

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

Artikel: Câbles pour la haute et très haute tension
Autor: Borel, James
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058974>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 25.12.2024

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

Câbles pour la haute et très haute tension.

Par James Borel, Cortaillod.

Dans l'état actuel de son développement, l'industrie des câbles peut réaliser avec toute la sécurité voulue des canalisations pouvant fonctionner jusqu'aux plus hautes tensions industrielles utilisées aujourd'hui. Ces câbles sont caractérisés par le fait que leur isolant est constitué par du papier et un corps imprégnant formé en tout ou partie par de l'huile minérale à l'exclusion de tout isolant gazeux. Dans ces câbles le gaz joue néanmoins un rôle important bien que discret, mais un rôle exclusivement mécanique. Sont brièvement traités ici les câbles à matière visqueuse, à basse et à haute pression, les câbles à isolant comprimé et, d'une façon plus complète, les câbles à huile.

Ainsi qu'il est bien connu, l'isolant des câbles électriques est constitué par de la cellulose, sous forme de papier, et par une matière imprégnante constituée en tout ou en majeure partie par une huile minérale généralement très visqueuse.

Le papier et les huiles utilisés comme isolant dans les câbles sont actuellement livrés par l'industrie dans un état de perfection qui, en principe du moins, rendrait assez simple la réalisation de câbles pour la très haute tension, si l'une des propriétés de l'huile, qui n'a aucune relation avec sa valeur électrique, ne venait sérieusement compliquer le problème.

Cette bien malencontreuse propriété, c'est sa dilatabilité ou plus exactement l'excès de sa dilatabilité sur celle de la cellulose. Si bien que l'on peut dire, quelque étonnant que cela puisse paraître, que ce qui a retardé de plus d'un quart de siècle la réalisation de câbles à haute tension, c'est moins l'insuffisance des matériaux que l'on employait ni même à bien des égards la technique de la fabrication, mais le fait apparemment insignifiant que le coefficient de dilatation cubique de l'huile est environ trois fois supérieur à celui de la cellulose. En effet, par suite des inévitables variations de température que subit un câble, tant pendant sa fabrication qu'en exploitation, la différence de dilatabilité de l'huile et de la cellulose a pour effet de créer des vacuoles à l'intérieur de l'isolant des câbles dits à matière, qui constituent la grande majorité des câbles et qui, pendant près d'un demi siècle, furent les seuls câbles possibles.

Ces vacuoles sont de petits espaces dépourvus de matière imprégnante et contenant des gaz raréfiés. Ces gaz sous l'influence du champ électrique s'ioniseront à partir d'une tension critique et seront le siège de décharges électriques qui peu à peu détériorent la matière imprégnante et la cellulose jusqu'à ce que le claquage s'ensuive. Il suffit de connaître ce fait pour comprendre le pourquoi des précautions prises dans la technique des câbles destinés à la très haute tension. Le mécanisme de ces phénomènes d'ionisation et de détérioration a été décrit dans le Bulletin ASE 1935, N° 16. Je me per-

Heute ist die Kabelindustrie in der Lage, mit jedem erstrebten Sicherheitsgrad Kabelleitungen für die höchsten, industriell angewandten Spannungen herzustellen. Diese Kabel sind dadurch gekennzeichnet, dass ihre Isolation aus Papier und einem imprägnierenden Stoff besteht, der ganz oder teilweise aus Mineralöl gebildet wird, unter Ausschluss jeder gasförmigen Isoliermittel. In diesen Kabeln spielt jedoch das Gas ebenfalls eine wichtige, wenn auch versteckte Rolle, die aber ausschliesslich mechanischer Natur ist.

Im folgenden werden die Massekabel, die Druckkabel und, eingehender, die Oelkabel behandelt.

mets d'y renvoyer ceux qui désirent le connaître plus en détail.

Un câble électrique avec ses accessoires, boîtes d'extrémité, de jonction, éventuellement avec ses réservoirs constitue un espace clos indéformable sous l'influence d'une pression extérieure ne dépassant pas la valeur de la pression atmosphérique. Cet espace clos contient donc un corps dont le volume varie fortement avec la température. Or comme seuls les gaz sont compressibles, les variations de volume de ce corps (huile ou matière imprégnante) ne peuvent s'effectuer qu'aux dépens d'un gaz dont les variations de volume sont égales mais de signe contraire à celles du volume de la matière imprégnante. Tout système de câble met forcément en jeu un gaz compensateur dont le rôle est important et permet d'effectuer un classement en se basant sur la façon dont ce rôle est rempli. A cet égard, les câbles se divisent en deux groupes:

1° les câbles dans lesquels le gaz compensateur se trouve à l'intérieur de l'isolant; le gaz est donc soumis à l'action du champ électrique;

2° les câbles dans lesquels le gaz compensateur se trouve en dehors de l'isolant et par conséquent ne se trouve pas contraint électriquement.

Chacun de ces groupes se subdivise à son tour comme il est indiqué dans le tableau I:

Classement des câbles suivant le rôle joué par le gaz compensateur.

Tableau I.

I. Gaz contenu dans l'isolant	II. Gaz extérieur à l'isolant
1° Gaz à basse pression (câble ordinaire dit câble à matière)	1° Gaz localisé dans des réservoirs de compensation (câble à huile)
2° Gaz à haute pression (nouveau câble à matière)	2° Gaz disposé sur toute la longueur du câble (câble à isolant comprimé).

C'est en me basant sur ce classement, qui n'a pas encore été envisagé, que je passerai en revue les différents types de câbles utilisés ou proposés pour la très haute tension en m'arrêtant quelque peu aux

câbles à huile qui, dans le domaine des câbles à très haute tension, ont déjà conquis leurs quartiers de noblesse.

Groupe I.

Ce groupe renferme donc des câbles dont le fonctionnement est conditionné par la présence d'un gaz dans leur isolant.

1° Le gaz est à basse pression. (Câble à matière ordinaire.)

Je ne dirai qu'un mot de ce type de câble bien connu des exploitants et qui constitue la très forte majorité des câbles actuellement posés pour la

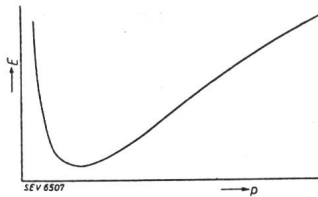


Fig. 1.
Variation de la rigidité diélectrique E d'un gaz en fonction de la pression p .

moyenne et la haute tension. L'expérience a montré que ces câbles peuvent fonctionner en toute sécurité jusqu'à des gradients max. d'environ 4 kV/mm, mais qu'il n'est pas indiqué d'en construire pour des tensions supérieures à 70 kV. Dans ces câbles la compensation des variations de volume de la matière imprégnante est assurée par les vacuoles qu'il contient forcément. Ce sont ces vacuoles qui limitent la valeur de la tension que l'on peut appliquer à ces câbles par suite des phénomènes électriques dont elles sont le siège. Or les phénomènes électriques qui se passent dans les gaz obéissent à des lois simples. On sait notamment que la rigidité diélectrique des gaz dépend étroitement de leur pression suivant une loi représentée graphiquement par la figure 1.

2° Le gaz est à haute pression.

De part et d'autre d'une valeur assez basse de la pression, valeur qui dépend de la forme, de la distance des électrodes ainsi que de la nature du gaz, la rigidité diélectrique augmente lorsque la valeur de la pression s'éloigne du minimum. Pour augmenter la valeur d'un câble à matière, il faut donc, soit diminuer, soit augmenter la pression du gaz qu'il contient. Diminuer suffisamment la pression pour obtenir une amélioration intéressante ne peut malheureusement pas être réalisé. Les gaz que le papier a absorbés et qu'il rend peu à peu, rendent l'opération impossible.

Augmenter la pression est par contre chose assez facile, du moins en apparence. Il semblait même à priori que, par cette opération, on allait résoudre définitivement et sans complication le problème des câbles destinés à la très haute tension.

Pour des raisons non encore connues, cet espoir a été déçu, bien qu'on ait songé non seulement à augmenter la pression mais aussi à employer des

gaz à hauts poids moléculaires qui, pour une même pression, s'ionisent à une tension plus élevée que les gaz à poids moléculaire plus faible, comme le montre le tableau II.

Tableau II.

Gaz	Poids moléculaire	Gradient d'ionisation en V/mm
Hydrogène	2	1 500
Azote	28	2 000
Acétylène	26	2 300
Acide carbonique	44	2 500
Chlorure de méthyle	50,5	2 750
Butane	58	2 900
Ether	74	3 500
Chloroforme	119,5	4 500

Il est prématuré de prédire dans l'état actuel des études, le sort qui sera réservé à ce genre de câble, qui, dans la pensée de ceux qui s'en occupent, devrait conserver la simplicité du câble à matière tout en possédant une tension limite notablement supérieure. Pourtant il faut reconnaître que les gaz seront toujours handicapés par leur faible constante diélectrique. Placés en série avec du papier imprégné, ils auront toujours à supporter de plus fortes contraintes que le papier imprégné, ce qui n'est pas heureux.

Cela dit, j'ai hâte de passer au 2^{me} groupe qui renferme des types de câbles utilisés avec succès pour la haute et la très haute tension.

Groupe II.

Câbles dont le fonctionnement est conditionné par l'action d'un gaz situé hors de l'isolant.

Par suite de leur analogie de fabrication et de composition avec les câbles à matière ordinaire, il est indiqué de parler en premier lieu des câbles à isolant comprimé bien qu'ils soient de réalisation plus récente que les câbles à huile.

2° Gaz disposé sur toute la longueur du câble. (Câble à isolant comprimé.)

Les câbles à isolant comprimé sont en principe des câbles à matière dans lesquels l'action d'un gaz sous pression, agissant directement ou indirectement

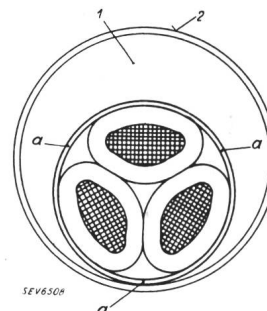


Fig. 2.

Câble à isolant comprimé.
La gaine de plomb, par de légères déformations en a permet à la matière imprégnante de se dilater et de se contracter sans former de vacuoles.
1 Gaz sous pression. 2 Tuyau en fer.

sur l'isolant, supprime les vacuoles et oblige la matière qui a quitté l'isolant, par suite d'une élévation de température, à réintégrer sa place lors du refroidissement.

L'exemple suivant fera mieux comprendre le fonctionnement de ce type de câble. Soit un câble triphasé sectorial ordinaire placé dans un tuyau en fer dans lequel il est possible d'enfermer un gaz sous pression (fig. 2). L'isolant de ce câble sera caractérisé par une variation de l'angle de pertes en fonction de la tension représentée schématiquement par la figure 3. Les vacuoles contenues dans l'isolant s'ionisent donc à partir d'une certaine tension U_1 . Augmentons à 5 kg/cm² la pression du gaz contenu dans le tuyau. Les mesures d'angle de pertes accuseront, d'une part, une augmentation de la tension à laquelle débute l'ionisation U_5 et, d'autre part, une diminution de l'ionisation.

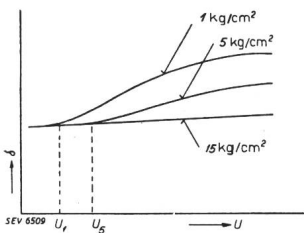


Fig. 3.

Variation de l'angle de pertes δ d'un câble en fonction de la tension U et de l'état de compression de l'isolant.

Augmentons la pression à 15 kg/cm². On constatera que l'ionisation a pratiquement disparu. Il est facile d'interpréter la signification de ces résultats. Sous l'influence de la pression, le plomb se déforme légèrement en a (fig. 2) ce qui permet à la pression de se transmettre à l'isolant. Sous l'effet de cette pression les vacuoles diminueront puis disparaîtront si la pression est suffisante. Cette disparition se constate par les mesures d'angles de pertes et, ce qui est l'essentiel, se répercute très heureusement sur la tension limite qui s'élève notablement. Elle double à peu près lorsque la pression passe de la pression atmosphérique à 15 kg/cm². Pratiquement les câbles à isolant comprimé peuvent fonctionner en toute sécurité jusqu'à des gradients maxima de 10 kV/mm.

Lorsqu'un câble à isolant comprimé s'échauffe, la matière isolante se dilate, suinte à travers le papier ou fait gonfler l'isolant suivant les circonstances et transmet sa poussée au plomb qui se dilate. Pendant le refroidissement les phénomènes inverses se passent. Lors de l'échauffement, le volume de la matière imprégnante augmente, celui du gaz diminue tandis que lors du refroidissement le volume de la matière diminue et celui du gaz augmente.

Ce genre de câble est intéressant. Il est l'aboutissement de longs travaux entrepris en vue de tirer un meilleur parti des câbles ordinaires et illustre d'une façon frappante la théorie peu à peu ébauchée du fonctionnement de l'isolant si important qu'est le papier imprégné.

Le câble à isolant comprimé a reçu la sanction de la pratique. Quelques installations d'une longueur totale d'environ 50 km ont été réalisées en Allemagne, en Norvège, au Danemark, en Angleterre et fonctionnent à des tensions allant de 50 à 110 kV.

Des études sont faites actuellement pour enfermer le gaz compensateur non dans une conduite en fer, mais dans une gaine de plomb frettée et concentrique à celle du câble. Cette gaine fait donc partie du câble et se fabrique en même temps que lui. Les résultats de ces études ne sont pas encore assez avancés pour qu'il soit indiqué d'en parler devant une assemblée de praticiens.

Il convient d'ajouter que l'initiative de la réalisation du câble à isolant comprimé revient à M. Höchstädter, dont le nom est bien connu dans l'industrie des câbles.

Mentionnons en passant qu'on a cherché à loger le gaz entre le plomb et l'isolant, mais que les câbles ainsi réalisés n'ont pas encore donné toute satisfaction jusqu'à maintenant.

1° Le gaz compensateur est localisé dans des réservoirs.

C'est dans cette subdivision que rentrent les câbles à huile

qui, par suite du développement de leur emploi, méritent de retenir plus longtemps notre attention.

Généralités.

Dans les câbles à huile le gaz compensateur n'est donc pas réparti sur toute la longueur du câble, mais est localisé dans des réservoirs placés en des endroits déterminés. C'est dans ces réservoirs que l'huile devra affluer lorsque le câble s'échauffera, tandis que c'est de ces réservoirs que l'huile refluera vers le câble lors du refroidissement. L'afflux et le reflux de l'huile amèneront des variations égales mais de signe contraire du volume du gaz.

Pour que l'huile puisse s'écouler dans un sens ou dans l'autre sans créer de fortes surpressions ou dépressions, il faut que les deux conditions suivantes, soient réalisées:

- 1° existence dans le câble d'un ou plusieurs canaux longitudinaux de section suffisante;
- 2° grande fluidité de l'huile.

1° *Canaux longitudinaux.* Normalement tous les câbles contiennent des canaux longitudinaux de petites sections, il est vrai, constitués par les espaces que ménagent entre eux les fils de cuivre dont est formé le conducteur. La surface de ces espaces est d'environ le 25 % de la surface apparente du conducteur.

Ainsi, pour un conducteur de 150 mm² dont le diamètre est de 15,9 mm, ces espaces représentent une surface de 49 mm². Pourtant, exception faite pour de petites longueurs de câbles, il n'est pas possible d'utiliser ces canaux, bien que leur section totale soit intéressante. En effet, selon la loi de Poiseuille qui régit l'écoulement des liquides, le

débit dans un canal cylindrique est proportionnel à la quatrième puissance du rayon selon la formule

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

où Q est le débit, $p_0 - p_1$ la différence de pression entre les extrémités du canal de longueur L et de rayon intérieur R , et η le coefficient de frottement interne du liquide. En se basant sur cette formule, un calcul approximatif montre que le pouvoir de transmission d'huile d'un conducteur ordinaire de 150 mm² n'est qu'à peu près le centième de celui d'un conducteur de même section et de même diamètre dans lequel tous les espaces auraient été réunis au centre en un seul canal. C'est pour cette raison que les conducteurs actuellement utilisés dans les câbles à huile présentent en leur centre un canal du diamètre le plus grand possible. On peut aussi réaliser l'écoulement de l'huile dans des canaux situés entre l'isolant du câble et le plomb ou ménagés dans l'épaisseur même de la gaine de plomb du câble, mais pour des raisons mécaniques et électriques ces possibilités ont été abandonnées. Dans les câbles triphasés imprégnés d'huile fluide, l'écoulement de l'huile se fait tout naturellement dans des canaux ménagés dans les espaces existant entre les trois conducteurs isolés et le plomb.

2° *Fluidité de l'huile.* L'influence de cette propriété sur l'écoulement de l'huile est évidente, par définition même. L'écoulement est proportionnel à la fluidité, ou, selon les notations de la formule de Poiseuille, inversement proportionnel au coefficient de frottement interne.

Histoire et technique du câble à huile.

Le câble à huile est très ancien. Son origine se confond à peu près avec celle du câble à matière. C'est, en effet, en 1875 que le câble dont l'imprégnant est constitué par de l'huile fluide apparaît pour la première fois. David Brooks qui en est l'inventeur, proposait de tirer dans une conduite en fer un câble formé de fils de cuivre isolés par un guipage en textile, et de remplir ensuite la conduite d'huile fluide. Des réservoirs étaient prévus pour faire face aux variations de volume de l'huile. Si le câble à huile de 1875 est semblable au câble actuel, dans le principe même de son fonctionnement, il en diffère par un fait important. Actuellement le câble à huile est destiné aux tensions les plus élevées, tandis que son prédécesseur était destiné aux tensions les plus basses, à savoir aux transmissions télégraphiques. Ce fait montre d'emblée que les raisons qui ont conduit David Brooks à proposer son câble, ne sont aucunement celles qui, bien plus tard, firent mettre au point des câbles à huile pour le transport d'énergie à très haute tension. En 1875 la technique des presses à plomb était dans son en-

fance. Si l'on savait fabriquer des tuyaux de plomb de petites longueurs et de qualités pas toujours satisfaisantes, on ne pouvait encore presser directement une gaine de plomb sur un câble. Dans ces conditions il est compréhensible qu'on ait cherché à utiliser des tuyaux en fer et que pour soustraire à l'action de l'eau ou de l'humidité les substances fibreuses entourant les fils de cuivre on ait songé à remplir le tuyau d'huile fluide et qu'inévitablement on ait été obligé de faire usage de réservoirs pour compenser les variations de volume de l'huile. Ce câble dut céder le pas devant l'apparition du câble à gaine de plomb pressée sur un isolant constitué par du papier imprégné d'une huile très épaisse ne coulant pas à la température ordinaire ou épaissie par l'addition de certaines substances.

Aussi n'est-ce qu'environ quarante ans après, qu'à la suite de très nombreuses études faites sur les isolants, l'huile fluide réapparut dans l'industrie des câbles.

C'est, en effet, en 1913 que Watson (Angleterre) décrit un câble imprégné d'huile, maintenue sous pression par des réservoirs et destiné à la haute tension. Selon l'auteur l'imprégnation d'un câble par de l'huile fluide diminue les pertes diélectriques du câble et augmente sa durée, ce que l'expérience a confirmé, mais une dizaine d'années après que Watson l'ait annoncé, alors que la signification des pertes diélectriques était généralement ignorée pour la simple raison que rares étaient ceux qui s'aventuraient à les mesurer. Watson pourtant, malgré la justesse de ses vues ne réussit pas à tirer parti du perfectionnement qu'il proposait.

A notre avis, son échec vient d'un fait apparemment de peu d'importance. Watson avait prévu que l'écoulement de l'huile s'effectuerait dans un espace annulaire situé entre le conducteur et le papier imprégné. Or, pour des raisons tout à fait indépendantes des pertes diélectriques, cet endroit est le plus mal choisi. Pour l'expliquer, il est nécessaire de pénétrer plus intimement dans le mécanisme de la disruption électrique des huiles.

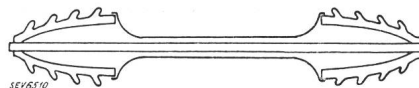


Fig. 4.

Schéma d'un dispositif pour la détermination de la rigidité diélectrique de l'huile et du papier imprégné.

Soit deux cylindres concentriques en métal; le cylindre extérieur, évasé à ses extrémités, étant muni d'isolateurs comme l'indique la fig. 4. Introduisons avec toutes les précautions d'usage, de l'huile soigneusement desséchée et dégazée dans l'espace ainsi réalisé et procédons à la détermination de la tension de claquage de l'huile.

Pour rendre l'exemple plus concret, supposons que le rayon du cylindre intérieur soit de 10 mm, et que le rapport des rayons des deux cylindres soit de 2,7. Dans ces conditions le gradient maximum sera donné par l'expression

$$G_{max} = \frac{U}{10} \text{ où } U \text{ est la tension.}$$

On admet que la rigidité diélectrique de l'huile entre sphères normales éloignées de 1 à 2 mm, est d'environ 20 kV/mm. Si l'on introduit cette valeur dans l'expression ci-dessus, on trouve pour la tension de claquage la valeur très élevée de 200 kV. Or selon les résultats obtenus par tous ceux qui se sont occupés de la disruption électrique des huiles, on trouverait avec l'appareil décrit d'une part une tension de claquage moyenne de beaucoup inférieure au chiffre cité, environ le tiers de ce chiffre, et d'autre part des valeurs individuelles variant dans de grandes proportions.

Répétons la même expérience en utilisant comme isolant du papier imprégné d'huile. Dans cet isolant le volume occupé par l'huile est à peu près égal à celui de la cellulose. On obtiendra des valeurs de tension de claquage très élevées, de l'ordre de grandeur de 360 kV, et différant les unes des autres de 10 % au maximum. Il faut encore ajouter que cette tension, correspondant à un gradient maximum de 36 kV/mm, est celle qui correspond au claquage en essai de durée; le claquage instantané surviendrait à une tension notablement plus élevée. La combinaison papier-huile est donc très heureuse; il vaut la peine de s'y arrêter quelques instants. On peut considérer l'isolant constitué par du papier imprégné d'huile comme composé de deux éléments: le papier imprégné proprement dit qui, bien que composé de fibres de cellulose et d'huile remplissant les espaces entre les fibres, peut être considéré comme un élément unique, et l'huile se trouvant sous forme de pellicules dans les déjoints du papier, voir fig. 5.

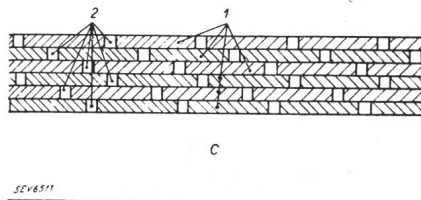


Fig. 5.

On peut considérer que l'isolant d'un câble à huile est constitué par deux éléments: le papier imprégné (1) et l'huile (2) contenue dans les déjoints du papier. C conducteur.

On peut sommairement caractériser les propriétés de ces deux éléments de la façon suivante:

	rigidité diélectrique	constante diélectrique
Papier imprégné	60 kV/mm	3,6
Huile	20 kV/mm	2,2

L'huile est donc l'élément le plus faible de l'isolant du câble et par surcroît, celui qui, par sa plus faible constante diélectrique, est le plus contraint puisqu'il est placé en série avec du papier imprégné possédant une constante diélectrique plus élevée. Comme il est évident que si l'un des composants cède tout cède à plus ou moins brève échéance, on peut comparer le câble à un édifice dont le toit serait supporté par des colonnes alternativement plus ou moins fortes. L'édifice s'écroulera lorsque la charge de rupture des colonnes les moins fortes sera atteinte.

En résumé, il résulte de la comparaison des propriétés électriques de l'huile et du papier imprégné d'huile les deux constatations suivantes.

1° La rigidité diélectrique de l'huile en grande épaisseur est bien inférieure à celle que l'on peut calculer par extrapolation. On a cherché à expliquer cette différence par l'influence d'impuretés contenues dans l'huile et dont certaines peuvent s'orienter dans le champ électrique et faire «pont». La présence de ces impuretés expliquerait aussi l'irrégularité des résultats.

2° La rigidité diélectrique de l'huile est grandement augmentée et régularisée par son cloisonnement à l'aide de papier, ou, pour employer une figure expressive, par la création de barrières. Plus le cloisonnement subdivise l'épaisseur d'une couche d'huile, ou autrement dit plus les barrières sont nombreuses, plus la rigidité de l'huile augmente et, dans une certaine mesure, plus aussi le phénomène de la disruption devient régulier.

Ces brèves remarques permettent de saisir la raison pour laquelle le câble à huile selon Watson, malgré l'intéressante idée qui est à sa base, ne pou-

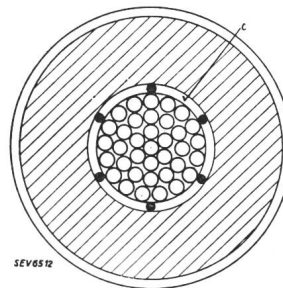


Fig. 6.

Câble à huile selon Watson.
L'écoulement de l'huile est assuré par un canal annulaire c, situé entre le conducteur et le premier papier.

vait donner de bons résultats. Dans ce câble, en effet, le canal pour l'écoulement de l'huile est constitué par un espace annulaire créé entre le conducteur et le premier papier, voir fig. 6. Ainsi de l'huile sous une épaisseur qui est un multiple élevé de celle sous laquelle elle se trouve dans les déjoints du papier d'un câble, est placée en série avec un isolant de plus forte constante diélectrique à l'endroit même où la contrainte est maximum. Le résultat d'une telle disposition est évident: l'huile cède à une tension relativement basse et entraîne le claquage du câble. Aussi l'invention n'eut-elle pas de suite.

Etant donné que l'huile dans l'isolant d'un câble doit être cloisonnée, afin de pouvoir supporter de fortes contraintes, son écoulement doit s'effectuer

dans des canaux situés en dehors de l'isolant. C'est ce que réalisa la Société Pirelli, quelques années après la courte apparition du câble Watson, en construisant des câbles possédant un canal au centre du conducteur, ou des canaux dans la gaine de plomb ainsi que des câbles triphasés dans lesquels il est facile de faire circuler l'huile en dehors de

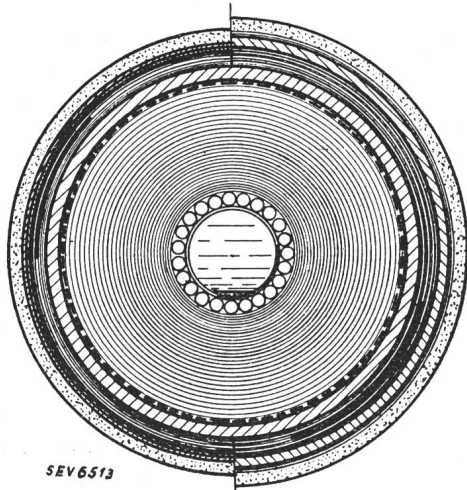


Fig. 7.

Section d'un câble à huile Pirelli.

tout champ électrique en utilisant tout ou partie des espaces situés entre les conducteurs isolés et la gaine de plomb. Pour des raisons pratiques, parmi les différentes possibilités de réaliser des canalisations électriques formées de câbles à huile, celle qui consiste à utiliser des câbles monophasés, possédant un conducteur creux, pour l'écoulement de l'huile, a généralement prévalu (fig. 7).

Le conducteur creux selon Pirelli est constitué, comme il est bien connu, par une hélice en fil ou en ruban métalliques sur laquelle des fils de cuivre sont toronnés.

Toute la technique des câbles à huile est dominée par la nécessité de faire face à la grande fluidité et à la dilatabilité de l'huile. Cette nécessité impose selon le système Pirelli, les obligations suivantes:

- a) fabrication: imprégnation après la mise sous plomb, mise en relation du câble dès son imprégnation avec un réservoir de compensation;
- b) pose: nécessité de compenser tout écoulement d'huile du câble par la rentrée d'un volume d'huile équivalent;
- c) fonctionnement: compensation de la dilatation et de la contraction de l'huile, maintien de la pression hydraulique de l'huile à des valeurs judicieuses.

Il n'entre pas dans le cadre d'un exposé de principes de pénétrer dans les détails. Il suffirait peut-être de dire que ces obligations peuvent être facilement tenues, témoins les nombreuses installations de câbles à huile, système Pirelli (env. 2000 km de câbles), qui fonctionnent à satisfaction jusqu'à la tension de 220 kV et de citer pour mémoire les

nombreux articles et rapports qui ont décrit en détail comment ces obligations ont été tenues. Qu'il me soit permis pourtant de dire quelques mots sur les caractères les plus frappants de la technique des câbles à huile.

L'imprégnation après la mise sous plomb, exigée par l'huile trop fluide pour être retenue par le papier, constitue un sérieux avantage sur l'imprégnation ordinaire qui s'effectue en chaudière avant le passage à la presse à plomb. Cet avantage qui avait été reconnu depuis longtemps déjà sans qu'on ait pu en tirer parti, provient d'une part du petit volume de gaz à évacuer et, d'autre part, de la possibilité de contrôler avec précision l'importante opération qu'est l'imprégnation.

Les propriétés électriques de l'huile peuvent être, dans certaines conditions, amoindries par la présence de gaz dissous. Il faut donc non seulement dégazer l'huile avant l'imprégnation, mais aussi empêcher que l'huile puisse absorber du gaz en cours de fonctionnement du câble. Il faut donc que l'huile contenue dans les réservoirs de compensation soit soustraite au contact du gaz compensateur. Une ingénieuse solution de ce problème a été donnée par Pirelli. L'huile dans les réservoirs est enfermée dans des cellules métalliques, déformables, telle la cellule déformable d'un baromètre anéroïde (fig. 8). Ces cellules, reliées entre elles par un canal collec-

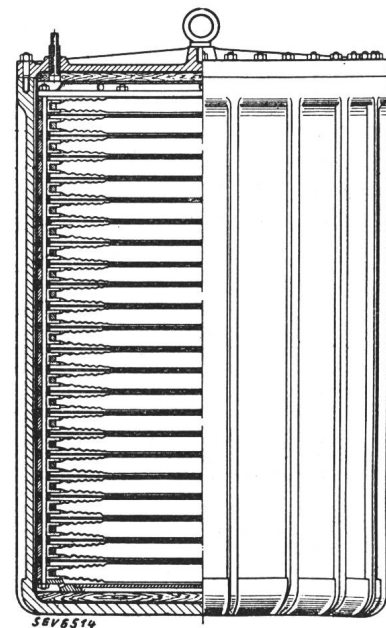


Fig. 8.

Réservoir de compensation Pirelli.

teur, se dilatent sous l'influence d'une surpression intérieure ou se contractent sur pression extérieure. Elles permettent notamment de réaliser des réservoirs pouvant fonctionner quelle que soit leur position, ce qui est indispensable pour les réservoirs montés sur les bobines en vue d'assurer la compensation des câbles pendant leur fabrication et leur transport.

Une opération délicate qui a aussi reçu une solution ingénieuse est la jonction électrique des conducteurs de deux tronçons de câbles contigus. La jonction par soudure présentait plus d'un inconvénient dûs notamment à la possibilité d'écoulement de l'huile. C'est pourquoi, pour les boîtes de jonction simples, un procédé de raccordement à froid simple et rapide a été mis au point. Ce procédé consiste en l'application sous une forte pression, fournie par une presse hydraulique à main, d'un manchon de cuivre sur le conducteur renforcé contre l'écrasement. Dans les boîtes de jonction d'arrêt, la jonction électrique est assurée par un dispositif à ressorts. Ce dispositif permet de confectionner la boîte de jonction en grande partie à l'usine, ce qui réduit le temps de montage de la boîte de jonction et par cela même les possibilités d'écoulements.

L'huile utilisée dans les câbles étant trop fluide pour être retenue par le papier, exerce sur tous les objets qui s'opposent à son écoulement une pression, qui, abstraction faite de celle du gaz contenu dans le réservoir de compensation, dépend de la dénivellation et de la densité de l'huile. Ainsi une dénivellation de 100 mètres provoquerait une pression de 9 kg/cm², ce qui n'est pas à recommander. Il faut donc rompre la pression pour qu'elle ne

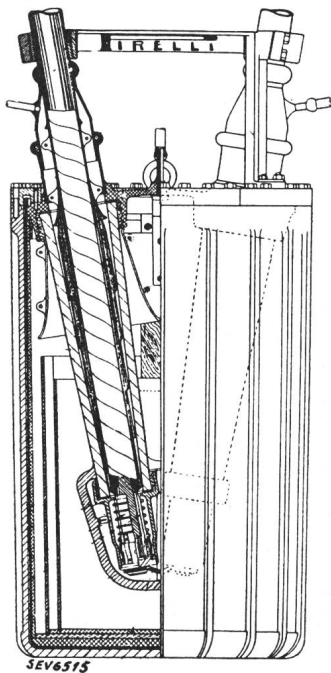


Fig. 9.

Boîte de jonction d'arrêt selon Pirelli.

dépasse pas une certaine valeur, 3 kg/cm² environ. Ce rôle est rempli par des boîtes de jonctions d'arrêt constituées, en principe, par deux boîtes d'extrémités, placées de préférence horizontalement, et dans la prolongation l'une de l'autre et qui rompent la continuité du passage de l'huile (fig. 9).

La pesanteur n'est pas la seule cause qui peut engendrer de fortes surpressions dans un câble à huile. Supposons, en effet, un câble à huile de plusieurs kilomètres muni de réservoirs à ses seules extrémités et dont le tracé est horizontal. Si le câble est hors service la pression sera la même partout, 2 kg/cm² par exemple en plus de la pression atmosphérique, voir fig. 10. Faisons passer un courant

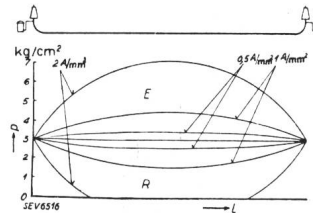


Fig. 10.

Variation de la pression p pendant l'échauffement par différentes charges et le refroidissement d'un câble à huile de grande longueur, compensé à ses extrémités seulement.

de 0,5 A/mm², le câble s'échauffe légèrement et de l'huile devra refluer vers les réservoirs de compensation. Ce reflux créera une surpression qui prendra sa valeur maximum au milieu de la longueur du câble. Cette surpression disparaîtra dans la mesure où l'huile s'écoulera dans les réservoirs. Après un certain temps, de l'ordre de l'heure, un nouvel état d'équilibre sera atteint à une pression un peu supérieure à la pression du début. Si l'on coupe le courant les phénomènes inverses se produiront, le câble se refroidira, de l'huile s'écoulera des réservoirs vers le câble et il en résultera une dépression qui lentement se comblera jusqu'au moment où le câble aura atteint la température du milieu ambiant. Si l'on répète l'expérience avec des courants de plus en plus intenses, il arrivera un moment où les surpressions seront dangereuses pour l'enveloppe de plomb du câble et où les dépressions seront dangereuses pour la tenue électrique de l'huile. On peut facilement parer à ces dangers en disposant d'autres réservoirs le long du câble. Cette mesure ne déploiera pourtant son plein effet, même dans le cas idéal du câble horizontal, que si le câble est subdivisé en tronçons par des joints d'arrêt. Dans ces conditions, chaque réservoir, dont la pression n'est pas forcément rigoureusement égale à celle des autres réservoirs, alimente un tronçon de câble bien déterminé et d'une longueur telle que la pression restera toujours dans les limites acceptables.

Toute la technique des câbles à huile imprégnés à l'usine selon le système Pirelli forme un ensemble complet et bien coordonné, tout à l'honneur de son principal auteur M. Emanuelli.

Un autre système de câble à huile a été mis au point en Suisse à la suite de travaux entrepris, dès 1925 au laboratoire de recherches de la Câblerie de Cortaillod, en vue d'élucider le problème suivant: étant donné les avantages qui résultent de l'imprégnation après la mise sous plomb à savoir, faible volume de gaz à évacuer, contrôle précis de l'imprégnation, peut-on imprégner un câble à la température ordinaire, alors que l'on admet communé-

ment qu'une température de 80 à 100° est indispensable, et dans l'affirmative, n'y a-t-il pas certains avantages pratiques à effectuer l'imprégnation après pose?

Les travaux entrepris pour résoudre ce problème ont porté notamment sur les points suivants: étude de l'absorption de différents gaz par les fibres de cellulose en fonction de la pression et de la température, étude de l'influence de la nature chimique et des pertes diélectriques des huiles sur leur tenue dans le champ électrique, étude de l'influence des barrières et des gaz dissous sur la rigidité diélectrique des huiles, étude de la solubilité des gaz dans l'huile, de leur vitesse de dissolution et étude des propriétés mécaniques des tuyaux de plomb et de la possibilité de renforcer ces tuyaux par des frettes.

Donner un aperçu même sommaire de ces études intéressantes entraînerait beaucoup trop loin. Qu'il me suffise d'en donner les deux principaux résultats pratiques ¹⁾.

1° On peut facilement réaliser à la température ordinaire à l'intérieur d'un câble desséché un vide suffisamment poussé pour que l'imprégnation s'effectue dans de bonnes conditions. Les câbles ainsi obtenus sont équivalents aux câbles imprégnés à chaud à l'usine.

2° L'huile dans les réservoirs de compensation peut être soustraite à l'influence du gaz par l'interposition d'un piston.

Du premier de ces résultats, qui est le plus important, découle une technique nouvelle de fabrication et de montage. Le câble, dès que desséché et mis sous plomb, est soumis à l'aide d'un gaz sec, à un sévère essai d'étanchéité ne prenant fin que peu avant l'imprégnation, après donc la pose du câble et le montage des accessoires. Selon nous, un tel essai d'étanchéité constitue un précieux contrôle de la qualité d'une installation de câbles à huile, car, en effet, on peut actuellement par des contrôles précis être tout à fait sûr de la qualité de l'isolant, mais il faut reconnaître que les propriétés de la gaine de plomb, par suite notamment des aléas de la pose, peuvent, à des endroits particuliers, ne pas présenter la sécurité nécessaire.

On peut donc dire, si paradoxal que cela puisse paraître, que ce qui préoccupe le plus le fabricant de câbles à huile destinés aux plus hautes tensions, ce sont les propriétés mécaniques de la gaine métallique qui sert de «terre» et les altérations de ces propriétés une fois le câble posé et non la qualité de l'isolant.

L'évacuation du gaz et l'imprégnation d'un câble après pose s'effectuent à l'aide d'installations transportables comportant moteur, pompe à vide, dégazeur et pompe à engrenages pour extraire sous vide l'huile du dégazeur et l'envoyer dans le câble.

La réalisation des accessoires s'est heureusement ressentie de la simplicité avec laquelle leur montage peut se faire sur le câble non encore imprégné. Ainsi la fig. 11 représente une boîte destinée à rompre la pression (jonction à cloison).

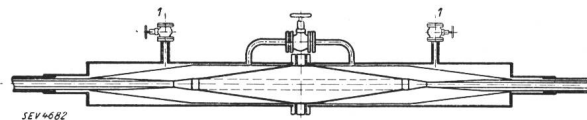


Fig. 11.

Boîte de jonction «Cortailod» à compartiments étanches obtenue à l'aide d'une borne de traversée (boîte de jonction à cloison). 1 raccord aux réservoirs de compensation.

Le second résultat permet de construire des réservoirs de compensation robustes et simples dans lesquels l'huile est soustraite au contact du gaz compensateur par un piston qui suit les fluctuations du niveau de l'huile (voir fig. 12). Ce piston permet aussi de se rendre compte avec précision de la position de ce niveau par lecture directe ou à distance par des mesures électriques. Signalons que le conducteur utilisé par Cortailod est constitué par des lamelles de cuivre assemblées comme l'indique la fig. 13.

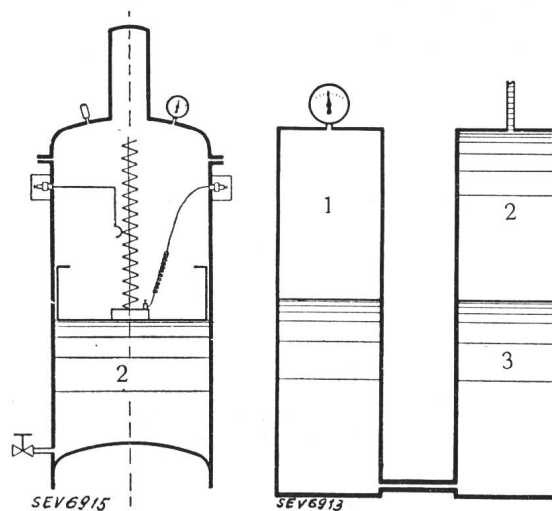


Fig. 12.

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

Ce conducteur est intéressant à plus d'un égard; il est mécaniquement très solide, il atténue dans une certaine mesure l'effet électrique défavorable des brins d'un conducteur ordinaire, il possède pour un diamètre et une section donnés le canal intérieur du plus grand rayon, ce qui facilite l'écoulement de l'huile. Six installations (5 en Suisse, 1 en Hollande) de câbles imprégnés après pose fonctionnement actuellement ainsi qu'il est résumé dans le tableau III.

Pour illustrer les propriétés des câbles à huile imprégnés après pose, qu'il me soit permis de donner brièvement un aperçu du fonctionnement de l'un

¹⁾ Bull. ASE 1935, No. 16, p. 446, et 1936, No. 8, p. 211.

Tableau III.

Lieu	Tension kV	Gradient max. kV/mm	Année
Bâle	50	7,55	1932
Hauterive (Fribourg) .	70	9,2	1934
Vernayaz	132	10,3	1934
Bottmingen	150	10,6	1934
Mühleberg	150	10,5	1935
Concours d'Arnhem . .	150 ¹⁾	17,0	1936

1) entre Cu et Pb.

d'entre eux, celui de Vernayaz et de parler des résultats obtenus à l'intéressant concours d'Arnhem.

Les deux câbles d'essais de Vernayaz sont posés au départ de la ligne aérienne Vernayaz-Ruppers-

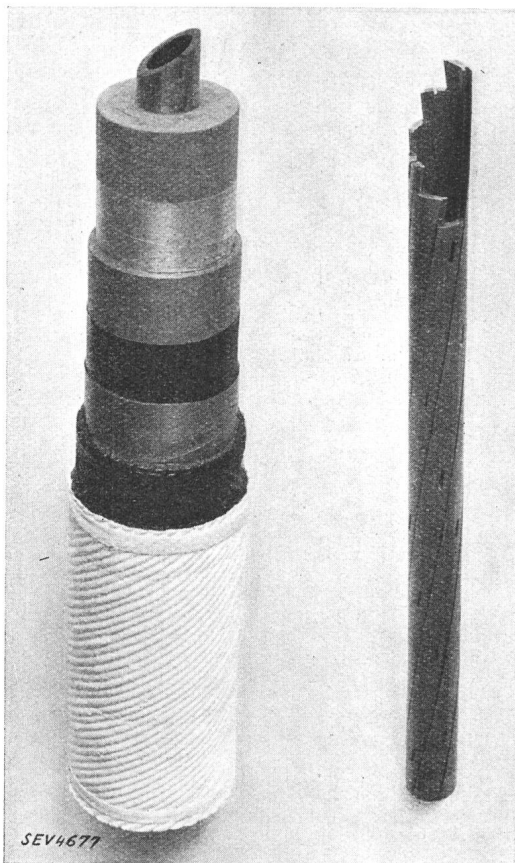


Fig. 13.

Câble à huile «Cortaillod» et conducteur creux.

wil dont ils peuvent, par l'effet de leur capacité, amortir les surtensions²⁾.

Les lectures journalières de la position du niveau d'huile ont permis de tracer le graphique reproduit par la fig. 14. Les variations de volume de l'huile suivent donc fidèlement les variations de la température du sol. Ainsi, le graphique accuse nettement que l'été 1936 fut moins chaud que le précé-

²⁾ Voir la conférence de M. Schneeberger.

dent. La variation maxima de volume est d'environ 8,2 litres. On peut donc dire qu'un câble à matière de même caractéristique et placé dans les mêmes conditions renfermerait en hiver des vacuoles dont le volume serait supérieur de 8200 cm³ au volume des vacuoles en été. Cette simple constatation est bien faite pour souligner la différence existant entre les câbles à matière et les câbles à huile. Malgré les variations de charges, qui peuvent être grandes,

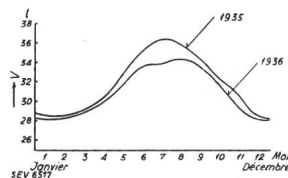


Fig. 14.

Variation du volume V de l'huile contenue dans le réservoir de compensation des câbles à huile 132 kV posés à Vernayaz, durant les années 1935 et 1936.

les surpressions et les dépressions enregistrées à 1,4 km du réservoir ont été de l'ordre du dixième d'atmosphère seulement, ce qui confirme la grande facilité d'écoulement de l'huile dans le conducteur de Cortaillod. Les câbles ont accompli sans défaillance et conformément au calcul leur mission d'amortisseurs de surtensions.

Concours d'Arnhem. Un concours restreint pour lequel 5 maisons ont été pressenties a été ouvert à Arnhem, sous les auspices du Service d'épreuve pour matériel électrotechnique (Kema), en vue du choix d'un système de câbles à 150 kV destinés à relier deux villes de Hollande. Ce concours a été élargi dans la suite et transformé en une compétition sans enjeu immédiat. C'est à ce titre que Cortaillod a posé un câble d'essai³⁾. Les conditions à remplir étaient, en résumé, les suivantes: le câble muni de deux boîtes d'extrémité et de deux boîtes de jonction devait pouvoir supporter la tension de 150 kV entre cuivre et plomb pendant 200 cycles d'échauffement, chaque cycle ayant une durée de 24 h, dont 10 h pour le chauffage par un courant de 485 A et 14 h pour le refroidissement. L'installation devait être ainsi faite qu'il soit possible de contrôler par des mesures de pertes, non seulement l'installation entière mais aussi séparément celles des boîtes d'extrémité et de jonction. Le câble de Cortaillod imprégné après pose a subi avec succès cette sévère épreuve, sans présenter, ainsi que le montrent les graphiques de la fig. 15, de fatigue. Il semble même que cette épreuve ait légèrement amélioré le câble. On peut donc dire en toute certitude que le câble à huile système Cortaillod possède les qualités nécessaires pour satisfaire pleinement aux exigences requises pour la bonne exploi-

³⁾ En voici les caractéristiques:

conducteur creux, section: 185 mm²,
diamètre extérieur: 18,3 mm,
diamètre intérieur: 10 mm,
isolant, épaisseur: 14,7 mm.

tation d'un réseau à haute et très haute tension dans lequel il sera inséré.

Mentionnons pour être complet qu'on a proposé aux Etats-Unis un système de câbles à huile qui a

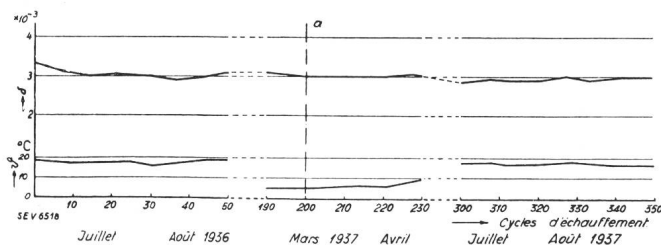


Fig. 15.

Mesures faites par la «Kema» sur l'installation d'essai de Cortaillod.

a fin de l'essai officiel (200 cycles d'échauffement).
 δ angle de pertes. θ température.

quelques analogies avec le câble imaginé en 1875 par Brooks. Il consiste à tirer dans une conduite en fer des câbles sans gaine de plomb et à les imprégner d'huile.

Expériences effectuées au cours de la conférence.

La conférence de M. J. Borel fut illustrée non seulement par des clichés, mais aussi par des expériences dont voici la description.

L'isolant des câbles est respectivement constitué par 3 ou 2 éléments suivant qu'ils font partie du premier groupe ou du deuxième groupe, à savoir: cellulose, matière imprégnante et gaz d'une part et cellulose et huile ou matière imprégnante d'autre part. Or, étant donné que la valeur électrique d'un isolant composé est déterminée par la valeur du composant le plus faible, c'est la valeur électrique du gaz qui détermine la valeur d'un câble du premier groupe et celle de l'huile ou de la matière imprégnante qui détermine la valeur d'un câble du deuxième groupe.

Les lois qui expriment les propriétés électriques des gaz sont relativement simples. Parmi ces lois celle qui rend compte de la relation entre la rigidité et la pression est très importante pour les câbles du premier groupe. Cette loi est représentée graphiquement par la fig. 1. La rigidité, pour une forme et une distance données des électrodes, diminue lorsque la pression diminue, passe par un minimum puis augmente rapidement.

Dès qu'on dépasse une certaine tension critique, le gaz contenu dans les vacuoles s'ionise. Il en résulte des décharges qui peu à peu carbonisent la matière et la cellulose jusqu'à ce que la disruption s'ensuive. Les phénomènes qui se passent dans les vacuoles peuvent être expérimentalement reproduits en agrandissement. En effet, selon la loi de Paschen, le potentiel explosif d'un espace gazeux dépend du produit $p \cdot l$, de la pression p du gaz par la distance l des électrodes. Ainsi ce qui se passe dans une vacuole, dont l'épaisseur est de 0,12 mm et dont la pression est de 10 mm, est semblable, en principe du moins, aux phénomènes qui se passeront dans un tube à décharge de 120 mm de longueur et dans lequel régnera une pression de 0,01 mm. On peut encore agrandir ces phénomènes, tout en conservant leurs caractères, par le choix d'une tension convenable. C'est ce qui a été réalisé dans le tube à décharge monté sur la tribune. Ce tube a

1 mètre de long, et une tension de 2000 V est appliquée à ses électrodes. L'air qu'il contient est peu à peu évacué à l'aide d'une pompe à vide. Dès que la pression atteint une certaine valeur, l'étincelle apparaît sous forme d'une lueur continue. La pression continuant à baisser, l'aspect de l'étincelle change; des espaces lumineux striés apparaissent (lueur négative, colonne positive), puis la pression baissant encore, l'intensité de ces espaces diminue, puis tout phénomène lumineux cesse. Les mêmes phénomènes se reproduisent en sens inverse lorsqu'on rétablit la pression.

Ce sont donc des phénomènes de décharges électriques analogues à ceux produits dans le tube à décharge qui peu à peu altèrent l'isolant des câbles à matière soumise à une tension provoquant l'ionisation des vacuoles. Ces phénomènes carbonisent papier et matière ainsi que le montrent les figures 16 et 17.

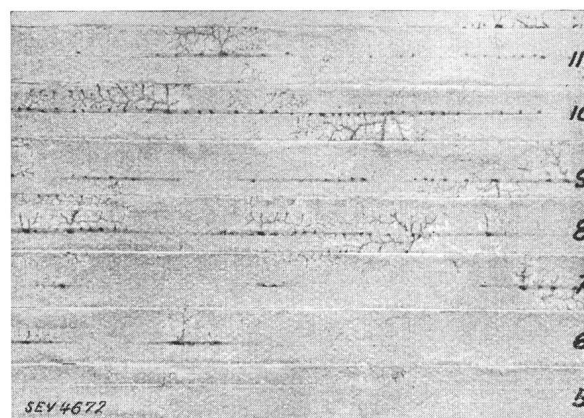
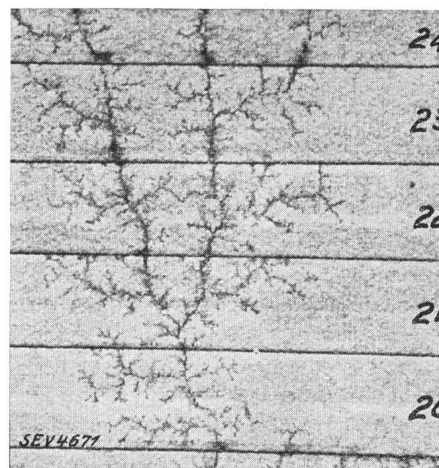


Fig. 16 et 17.

Papiers prélevés sur un câble ayant subi un essai de tension qui a déterminé une forte ionisation des vacuoles. Les décharges ont par places fortement carbonisé l'isolant.

Pour augmenter la valeur de l'isolant d'un câble à matière, il faut augmenter la valeur électrique des vacuoles ce qui peut se faire pratiquement en augmentant la pression des gaz qu'elles renferment.

La valeur des câbles du 2° groupe dépend de celle de l'huile ou de la matière imprégnante. Il faut par conséquent chercher à placer l'huile ou la matière dans les meilleures conditions pour qu'elles possèdent d'une part une rigidité élevée et que d'autre part elles soient stables. Pour montrer quelles conditions de principe il est indiqué de réaliser, au mieux des possibilités, les deux expériences suivantes ont été faites.

La première est représentée schématiquement par la fig. 18. Pour un écartement des sphères de 0,5 mm, le potentiel explosif fut respectivement de 5 kV, 10 kV et 13 kV pour l'huile, l'huile cloisonnée par un papier de 0,11 et l'huile cloisonnée par deux papiers de 0,05 mm. Cette expérience

montre donc l'heureuse influence du cloisonnement de l'huile par le papier imprégné.

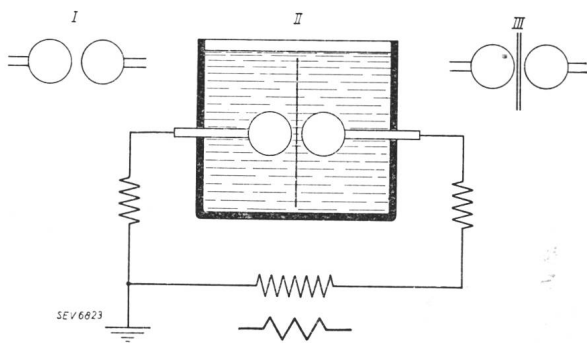


Fig. 18.

Schéma de l'expérience montrant l'influence du cloisonnement sur la rigidité diélectrique de l'huile. Ecartement des sphères 0,5 mm.

- I Huile sans cloisonnement. Percement à 5 kV.
- II Huile cloisonnée par un papier de 0,11 mm. Percement à 10 kV.
- III Huile cloisonnée par deux papiers de 0,05 mm. Percement à 13 kV.

La seconde expérience est représentée schématiquement par la figure 19. Dans chaque expérience, une différence de potentiel fut créée entre les sphères. Dans les expériences 1 et 2 cette différence fut celle qui amena le passage de

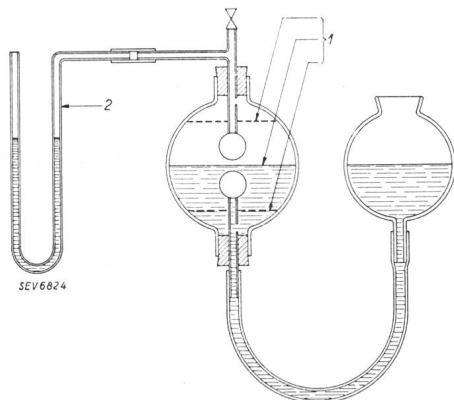


Fig. 19.

Schéma de l'expérience montrant la décomposition en gaz, de l'huile placée dans un champ électrique en série avec un gaz.
1 Niveau de l'huile. 2 Manomètre.

l'étincelle. Dans l'expérience 3 la différence fut la même que dans l'expérience 2; le claquage ne survint pas. Les indications du manomètre montrèrent que l'augmentation de pression fut minime dans le premier cas, très forte dans le deuxième et nulle dans le troisième. Il résulte de ces expériences que lorsque l'huile est placée en série avec un gaz, l'étincelle qui jaillit dans le gaz décompose l'huile qui se transforme rapidement en donnant de grandes quantités de gaz.

Il faut donc éviter que de l'air ne rentre dans un câble à huile pendant les opérations du montage et construire le câble à isolant comprimé de telle façon que la pression extérieure au câble puisse permettre les déformations nécessaires du câble pour qu'il ne se forme pas des vacuoles pendant les périodes de refroidissement.

Pour montrer la différence du degré de remplissage entre les câbles des 2 groupes, l'expérience schématisée par la figure 20 fut faite.

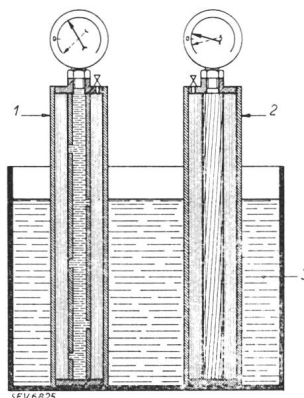


Fig. 20.

Schéma de l'expérience montrant la différence de remplissage entre un câble à huile (1) et un câble à matière (2).

3 Eau chaude, puis froide.

Lorsque les câbles s'échauffent, l'huile et la matière se dilatent conformément à leur coefficient de dilatation qui est à peu près le même. Le câble à huile étant plein, toute dilatation de l'huile provoque une forte augmentation de la pression, tandis que dans le câble à matière la pression reste pratiquement constante par suite de la présence de vacuoles dans lesquelles la matière provenant de l'augmentation du volume peut trouver place. Des phénomènes semblables mais inverses se produisent pendant le refroidissement. La pression dans le câble à huile baisse et atteint une valeur qui n'est qu'une petite fraction de la pression barométrique, tandis qu'elle ne baisse que peu dans le câble à matière.

Les essais des câbles électriques.

Par E. Foretay, Cossonay.

L'auteur donne un aperçu de la technique générale des câbles, et traite en particulier l'essai des matières premières, le contrôle de la fabrication, l'essai des câbles terminés en fabrique et après pose, ainsi que la recherche des défauts.

Es wird das gesamte Gebiet der Kabelmesstechnik skizziert, nämlich die Rohstoffprüfung, die Ueberwachung der Fabrikation, die Prüfung des fertigen Kabels in der Fabrik und nach der Verlegung und die Fehlerortsbestimmung.

Comme tout autre industrie, celle des câbles nécessite des essais qui portent:

- sur les matières premières,
- sur les produits en cours de fabrication,
- sur les produits terminés.

Il faut encore ajouter, comme dans l'industrie des machines qui seront installées à poste fixe: des essais après pose.

Nous allons donc examiner ces diverses sortes d'essais:

a) Essai des matières premières.

Les principales matières premières de l'industrie des câbles sont: le cuivre, le papier, les huiles et

masses isolantes, le plomb, et les revêtements protecteurs, papiers, jute, feuillets et leurs produits d'imprégnation.

Cuivre.

La qualité essentielle du cuivre est sa conductibilité électrique que l'on contrôle en général au pont double de Thomson qui permet de mesurer avec une précision de quelques 0/100 un échantillon de 50 cm à 1 m. Le cuivre utilisé étant toujours du cuivre électrolytique de haute qualité, l'analyse chimique n'est pas nécessaire, la présence éventuelle d'impuretés étant du reste décelée avec une très grande sensibilité par la mesure de conductibilité.