

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 44 (1953)

Heft: 12: Centenaire de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne

Artikel: Nouveaux matériaux isolants pour la technique des câbles

Autor: Goldschmidt, R.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059949>

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>

- [11] Holbrook, B. D. et J. T. Dixon: Load Rating Theory for Multi-Channel Amplifiers. *Bell. Syst. techn. J.* t. 18(1939), n° 4, octobre, p. 624...644.
- [12] Dudley, Homer: Remaking Speech. *J. Acoust. Soc. Amer.* t. 11(1939/40), n° 2, octobre, p. 169...177.
- [13] Potter, Ralph Kimbal, George A. Kopp et Harriet C. Green: *Visible Speech*. New York: Nostrand 1947.
- [14] Gabor, Dennis: Theory of Communication. *J. Instn. Electr. Engrs.* Part. III, t. 93(1946), n° 26, novembre, p. 429...457.
- [15] Gabor, Dennis: New Possibilities in Speech Transmission. *J. Instn. Electr. Engrs.* Part. III, t. 94(1947), n° 32, novembre, p. 369...390.
- [16] Gabor, Dennis: Recherches sur quelques problèmes de télécommunications et d'acoustique. *Onde électr.* t. 28 (1948), n° 260, novembre, p. 433...439.

Adresse de l'auteur:

Roger Dessoulaix, Ing., Professeur à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne, 45, avenue Vulliemin, Lausanne.

Nouveaux matériaux isolants pour la technique des câbles

Par R. Goldschmidt, Lausanne

621.211.9

De nouveaux matériaux isolants — spécialement le polyéthylène abrégé polythène (PT) et le chlorure de polyvinyle (PVC) — se sont largement introduits dans la technique de la fabrication des câbles et ont permis de résoudre d'intéressants problèmes techniques.

In der Technik der Kabelfabrikation haben sich neue Isolierstoffe, besonders das Polyäthylen, abgekürzt Polythen (PT), und das Polyvinylchlorid (PVC) weitgehend eingeführt. Dank ihnen konnten interessante technische Probleme gelöst werden.

1. Introduction

«Technique» ne s'entend plus sans «électrotechnique» et l'électrotechnique ne peut pas se concevoir sans l'élément le plus important de transmission, le câble. Passons brièvement en revue le développement que les nouveaux matériaux isolants ont permis d'accomplir dans ce domaine. Les câbles sont des conducteurs de courant électrique, isolés, qui, soit individuellement soit torsadés en groupes, sont entourés d'un manteau servant de protection physique, chimique et mécanique. Les câbles sont posés dans le sol, tirés dans des caniveaux et des tubes, fixés dans des puits, immergés dans des rivières, lacs et mers ou montés le long des murs ou sur des poteaux.

Les câbles servent à la transmission de signaux ou au transport d'énergie électrique. On distingue ainsi entre câbles pour courant faible et câbles pour courant fort avec les subdivisions câbles téléphoniques et haute fréquence, respectivement câbles à basse et haute tension.

L'industrie des câbles forme dans tous les pays industrialisés un secteur important de l'activité industrielle. Ses débuts ont été inspirés par les méthodes de fabrication appliquées dans l'industrie des textiles. Il y a plus d'un siècle que différents inventeurs ont proposé d'entourer des fils métalliques avec des matières isolantes, de les poser ainsi dans le sol et de les utiliser pour le transport du courant électrique. En principe, rien n'a été changé à cette idée. Comme matériel conducteur on utilise presque exclusivement le cuivre qui réunit de bonnes qualités électriques et mécaniques avec un prix abordable. Il n'a été remplacé par l'aluminium qu'en période de pénurie du cuivre. La matière isolante était et est encore essentiellement le papier. Il est utilisé séché et aussi peu serré que possible pour les câbles téléphoniques, imprégné d'huile ou de compound pour les câbles à courant fort. A côté du papier, le caoutchouc et la guttapercha, la soie et le coton ou l'émail à base d'huile ont été et sont utilisés comme matières isolantes. Comme manteau protecteur, on met normalement un tube de plomb protégé contre la corrosion par une couche de jute ou par un autre textile, imprégné de bitume. Une armure en ruban de fer asphalté ou en fils profilés zingués sert de protection mécanique.

Si le principe de la construction des câbles est donc resté essentiellement le même, le développement technique, soit quantitatif soit qualitatif a été très important. Machines et installations ont été considérablement agrandies et améliorées, les modes de contrôle des matières premières et des produits finis perfectionnés, la précision et la régularité de la fabrication sensiblement accrues. Mais en général on doit dire que l'industrie des câbles est une industrie conservatrice. C'est seulement depuis une dizaine d'années qu'une transformation importante s'est accomplie. On doit chercher l'origine de ce changement dans les possibilités créées par les nouveaux matériaux artificiels, essentiellement les matières plastiques. On avait déjà, à plusieurs reprises, essayé d'utiliser des matières artificielles dans la technique des câbles, tout spécialement des câbles sous-marins. Ainsi la Guttagentzsch et la Paragutta (utilisée pour le câble Key West-Havanna) ont remplacé la Guttapercha. Mais soit leur prix trop élevé, soit leurs caractéristiques trop spéciales ont empêché leur utilisation sur une large échelle. Mais aujourd'hui une très importante industrie chimique produit en masse des matières artificielles remplissant des conditions techniques et économiques intéressantes.

Dans cet aperçu, les qualités de ces matériaux vont être résumées en tenant compte des exigences que pose la construction de différents types de câbles. Des exemples de câbles exécutés montreront les réalisations que la technique des câbles a pu accomplir ces dernières années.

2. Les qualités diélectriques de la matière

Les matières isolantes sont caractérisées par les qualités diélectriques suivantes:

Résistance d'isolement
Constante diélectrique
Angle de pertes diélectriques
Rigidité diélectrique

La première de ces qualités est mesurée avec du courant continu, les autres normalement avec du courant alternatif. Toutes ces qualités dépendent fortement de la température. La cause en est essentiellement le changement de la viscosité de ces matériaux avec la température. Les matières isolantes sont normalement des corps amorphes. La liaison

entre les molécules n'est pas si rigide qu'entre les atomes d'un réseau cristallin et change donc plus facilement avec la température. Sans vouloir discuter en détail les théories, souvent compliquées du comportement des matières diélectriques, ne retenons que deux causes qui déterminent largement le comportement des corps diélectriques: les ions libres et les dipôles. Les ions libres sont des porteurs de charges électriques et déterminent par leur nombre par unité de volume et leur mobilité la conductivité resp. la valeur réciproque de la résistivité du matériel. La mobilité des ions est de son côté déterminée par la viscosité du matériel; la fonction entre cette dernière et la température étant connue, on en déduit pour la relation entre la résistivité ρ d'une matière isolante et la température θ , la fonction logarithmique

$$\ln \frac{\rho_1}{\rho_2} = \theta_2 - \theta_1$$

ou ρ_1 résistivité à température θ_1
 ρ_2 résistivité à température θ_2

Cette relation est confirmée d'une manière très satisfaisante par les mesures (fig. 1). Retenons donc qu'avec la température, la résistivité électrique des matières isolantes diminue tandis qu'elle augmente

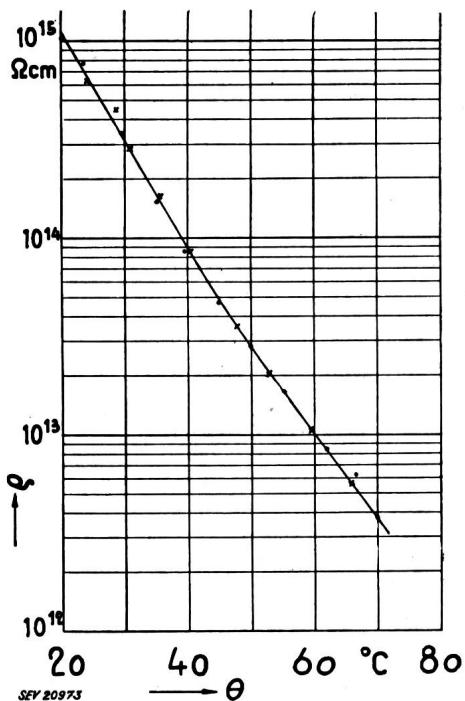


Fig. 1
 Isolation en fonction de la température d'un PVC
 plastifié de haute résistivité
 ρ résistivité; θ température

pour les métaux. Notons encore que la résistivité électrique des semi-conducteurs diminue avec la température mais les causes de ce comportement sont tout autre que pour les matières isolantes.

Si les ions libres contenus dans une matière isolante déterminent sa résistivité électrique, les dipôles, d'autre part, fixent son comportement diélectrique, c'est-à-dire donnent à la matière sa constante diélectrique ϵ . Cela veut dire qu'un corps

placé entre deux plaques métalliques dans un champ électrique donné peut accumuler davantage de charges électriques que l'espace vide. Les dipôles — donc des charges de signes opposés tenues dans l'espace par des forces intermoléculaires à des distances fixes — sont soit formés par l'influence du champ électrique extérieur, soit sont causés par la constitution de la molécule elle-même. On parle ainsi des matières polarisables — soit à l'intérieur de l'atome, soit à l'intérieur de la molécule et des matières dipolaires. La polarisabilité des atomes et molécules est, jusqu'aux plus hautes fréquences techniques, indépendante de la fréquence — ses fréquences cri-

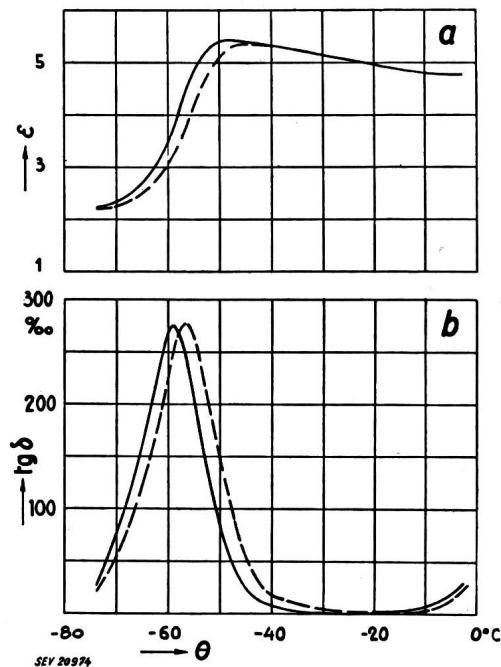


Fig. 2
 Constante diélectrique (ϵ) et angle de pertes ($\text{tg} \delta$) à basse température du plastifiant Di-2-éthyl-hexyl-phthalate
 — $f = 800$ Hz; - - - $f = 1600$ Hz

tiques se placent dans les domaines de l'optique et de l'infrarouge. Elle dépend également peu de la température, donc de l'agitation thermique. La constante diélectrique est ainsi presque proportionnelle à la densité du matériel et diminue comme celle-ci proportionnellement à la température. La constante diélectrique des matières dipolaires est par contre fortement variable avec la température. C'est également la variation de la viscosité avec la température qui cause ce comportement parce que les dipôles, voulant s'orienter dans la direction du champ extérieur par un mouvement tournant, peuvent faire ce déplacement d'autant plus facilement que la matière est moins visqueuse, donc la température plus élevée. De même, la constante diélectrique change fortement avec la fréquence car le mouvement oscillant des dipôles dans un champ électrique alternatif est freiné par la viscosité du matériel. Cette résistance de la matière au mouvement des dipôles crée des pertes par frottement, pertes qui se traduisent par ce qu'on appelle les pertes diélectriques. Ces pertes sont exprimées par l'angle de pertes, donc par le rapport entre l'énergie dissipée et l'énergie déwattée (retenons que l'angle de pertes est

l'angle complémentaire de l'angle de phase). L'angle de pertes des matières dipolaires est caractérisé par un maximum très prononcé à une température donnée (à fréquence constante) ou à une fréquence donnée (à température constante) (fig. 2). À l'angle de pertes dû aux dipôles s'ajoute l'angle de pertes δ_c causé par la conductivité qui se calcule par la relation:

$$\operatorname{tg} \delta_c = \frac{18 \cdot 10^9}{\epsilon \varrho f}$$

δ_c angle de pertes; ϵ constante diélectrique; ϱ résistivité électrique (en Ωcm); f fréquence (en Hz).

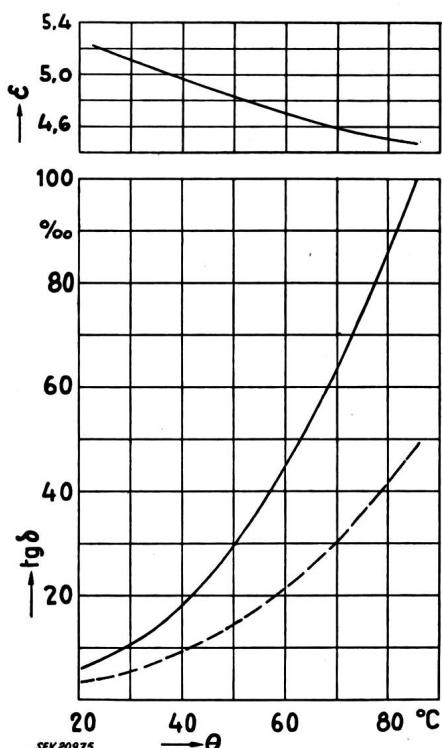


Fig. 3

Constante diélectrique (ϵ) et angle de pertes ($\operatorname{tg} \delta$) en fonction de la température du plastifiant dioctylphthalate
 $f = 800 \text{ Hz}$; $\text{--- } f = 1600 \text{ Hz}$

Cette partie de l'angle de pertes est donc inversement proportionnelle à la fréquence et dépend de la température comme la conductivité $\kappa = \frac{1}{\varrho}$ (fig. 3).

La rigidité diélectrique d'une matière isolante est la qualité la moins bien définie malgré l'exécution de nombreux essais et d'études théoriques. La difficulté d'obtenir dans ce domaine des résultats nets et reproductibles réside dans le fait que la rigidité diélectrique est fortement conditionnée par les moindres irrégularités dans la constitution de la matière, qu'elles soient d'ordre atomique, moléculaire ou microscopique, ces dernières étant sous forme d'impuretés ou de cavités. Ces irrégularités causent aussi la forte dépendance de la rigidité diélectrique du temps et de la température. Ainsi, une matière diélectrique résiste beaucoup mieux à une tension de choc qu'à une tension alternative de longue durée – tout spécialement si cette dernière

alterne à haute fréquence. On distingue en général deux causes qui limitent la rigidité diélectrique d'un matériel: l'effet thermique et l'effet électrique. Le premier prend naissance là où il y a une irrégularité dans le matériel, donc à un point électriquement faible. Le matériel, ne résistant pas en ce point au champ électrique, une ionisation a lieu, créant de la chaleur qui, ne pouvant pas se dissiper assez rapidement, fait augmenter localement la température et affaiblit électriquement de plus en plus le matériel et mène ainsi au claquage.

L'effet électrique dépend de la structure moléculaire de la matière. Pour un cristal idéal on calcule théoriquement qu'il faudrait un champ électrique de 1 MV/mm pour détruire le réseau cristallin. Mais la structure compliquée des matières isolantes utilisées dans la technique rend difficile l'estimation de la valeur réelle à laquelle cet effet doit se produire. Ainsi, tenant compte de l'incertitude dans la détermination de la rigidité électrique, une matière isolante n'est soumise, en service, qu'à une fraction du champ qui mène au claquage.

3. Caractéristiques des câbles

Les caractéristiques d'un câble sont déterminées par ses dimensions et les propriétés électriques de ses matériaux conducteurs et isolants. Dans certains cas, on utilise également pour la construction des câbles des matières magnétiques, soit pour augmenter l'inductivité des conducteurs (câble Krarup), soit comme âme de conducteurs cuivrés à la surface. Les qualités magnétiques de l'armure en acier, guipée autour du manteau de plomb, servent à la protection des circuits contenus dans un câble téléphonique contre l'effet nuisible des champs perturbateurs extérieurs. Ces armures entourant des câbles à courant fort ont pour effet d'améliorer l'amplitude et la phase des courants circulant, en cas de court-circuit, dans le manteau de plomb. Ces courants diminuent le champ magnétique lié au courant de court-circuit et rendent ainsi moins nuisible son action sur des circuits à courant faible passant à proximité.

Un câble en service est caractérisé, en plus des constantes connues du câble, soit:

la résistance,
l'inductivité,
la capacité,
la conductance

par encore deux autres caractéristiques électriques soit:

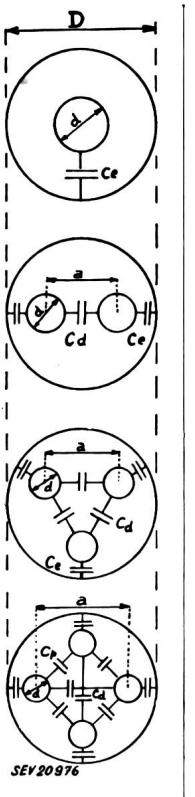
l'isolement
et la résistance au claquage.

D'autres qualités importantes d'un câble sont: la charge électrique admissible, la résistance mécanique, la flexibilité, la résistance à la corrosion, la longévité. Considérons ici seulement les qualités électriques.

L'inductivité, en l'absence de matières magnétiques, est essentiellement déterminée par les dimensions du câble. Elle ne dépend des matières utilisées qu'à cause de l'effet pelliculaire qui se produit dans le métal des conducteurs et des écrans si la fréquence augmente. Cet effet qui se produit dans une

certaine bande de fréquence (10^5 à 10^8 Hz) pour la plupart des câbles coaxiaux, diminue l'inductivité d'environ 20 %.

La résistance est déterminée par les dimensions du câble et la conductivité du matériel utilisé pour les conducteurs. Elle augmente avec la fréquence à cause de l'effet pelliculaire. Aux basses fréquences, cette augmentation est proportionnelle au carré de la fréquence; aux hautes fréquences la résistance est proportionnelle à la racine carrée de la fréquence.



$$C_s = C_e$$

$$C_s = C_d + \frac{C_e}{2}$$

$$C_{s, \text{phase}} = 3C_d + C_e$$

$$C_{s, \text{base}} = C_d + C_p + \frac{C_e}{2}$$

$$C_{s, \text{phantome}} = 4C_p + C_e$$

$$C_s = \epsilon \frac{24,2}{\lg \frac{D}{d}} \text{ pF/m}$$

$$C_s \approx \epsilon \frac{27,8}{\operatorname{arcosh} \frac{a}{d} \frac{D^2 - (a^2 - d^2)}{D^2 + (a^2 + d^2)}} \text{ pF/m}$$

$$C_s \approx \epsilon \frac{12,1}{\lg \frac{2a}{d} \frac{D^2 - a^2}{D^2 + a^2}} \text{ pF/m}$$

$$C_e \approx \epsilon \frac{24,2}{\left[\lg \frac{D^2}{2ad} \right] - 0,9 \left(\frac{a}{D} \right)^4 - 0,4 \left(\frac{d}{D} \right)^2 - 0,1 \left(\frac{d}{a} \right)^2} \text{ pF/m}$$

$$C_{s, \text{phase}} \approx \epsilon \frac{24,2}{\lg \frac{2a}{d} \frac{\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{D}{a} - \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{a}{D} \right)}{\sqrt{\frac{3}{4} \left(\frac{D}{a} \right)^2 + 1 + \frac{4}{3} \left(\frac{a}{D} \right)^2}}} \approx \epsilon \frac{24,2}{\left[\lg \frac{2a}{d} \right] - 0,853 \left(\frac{d}{a} \right)^2} \text{ pF/m}$$

$$C_e \approx \epsilon \frac{24,2}{\lg \frac{1}{3} \cdot \frac{2a}{\sqrt{3}d} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{D}{a} - \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{a}{D} \right) \left[\frac{3}{4} \left(\frac{D}{a} \right)^2 + 1 + \frac{4}{3} \left(\frac{a}{D} \right)^2 \right]} \approx \epsilon \frac{8,07}{\lg \frac{D}{\sqrt[3]{4a^2d}}} \text{ pF/m}$$

$$C_{s, \text{base}} \approx \epsilon \frac{12,1}{\left[\lg \frac{2a}{d} \cdot \frac{D^2 - a^2}{D^2 + a^2} \right] - 0,5 \left(\frac{d}{a} \right)^4 + 0,9 \left(\frac{d}{D} \right)^2} \text{ pF/m}$$

$$C_{s, \text{phantome}} \approx \epsilon \frac{24,2}{\lg \frac{a}{d} \cdot \frac{D^4 - a^4}{D^4 + a^4}} \text{ pF/m}$$

$$C_e \approx \epsilon \frac{24,2}{\left[\lg \frac{D^4}{4da^3} \right] - 0,5 \left(\frac{a}{D} \right)^4 + \left(\frac{d}{D} \right)^2 - 0,9 \left(\frac{d}{a} \right)^2} \text{ pF/m}$$

Les autres caractéristiques électriques d'un câble, la capacité, la conductance, l'isolement et la résistance au claquage, sont déterminées par les dimensions et les propriétés de la matière isolante. On mesure l'isolement au courant continu; les autres caractéristiques normalement au courant alternatif. Il est d'usage de remplacer la conductance G par l'angle de pertes selon la relation:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{G}{\omega C} \quad (\omega = 2\pi f)$$

Cette valeur varie moins avec la fréquence que la grandeur G et est en plus indépendante des dimensions du câble; on ramène donc les caractéristiques du câble aux caractéristiques de la matière isolante.

Dans la table en fig. 4, on trouve un résumé de formules permettant de calculer les capacités de différents types de câbles. La résistance au claquage d'un câble — spécialement importante pour les câbles à haute tension — est la grandeur qu'on a le plus de peine à fixer. D'une part, les valeurs caractéristiques de la rigidité électrique d'une matière isolante sont déjà difficiles à déterminer et, d'autre part, la configuration des sections des conducteurs

contenus dans un câble ne permet pas toujours d'indiquer la région la plus faible de l'isolation, donc la région où la matière isolante est soumise au plus fort champ électrique. C'est le cas tout spécialement des câbles à isolation ceinture où 3 ou 4 conducteurs se trouvent sous un écran commun. Les conditions sont plus nettes pour les câbles à un conducteur ou pour les câbles à blindage *Hochstädtter*, donc ayant un écran métallique sur l'isolation de chaque conducteur. Le champ radial entre les deux conducteurs cylindriques (conducteur et écran) est le plus

Fig. 4
Formules donnant les capacités des câbles à 1, 2, 3 ou 4 conducteurs

fort à la surface du conducteur, pour autant que le diélectrique soit homogène.

Mais cette condition n'est souvent pas remplie, soit que l'isolation est composée de couches de caractéristiques différentes, soit que la matière diélectrique a une structure non homogène, soit que la chaleur, développée par le courant dans le conducteur et s'écoulant à travers l'isolation, y crée des températures différentes et par cela des caractéristiques diélectriques différentes. Il peut même arriver que dans des câbles travaillant sous tension continue, où donc la résistivité de l'isolation règle la répartition de la tension, l'intensité du champ au lieu de diminuer augmente de l'intérieur vers l'extérieur, donc du conducteur vers l'écran, à cause de la relation logarithmique entre résistivité et température. La discussion est donc encore ouverte, si l'on doit choisir le rapport des diamètres de l'écran et du conducteur tel que la théorie le prescrit, donc égal à $e = 2,7181$ pour obtenir un gradient minimum.

4. Nouvelles matières isolantes

Les nouvelles matières isolantes qui sont utilisées pour la fabrication des câbles sont essentiellement les suivantes:

Le polystyrène (Trolitul, Styroflex) ;
 Le polyéthylène (abrégé polythène) (Alkathène, Alathon, Rulan) ;
 Le chlorure de polyvinyle [Soflex (Suisse), Mipolam (Allemagne), Korseal (USA), Welvic (Gde-Bretagne)] ;
 Les caoutchoucs artificiels (Buna, GRS, Perbuna, GRA, Hycar, Néoprène) ;
 Les polyamides (Nylon, Perlon, Grilon, Rilsan) ;
 Les polyéthylènes halogénés (Teflon, Kel-F) ;
 Les silicones (Silastic) ;
 Les résines éthoxyline (Araldite B, Araldite D, Epon).

Chacun de ces noms désigne un groupe de matériaux (les noms donnés entre parenthèses sont des dénominations commerciales) encore très fortement différents les uns des autres, soit à cause de leur degré de polymérisation, soit par le mélange avec d'autres substances. Les matériaux énumérés ci-dessus sont des matériaux artificiels organiques. On utilise également pour la fabrication des câbles spéciaux des matières céramiques, des matériaux à base d'amiante ou des fibres de verre. Ces matériaux sont seulement mentionnés ici ainsi que les nouveaux vernis isolants, obtenus à l'aide des matières artificielles mentionnées plus haut et qui, dans l'industrie des fils émaillés, remplacent de plus en plus les vernis à base d'huile, de résine d'urée ou de résine phénol-formol.

La matière artificielle qui a été la première utilisée à l'échelle industrielle pour la fabrication des câbles était le polystyrène. Déjà en 1931, on avait proposé de l'utiliser pour l'isolation des câbles téléphoniques à cause de ses excellentes qualités diélectriques. Mais, amélioré encore dans ses qualités mécaniques en soumettant les rubans ou fils de ce matériel lors du boudinage à une forte traction qui les allonge et donne aux molécules une direction préférée, on a utilisé ce matériel, nommé styroflex, en premier lieu pour la fabrication des câbles coaxiaux pour la télévision. L'inconvénient du polystyrène est sa faible résistance à la chaleur; déjà à 65 °C il s'amollit.

Sur ce point, le polythène lui est supérieur, et ne s'amollit qu'au-dessus de 100 °C, tout en possédant les mêmes excellentes qualités diélectriques. Sans les câbles isolés au polythène, le développement du radar et de la télévision n'aurait pas été possible.

Parallèlement au développement du polystyrène et du polythène se faisait le développement du chlorure de polyvinyle, connu dans les différents pays sous différentes désignations, mais aujourd'hui brièvement désigné par PVC (ou CPV en France). Alors que le polystyrène a été développé en Allemagne, le polythène en Angleterre, le développement du PVC se faisait parallèlement dans différents pays et l'industrie chimique suisse a participé avec succès à ces travaux, rendant ainsi un sérieux service à l'industrie suisse des câbles pendant la période de pénurie de la deuxième guerre mondiale. Le PVC a été développé dans l'idée de remplacer le caoutchouc dans l'isolation des fils d'installation et des câbles à basse tension. Ce but a été pleinement atteint; ses bonnes qualités mécaniques, sa résistance contre les intempéries, ses couleurs claires et vives qui facilitent le montage, l'ont fait beaucoup apprécier et on l'utilise soit comme iso-

lant des conducteurs, soit comme manteau protecteur où il remplace le plomb.

Le PVC tel qu'il est utilisé dans la technique est un mélange de résine et de plastifiants. Seul un tel mélange donne au matériel, avec les bonnes qualités mentionnées ci-dessus, l'élasticité nécessaire. Les plastifiants sont des liquides organiques, possédant des qualités physiques et électriques très différentes et réagissant et se mélangeant très différemment avec la résine PVC. Ils influencent ainsi sensiblement les caractéristiques du matériel, soit ses valeurs électriques, soit son comportement mécanique à basse et haute température. Le développement des masses PVC était donc en grande partie basé sur l'étude des qualités des plastifiants (voir fig. 2 et 3) et de leur comportement vis-à-vis de la résine.

Les caoutchoucs artificiels doivent être divisés en deux groupes, dont l'un possède de bonnes qualités diélectriques (Buna, GRS), l'autre d'excellentes qualités mécaniques (Néoprène, GRA, Hycar). Ainsi, les uns sont utilisés pour l'isolation des fils, les autres comme manteau de protection, tout spécialement en USA, où les caoutchoucs artificiels se sont introduits dans l'industrie des câbles lors de la dernière guerre, alors que le caoutchouc naturel manquait complètement. Ayant donné pleine satisfaction au point de vue technique et économique, il a gardé la position gagnée même lorsque le caoutchouc naturel fut de nouveau livrable. On utilise le caoutchouc artificiel pour la fabrication des câbles travaillant sous des tensions jusqu'à 10 kV (tension de phase). Du fait que les câbles isolés au caoutchouc étaient toujours beaucoup plus utilisés en USA qu'en Europe — on monte beaucoup de câbles sur des poteaux — les câbles isolés au caoutchouc artificiel sont utilisés aujourd'hui à une très large échelle. Ils possèdent une excellente résistance aux intempéries et une longévité remarquable.

Les polyamides, donc le groupe des nylons, sont utilisés comme protection extérieure des câbles à cause de leurs excellentes qualités mécaniques. Pouvant les boudiner en couches très minces, on en entoure d'autres matériaux isolants, résistant moins aux effets mécaniques, en particulier au frottement. Les qualités diélectriques du nylon sont moins bonnes.

Les polythènes halogénés, donc spécialement le polymère du tetrafluoréthylène (Teflon) et le polymère du monochlorotrifluoroéthylène (Kel-F) possèdent d'excellentes caractéristiques électriques et se distinguent par leur résistance à la température ne fondant qu'au-dessus de 250, resp. 200 °C. Leur utilisation se heurte encore à leur prix élevé.

Partant d'un principe tout neuf, en remplaçant dans les hydrocarbures les atomes de carbone par ceux de silice, les silicones ont été développés. On les connaît comme huiles, graisses ou matières plastiques (semblables au caoutchouc). Eux aussi ont comme caractéristique spéciale de résister aux hautes températures. Leur utilisation, tout spécialement comme isolant pour fils servant au bobinage des moteurs, augmente de plus en plus. Là également, le prix reste encore un facteur décisif.

Caractéristiques diélectriques de quelques matières synthétiques

Tableau I

	Constante diélectrique à 50 Hz et 20 °C	Angle de pertes à 50 Hz et 20 °C %	Isolation Ωcm à 20 °C	Rigidité diélectrique à 50 Hz et 20 °C kV/mm
Polystyrène	2,5...2,6	≈ 0,3	≈ 10 ¹⁷	40...60
Polyéthylène	2,3	≈ 0,3	≈ 10 ¹⁷	40...60
Chlorure de polyvinyle (plastifié)				
pour isolation électrique	4...5,5	≈ 100	10 ¹² ...10 ¹⁵	40...60
pour protection mécanique	5...6,5	≈ 100	10 ¹⁰ ...10 ¹²	—
Caoutchouc synthétique (vulcanisé)				
pour isolation électrique	3,0...5	3...30	≈ 10 ¹⁵	≈ 25
pour protection mécanique	10...20	200...300	10 ⁸ ...10 ¹²	≈ 5
Nylon	3,0...5	20...30	≈ 10 ¹⁴	≈ 15
Teflon	2,0	≈ 0,5	≈ 10 ¹⁶	15...20
Silastic	5,6...9,8	5...20	≈ 10 ¹⁴	15...20
Araldite B durcie	3,7	≈ 9	≈ 10 ¹⁶	—
Araldite D durcie	4,5	≈ 60	≈ 10 ¹³	—

A côté de ces matériaux plus ou moins plastiques, certaines résines durcissables se sont assuré également une place dans l'industrie des câbles.

On s'en sert pour le remplissage des accessoires de câbles, tels que boîtes d'extrémité et de jonction ou isolateurs de traversée. Ce sont des résines éthoxyline, résultat des travaux de pionnier de la Ciba et connues sous le nom d'«Araldite». Les araldites se distinguent par une excellente rigidité diélectrique et une extraordinaire adhérence aux matériaux métalliques ou non métalliques. En utilisant l'araldite comme masse de coulage on évite les interstices dangereux permettant des décharges entre parties métalliques sous tension et celles mises à la terre. L'araldite est livré comme araldite B durcissant sous un apport de chaleur et comme araldite D durcissant à température ambiante. Le durcissement se fait, dans l'un ou l'autre cas, par addition d'un durcisseur. La quantité de durcisseur qu'on ajoute détermine la durée de la période de durcissement, mais la chaleur dégagée par la réaction entre la résine et le durcisseur oblige de ne pas trop raccourcir ce temps.

On trouve dans les tables ci-jointes quelques chiffres caractérisant les matériaux dont on a parlé ci-dessus (tableau I).

5. Nouvelles constructions de câbles

Pour le développement technique des câbles, les nouveaux matériaux isolants ont eu la plus grande importance dans le domaine de la haute fréquence.

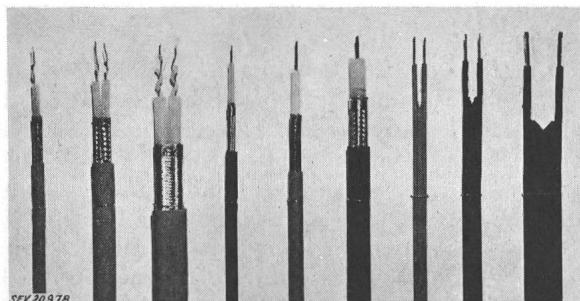


Fig. 5
Câbles d'antennes

Tout spécialement, le polythène a permis des constructions auparavant impossibles.

On peut classer les câbles haute fréquence (fig. 5) en deux groupes, faisant la distinction entre câbles coaxiaux et câbles symétriques. L'isolation est ou pleine ou creuse. L'isolation creuse peut se faire de différentes manières (fig. 6) en utilisant — pour distancer les deux conducteurs coaxiaux — des disques, des fils enroulés en spirale, des tubes munis de saillies ou une combinaison de ces éléments.

Les câbles coaxiaux sont caractérisés par leur impédance et leur atténuation. Pour l'impédance, les valeurs 50 et 100 Ω, 60 et 120 Ω ou 75 et 150 Ω sont plus ou moins normalisées. A chaque impédance correspond, pour une constante diélectrique donnée,

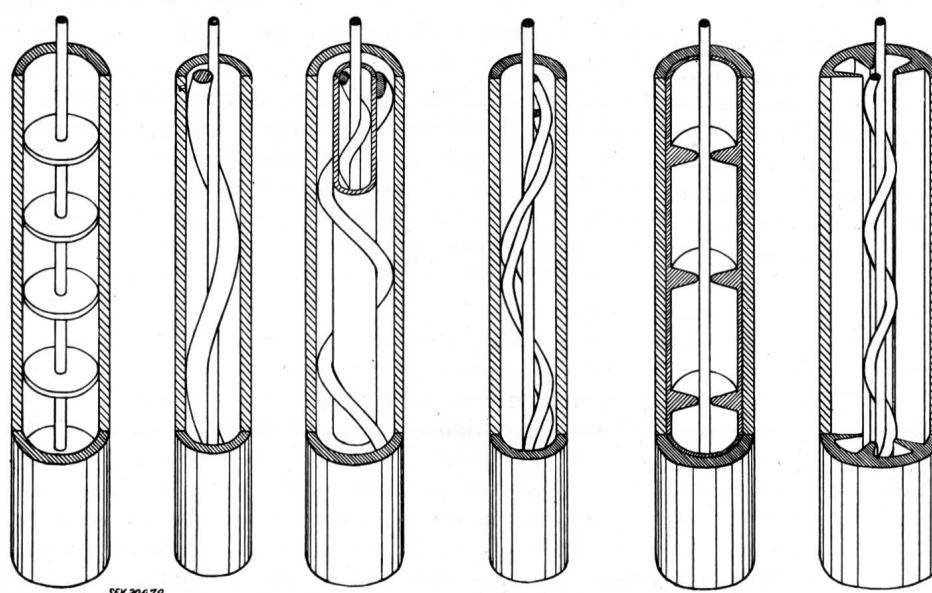


Fig. 6
Dessins schématiques de quelques constructions de câbles coaxiaux

un rapport des diamètres des conducteurs intérieurs et extérieurs. Les dimensions absolues des conducteurs, et avec cela du câble, sont alors fixées par l'atténuation exigée. Dans le diagramme (fig. 7 et 8) on a démontré graphiquement ces relations. Les valeurs pour des câbles à isolation pleine (poly-

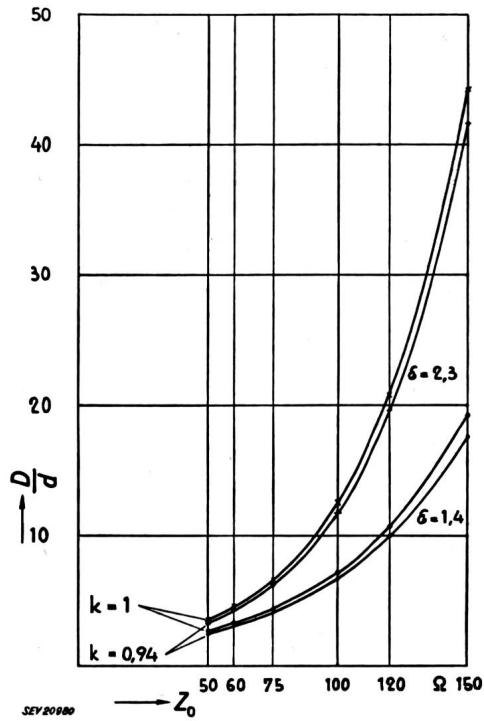


Fig. 7
Câbles coaxiaux

Rapport des diamètres des conducteurs et impédances caractéristiques

Z_0 impédance caractéristique
 D diamètre intérieur du conducteur extérieur
 d diamètre du conducteur intérieur
 $\epsilon = 2,3$ isolation PT pleine
 $\epsilon = 1,4$ isolation PT creuse
 $k = 1,0$ conducteur intérieur plein
 $k = 0,94$ conducteur intérieur câblé

thène, $\epsilon = 2,3$) et à isolation creuse y figurent; ces dernières sont calculées avec une constante diélectrique de $\epsilon = 1,4$. Les câbles coaxiaux servent à la transmission de la téléphonie à ondes porteuses et de la télévision à grande distance. Câblés en faisceau de quatre, ils font partie, en commun avec d'autres circuits téléphoniques isolés normalement au papier, d'un câble muni d'un manteau de plomb. D'autres types de ces câbles sont utilisés comme câbles d'antennes ou pour la liaison des installations et appareils travaillant à haute fréquence (fig. 9). Dans ce cas, le conducteur extérieur est entouré d'un manteau en PT ou en PVC. En utilisant le PVC, il est nécessaire d'éviter une migration du plastifiant contenu dans le PVC du manteau et dans le PT de l'isolation. En choisissant un plastifiant de constitution chimique appropriée et une construction adéquate, on peut suffire à cette condition.

Pour les câbles symétriques pour la haute fréquence, on distingue trois formes d'exécution, soit:

Conducteurs parallèles sans écran;
Conducteurs parallèles avec écran;
Conducteurs câblés (normalement sous écran).

Les conducteurs parallèles sans ou avec écran sont utilisés en premier lieu pour des antennes en

forme de dipôle destinées à la réception de la télévision ou de la radio à modulation de fréquence. Alors que les câbles à ruban, durant le développe-

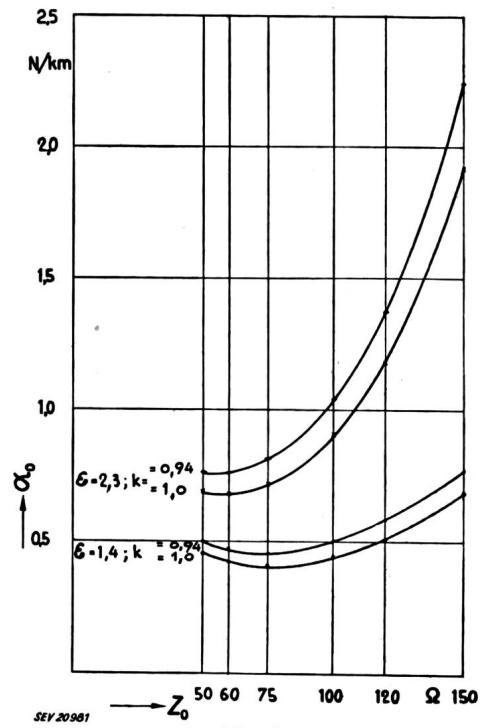


Fig. 8

Câbles coaxiaux
Atténuation de référence α_r

$$\alpha_r = \alpha_0 \frac{\sqrt{f/f_0}}{D/D_0} \text{ N/km}$$

Z_0 impédance caractéristique
 α_r atténuation due à la résistance des conducteurs
 f fréquence (MHz)
 f_0 fréquence de référence (1 MHz)
 D Diamètre intérieur du conducteur extérieur (mm) (ce conducteur est constitué par une gaine tressée)
 D_0 Diamètre de référence (10 mm)
 $\epsilon = 2,3$ isolation polythène pleine
 $\epsilon = 1,4$ isolation polythène creuse
 $k = 1,0$ conducteur intérieur plein
 $k = 0,94$ conducteur intérieur câblé

ment prodigieux de la télévision en USA (on a construit presque 20 millions d'antennes en 5 années), dominaient nettement le marché, il semble qu'ils seront de plus en plus remplacés par des câbles à conducteurs parallèles sous écran

qui assurent une meilleure protection contre les perturbations. Il y a encore les câbles tubulaires (fig. 10) qui permettent d'éviter certains inconvénients du câble ruban, tout spécialement la variation de ses caractéristiques avec les conditions climatiques.

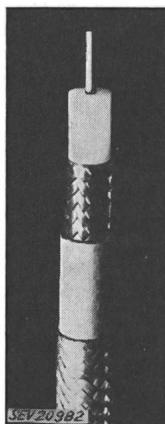


Fig. 9
Câble coaxial à isolation polythène muni d'une armure en fils d'acier
(type RG 18 U)

Les conducteurs câblés sont normalement encore entourés d'une couche de polythène pour donner au câble une forme cylindrique, autour de laquelle

on peut mettre l'écran muni d'un manteau isolant de protection.

Dans le domaine des câbles téléphoniques, les nouvelles matières isolantes se sont spécialement introduites pour les câbles à ondes porteuses (fig. 11). On isole les fils avec une couche de poly-

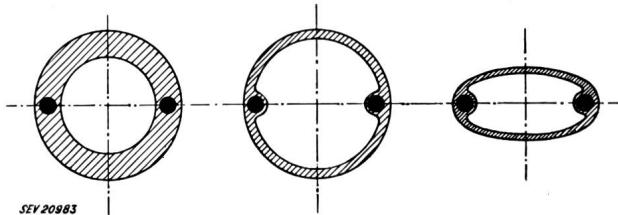


Fig. 10

Dessins schématiques de quelques exécutions de câbles tubulaires

thène. La constante diélectrique ($\epsilon = 2,3$) est plus élevée que celle d'un câble isolé au papier à espace-ment d'air ($\epsilon = 1,5$), mais l'angle de pertes est plus petit. Il est nécessaire de dimensionner ces câbles un peu plus fortement pour obtenir la même atténuation kilométrique mais on gagne d'autre part sur les dimensions et sur le poids en remplaçant le manteau de plomb, l'armure en jute et l'éventuelle armure en acier par un mince écran métallique entouré d'un manteau de protection en PVC. De tels câbles pour ondes porteuses sont composés

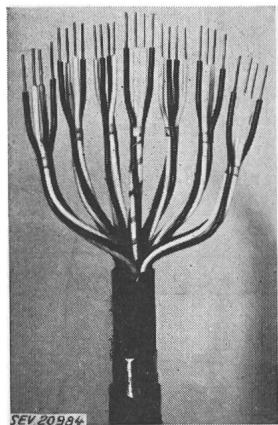
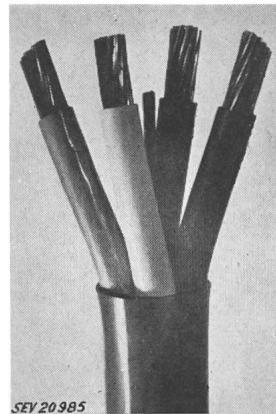


Fig. 11
Câble téléphonique à isolation polythène pour la transmission d'ondes porteuses
(7×4×1,3 mm)

d'unités câblées en quarte, c'est-à-dire de quatre conducteurs câblés ensemble.

Les câbles, à isolation au polythène, câblés en paires (2 conducteurs câblés ensemble) se sont introduits comme câbles de liaison (1 ou 6 ou 12 paires) entre les extrémités et les appareils terminaux des lignes à ondes porteuses, comme câbles de transmission pour la Rediffusion (3 paires) et comme câbles microphoniques, ces derniers munis d'un écran semi-conducteur antiparasite. Les câbles de campagne, protégés par un mince manteau en nylon pour leur donner une haute résistance à l'abrasion, sont de construction analogue. Dans ce groupe de câbles mentionnons encore les fils de montage à isolation thermoplastiques multicolore et les câbles téléphoniques, utilisant comme matière isolante un polystyrène spongieux, dont la constante diélectrique apparente n'est plus que $\epsilon = 1,2$. Les câbles à basse tension (jusqu'à 1 kV de tension de service) sont de plus en plus isolés au PVC qui remplace ainsi le caoutchouc ou le papier imprégné sous manteau de plomb. Leurs dimensions sont normalisées par des règles de l'ASE. Contrairement à l'isolation au caoutchouc où il fallait utiliser des conducteurs étamés, le cuivre étant attaqué par le soufre con-

tenu dans le caoutchouc, on peut, pour les câbles à isolation PVC, utiliser le cuivre nu. Chaque conducteur est donc entouré d'un manteau isolant, de couleur choisie, l'ensemble est câblé et mis sous un manteau en PVC lui donnant une section circulaire (fig. 12).



Les câbles à haute tension sont aujourd'hui normalement isolés au papier imprégné au compound ou à l'huile. Mais là aussi, les matières thermoplastiques, tout spécialement le polythène, commencent à s'introduire comme matière isolante. Les câbles

Fig. 12
Câble à basse tension à isolation et manteau en chlorure de polyvinyle
(4×95 mm²)

à isolation polythène sont insensibles à l'humidité. Ils restent élastiques même à basse température. Ne contenant que des matières solides, ils se prêtent spécialement bien à des installations présentant de fortes pentes. Très légers — parce que sans manteau de plomb — ils sont particulièrement indiqués pour des installations mobiles et provisoires.

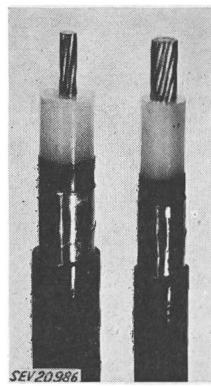


Fig. 13
Câble à haute tension à isolation polythène
a 25 mm² — 20/11,5 kV
b 50 mm² — 10/6 kV

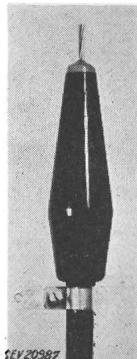


Fig. 14
Tête pour câble à isolation polythène
(montage intérieur)

Ces câbles sont munis d'un écran métallique qui doit être mis à la terre selon les prescriptions de l'inspecteur des installations à courant fort. Leur utilisation sans écran ne peut être admise qu'à des endroits non accessibles lorsque l'installation est en service. Une exécution de tels câbles est la suivante: le conducteur est entouré d'un manteau de polythène sur lequel est appliquée une couche de matière semi-conductrice (rubans graphités), un écran (rubans de cuivre) et un manteau de PVC noir (fig. 13). Pour la transmission du courant triphasé, trois de ces câbles peuvent être câblés ensemble et entourés d'un manteau de protection commun. Une armure n'est normalement pas nécessaire pour ces câbles. Un problème spécial posé par ces câbles est l'exécution des joints et d'extrémités. On ne peut

pas sans autre utiliser les boîtes telles qu'elles sont en usage pour des câbles à isolation au papier imprégné et qu'on remplit de masse ou d'huile, ces matériaux ne convenant pas au polythène et ne fai-

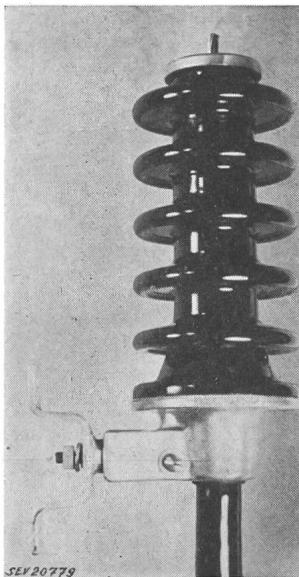


Fig. 15
Tête pour câble à
isolation polythène
(montage extérieur)

sant pas corps avec lui comme avec le papier imprégné. Il ne suffit pas, d'autre part, de dénuder simplement les extrémités de tels câbles et de laisser assez de distance entre écran et conducteur pour qu'une disruption électrique ne puisse avoir lieu le long de la surface, car, à cause de la faible rigidité diélectrique de l'air (≈ 2 kV/mm), des décharges se forment qui, même faibles, nuisent avec le temps à l'isolation et finissent par la détruire.

Ici, les Câbleries de Cossonay, en frayant un nouveau chemin ont développé des têtes et des jonctions de câbles en utilisant comme isolant la nouvelle résine, l'Araldite. Une telle tête, par exemple, est construite comme suit: l'extrémité du câble — le conducteur successivement libéré de son manteau, de son écran, de la protection semi-conductrice et

de son isolant et l'extrémité de l'écran étant munie d'un déflecteur — se trouve dans une capsule de protection qui est, pour un montage intérieur, un double cône en matière moulée non inflammable et, pour un montage extérieur, un isolateur creux en porcelaine (fig. 14 et 15).



Fig. 16
Câble à isolation polythène pour la
transmission de la haute tension
continue (100 kV)
(avec conducteur supplémentaire au
centre)

L'intérieur de cette capsule de protection est rempli d'Araldite D qu'on coule mélangé avec son durcisseur et qui durcit en peu de temps, formant

une masse isolante de haute qualité. L'extrémité de l'écran avec son déflecteur étant ainsi entourée de matière isolante, on n'a plus à craindre les effets nuisibles d'un champ électrique trop élevé pour l'air. Ces têtes de câbles sont légères, prennent peu de place, sont faciles à monter et permettent ainsi des montages extrêmement simples.

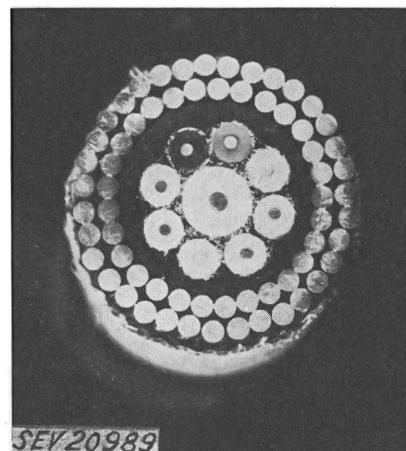


Fig. 17
Câble spécial à isolation polythène pour la foudre au San Salvatore
($1 \times 7 \text{ mm}^2 + 8 \times 2,5 \text{ mm}^2$)
Armure en cuivre mi-dur de 546 mm^2 de section

Mentionnons encore pour finir quelques applications un peu spéciales des nouvelles matières isolantes entrant dans la fabrication des câbles. Ainsi on trouve des câbles pour la transmission de la haute tension continue (appareils Röntgen; installations de dépoussiérage) (fig. 16), des câbles destinés à transmettre aux stations d'observation des impulsions permettant de mesurer des décharges électriques, telle que la foudre (fig. 17), des câbles pour lampes-éclair électroniques et pour caméras de télévision. Une autre application importante des matières plastiques est la protection des manteaux de plomb des câbles contre la corrosion en boudinant une couche isolante sur le plomb.

6. Conclusion

Bien que l'onde électromagnétique traverse et remplit l'espace dépourvu de matière — ressemblant en cela à la musique des sphères des philosophes de l'antiquité — la transmission à fin utilitaire d'énergie électromagnétique ne peut et ne pourra pas se passer de la matière comme support et guide. L'étude des qualités de la matière, la connaissance du comportement des lignes de transmission, les nouveaux matériaux fournis par la chimie et des idées constructives pour la fabrication des câbles sont donc indispensables au progrès technique.

Adresse de l'auteur:
R. Goldschmidt, ingénieur à la S. A. des Câbleries & Tréfileries, Cossonay-Gare (VD).