenant en deux boîtes d'extrémité couchées et placées bout à bout et protégées par un écran (fig. 16).

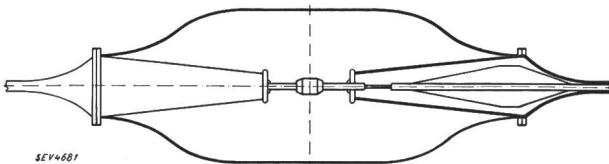


Fig. 16.
Boîte de jonction à compartiments étanches formée de deux boîtes d'extrémité couchées.

Ces boîtes de jonction sont nécessaires pour rompre la pression de l'huile en cas de déclivité et pour permettre de joindre le câble au réservoir de compensation dont l'huile pourra communiquer avec le canal du conducteur puisque sa continuité est rompue. Des jonctions de ce genre sont forcément de grandes dimensions par suite notamment de la déformation du champ électrique qu'elles occasionnent.

Par suite du principe sur lequel elle est construite, la boîte de jonction à cloison dont le schéma est donné par la figure 17 ne déforme pratiquement pas le champ électrique, ce qui a permis de réduire notablement ses dimensions tout en lui assurant une grande sécurité.

La borne de traversée et l'isolant dont on la recouvre, ne permet pas que les échanges d'huile entre le câble et le réservoir branché sur la jonction ne s'effectuent par écoulement de l'huile par

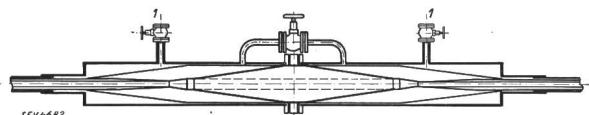


Fig. 17.
Boîte de jonction à compartiments étanches obtenue à l'aide d'une borne de traversée (boîte de jonction à cloison).
I Raccord au réservoirs de compensation.

l'extrémité du canal contenu dans le conducteur. La possibilité de ces échanges a été obtenue en permettant à l'huile de filtrer à travers l'isolant du câble ce que l'on assure facilement en remplaçant sur environ 5 mètres la gaine de plomb du câble par une autre gaine de diamètre plus grand.

La mise en œuvre des principes et procédés décrits plus haut a permis de réaliser de nombreux essais de laboratoire et plusieurs installations à 50 kV, 70 kV, 132 kV et 150 kV dont la description ainsi que celle des essais électriques réalisés après pose fera l'objet d'un prochain article.