Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 59 (1968)

Heft: 23

Artikel: Technique moderne des câbles isolés au papier

Autor: Montmollin, G. de

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916090

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: 10.07.2025

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Starkstromkabeltechnik

Diskussionsversammlung des SEV vom 3. Juli 1968 in Neuchâtel

Technique moderne des câbles isolés au papier

Conférence donnée à l'Assemblée de discussion de l'ASE le 3 juillet 1968 à Neuchâtel,

par *G. de Montmollin,* Cortaillod

061.3:621.315.2

En dépit de l'apparition et du développement de matériaux isolants synthétiques comme par exemple le chlorure de polyvinyle et le polyéthylène, le papier reste, en électrotechnique et tout spécialement pour la fabrication des câbles, l'un des matériaux isolants essentiels. Dans un câble, le papier imprégné a, radialement, une rigidité diélectrique considérable. D'autre part, les températures supportées par l'isolation, en régime normal ou lors d'une surcharge momentanée, sont des caractéristiques importantes. C'est pourquoi le papier imprégné continue à être utilisé aux tensions inférieures, malgré la complexité relative qu'il représente pour les utilisateurs. Aux tensions supérieures à 100 kV, cette technique reste incontestée. L'introduction des matières d'imprégnation stabilisées, qui ne s'écoulent pas dans les dénivellations, apporte une solution au problème du drainage jusqu'aux tensions de 20 kV. On a cherché également à alléger la construction des câbles et à simplifier le montage des boîtes d'extrémité et de jonction. La généralisation des systèmes de sertissage des conducteurs facilite les travaux de raccordement. Les câbles à pression d'huile ou de gaz sont utilisés depuis la moyenne tension (20 kV) jusqu'aux plus hautes tensions (380 kV).

Trotz des Erscheinens und der Entwicklung von synthetischen Isolierstoffen, wie z. B. des Polyvinylchlorides und des Polyäthylens, bleibt das Papier in der Elektrotechnik und besonders in der Kabelfabrikation eines der bedeutendsten Isolierstoffe. In einem Kabel hat das imprägnierte Papier in radialer Richtung eine beträchtliche dielektrische Festigkeit. Anderseits bedeuten die durch die Isolation ertragenen Temperaturen bei Normalbetrieb oder anlässlich einer momentanen Überbelastung wichtige Charakteristiken. Aus diesem Grunde findet das imprägnierte Papier für niedere Spannungen weiterhin Verwendung. Für Spannungen von über 100 kV bleibt diese Technik unumstritten. Die Einführung von Haft-Isoliermassen, welche bei Höhenunterschieden nicht abfliessen, bringt der Frage des Abfliessens bis zu Spannungen von 20 kV eine Lösung. Man hat ebenfalls versucht, die Kabel leichter zu bauen und die Montage der Endverschlüsse und der Verbindungsmuffen zu vereinfachen. Die Verallgemeinerung der Preßsysteme der Leiter erleichtert die Anschlussarbeiten. Die Öl- und Gasdruckkabel werden von mittleren Spannungen (20 kV) bis zu den Höchstspannungen (380 kV) verwendet.

1. Introduction

En électrotechnique, le papier reste, dans beaucoup de cas, un des éléments essentiels de l'isolation. Il a été utilisé pour isoler les câbles dès qu'une étanchéité parfaite a pu être garantie par la gaine de plomb. C'est vers 1880 qu'un Neuchâtelois, M. *François Borel,* a inventé et réalisé les premières presses à filer le plomb, donnant aux câbles isolés au papier sous gaine de plomb, l'essor que l'on connaît, tant dans la technique des courants faibles, de la téléphonie en particulier, que dans celle des courants forts, jusqu'aux tensions les plus élevées. Comment, alors que la chimie moderne nous apporte continuellement d'autres matériaux isolants, soit par transformation chimique de la cellulose, soit par synthèse, le papier reste-t-il non seulement avantageux, mais possède-t-il encore des qualités techniques que les nouveaux matériaux n'atteignent pas sans autre?

Dans le domaine des câbles à courant fort, les températures supportées par l'isolation, en régime normal ou lors d'une surcharge momentanée, sont des caractéristiques essentielles, et sur ce point le papier imprégné a prouvé une endurance, qui, actuellement, n'est encore atteinte par aucune matière plastique ordinaire. C'est pourquoi le papier imprégné continue à être appliqué aux tensions inférieures, malgré la complexité relative qu'il représente pour les utilisateurs. Aux tensions supérieures à 100 kV, cette technique reste incontestée. Nous verrons quelles sont ses limites et les possibilités de remplacer le papier.

Quel est le principe de l'isolation au papier imprégné?

En enroulant sur une âme conductrice centrale plusieurs rubans de papier superposés, on crée la structure élémentaire de l'isolant. Le caractère hétérogène de ces couches permet non seulement le pliage du câble, mais confère à l'isolant une rigidité diélectrique considérable dont la dispersion est très faible, parce qu'il est pratiquement impossible que plusieurs imperfections se trouvent l'une sur l'autre dans des papiers différents. Si un ruban présente un point faible, les dimensions du défaut resteront dans les limites de l'épaisseur du papier, au plus 0,15 mm. Cela ne sera jamais qu'une proportion négligeable de l'épaisseur totale d'isolant. Cette banalité devait être rappelée, car il ne faut pas perdre de vue le principe de l'isolation en couches lorsqu'on est amené à établir des comparaisons

avec des isolants massifs. Nous verrons d'ailleurs qu'en haute tension on utilise la possibilité de faire varier l'épaisseur des rubans pour les adapter aux contraintes radiales du diélectrique.

2. Papiers et matières d'imprégnation, progrès dans le domaine des matériaux

Les papiers pour câbles à courant fort, donc destinés à être imprégnés, sont obtenus de pâtes de bois traitées à la soude. Ils doivent être très isolants, chimiquement neutres et résistant à la traction. Leur porosité et le satinage dépendent de l'application envisagée. C'est sur ces différentes propriétés que des progrès considérables ont été réalisés ces 20 dernières années, lorsque sont apparus les câbles pour plus de 220 kV. En particulier, ce n'est qu'en employant des pâtes de bois de toute première qualité que sont assurées à la fois une grande résistance à la traction et des propriétés isolantes très poussées. La résistance mécanique des papiers est en effet une des caractéristiques intéressant le fabricant, car ils doivent supporter sans se déchirer non seulement l'opération de rubanage, mais les tractions transversales résultant du pliage du câble pendant la fabrication et lors de la pose. La résistance à la traction est environ deux fois plus grande dans le sens longitudinal des fibres que dans le sens transversal.

L'épaisseur des papiers utilisés varie entre 0,10 et 0,15 mm pour les câbles les plus courants, mais descend à la moitié de ces valeurs dans les câbles à haute tension et, dans un câble à 400 kV, on est amené à utiliser des papiers très minces, de 0,02 à 0,03 mm d'épaisseur seulement. On sait en effet que dans la zone où le champ électrique est le plus élevé, donc près du conducteur, il est nécessaire de réduire la hauteur du déjoint rempli d'huile ou de gaz pour limiter le parcours libre des ions dans le champ radial.

La densité moyenne du papier est une mesure de la teneur en fibres de cellulose dont la densité propre est environ deux fois plus élevée. Ceci signifie que l'huile d'imprégnation occupe environ la moitié du volume total de l'isolant. On aurait intérêt à utiliser des papiers de densité relativement élevée, mais comme celle-ci et la porosité sont, dans une certaine mesure, en raison inverse, on doit rester dans les limites imposées par un bon séchage et une bonne imprégnation.

Ces quelques considérations sur les propriétés mécaniques des papiers montrent que le champ d'investigations est large et que même sur ce point, des progrès étaient possibles. Mais il est évident que ce sont les propriétés électriques qui retiennent le plus l'attention des fabricants, surtout lorsqu'il s'agit de très hautes tensions et de câbles fonctionnant avec un champ électrique maximum en service de 100 à 150 kV/cm ou plus.

Les pertes diélectriques limitent la puissance transportée; elles croissent comme le carré de la tension et sont proportionnelles au facteur de pertes diélectriques de l'isolant. Le courant transporté par un câble à 220 kV est réduit de 5 à 10 % par les pertes diélectriques, ce qui n'est pas négligeable. Cette réduction est beaucoup plus prononcée dans un câble à 400 kV où elle atteint 20 % dans les cas les plus défavorables. Pour abaisser autant que possible le facteur de pertes diélectriques du papier, on a amélioré le lavage des pâtes en utilisant de l'eau très pure. Certains fournisseurs de papier alimentent leurs machines en eau déminéralisée, ce qui n'est pas une petite affaire si l'on songe que pour fabriquer une tonne de papier de la qualité requise, il faut jusqu'à 300 m^3 d'eau. Ainsi, il est possible d'éliminer les pertes ioniques produites par les sels solubles.

Les rubans de papier sont appliqués par des rubaneuses qui les posent sur le conducteur avec une grande précision. Les progrès réalisés à ce stade de la fabrication ont surtout porté sur la régularité de la tension d'application des rubans et leur position qui doivent rester rigoureusement constantes, quelle que soit la vitesse de rotation de la rubaneuse. En particulier un arrêt de la machine, nécessaire pour rajouter des galettes de papier, ne doit pas entraîner une variation des conditions d'application. Les rubaneuses ont donc été perfectionnées pour donner aujourd'hui une isolation parfaitement uniforme. C'est surtout dans les grosses épaisseurs d'isolant, de 20 mm et plus, et les fortes sections de conducteurs, au-delà de 800 mm^2, que la nécessité d'une très grande régularité se fait sentir. Etant donné la vitesse des masses en mouvement dans une tête de rubaneuse, ce problème a demandé aux fabricants de machines beaucoup d'ingéniosité pour être bien résolu. De la part du fabricant de câbles, le mode d'application de chaque ruban est spécifié avec précision, en particulier pour que la compacité de l'isolant varie radialement selon une loi définie pour chaque type de câble.

Après avoir été convenablement séché, le papier isolant est imprégné, soit d'un mélange d'huile visqueuse et de colophane, soit d'huile très fluide. Les huiles utilisées proviennent toutes aujourd'hui de la distillation fractionnée des pétroles bruts. Leurs propriétés physiques et électriques varient suivant l'étage de distillation où elles sont prélevées et suivant leur mode de raffinage. Les plus légères, employées pures dans les câbles à huile fluide, conservent après raffinage, une petite quantité de carbures aromatiques qui absorbent les gaz ionisés, sous l'effet du champ électrique.

La colophane est ajoutée surtout pour créer un mélange visqueux, mais elle est également bénéfique à d'autres égards. En particulier, elle absorbe aussi les gaz sous l'effet du champ électrique. La colophane est obtenue par distillation de la résine de pin. Elle est mélangée à l'huile dans la proportion voulue pour que la matière se déplace difficilement dans le câble chaud sans devenir dure et cassante lorsque le câble est froid.

Les pertes diélectriques des matières d'imprégnation modernes étant bien inférieures à celles des fibres de cellulose du papier, c'est principalement celles-ci qui déterminent le facteur de pertes total du câble. On constate finalement que les caractéristiques de vieillissement des matières d'imprégnation se sont beaucoup améliorées par une meilleure sélection et par l'adjonction de produits complémentaires qui leur donnent, selon les applications, les propriétés physiques requises et une bonne stabilité chimique.

Nous ne reviendrons pas en détail sur les techniques modernes d'imprégnation qui ont déjà fait l'objet d'une conférence donnée par M. *G. Martin* de Cossonay dans le cadre d'une assemblée de l'ASE sur la technique du vide en 1961 à Zurich. Mais nous relèverons les progrès récents réalisés dans ce domaine en mentionnant l'accélération du processus d'imprégnation.

D'une part, l'évacuation de l'air et le séchage ont été facilités par des pompes donnant rapidement un vide de

l'ordre de 0,01 mm Hg à une température réglée avec précision. D'autre part, l'imprégnation est faite sous pression à l'abri de l'air, comme le refroidissement dont la vitesse est contrôlée pour éviter toute formation de vacuoles au sein de l'isolant. Ces perfectionnements permettent non seulement une fabrication plus rapide, mais assurent en premier lieu une reproductibilité parfaite, ce qui est une condition essentielle au maintien de la qualité.

Nous avons vu que les techniques de fabrication de l'isolant des câbles classiques isolés au papier imprégné s'étaient considérablement affinées pour devenir un travail de précision. Cette évolution était indispensable dans le domaine des très hautes tensions mais a profité également aux câbles courants.

Pour être complet, nous ne devons pas oublier la gaine d'étanchéité indispensable à ce type d'isolant. Le plomb, pur ou allié, est encore le métal le plus employé actuellement pour les raisons suivantes:

a) La facilité et la vitesse d'extrusion.
b) La souplesse, rendant plus aisée la pose des câbles.
c) La relativement bonne résistance à la corrosion dans la plupart des terrains.
d) Son prix avantageux comparé à d'autres types de gaines métalliques.

Il n'est probablement pas exagéré de dire que les gaines de plomb ont fait et font encore l'objet des recherches les plus poussées du domaine des câbles pour, d'une part améliorer les conditions d'extrusion, et d'autre part augmenter la résistance à la fatigue en présence de vibrations ou de variations thermiques. La corrosion, qui a été longtemps un sujet de préoccupation pour le fabricant et les utilisateurs, a été aujourd'hui pratiquement supprimée par les gaines continues de protection anticorrosives en chlorure de vinyle ou en polyéthylène.

Les deux alliages de plomb les plus employés en Suisse sont l'alliage plomb-antimoine qui a remplacé l'ancien alliage plomb-étain et l'alliage plomb-cuivre-tellure. Le premier donne des gaines mécaniquement très dures et solides, mais il est plus difficile à extruder que le second dont la particularité est de rester très stable dans le temps. Parallèlement aux perfectionnements des méthodes d'analyse métallographique du plomb, qui doivent être extrêmement sélectives pour que le comportement des alliages soit bien défini, les nouvelles presses continues mises en service ces dernières années ont apporté de sérieuses améliorations des conditions d'extrusion.

3. Description des différents types classiques de câbles

Du câble unipolaire le plus simple comprenant: une âme conductrice, une épaisseur de papier et la gaine d'étanchéité, on a développé plus de dix types bien particuliers. Pour fixer les idées et aussi pour permettre le choix d'un type de câble correspondant à une application déterminée, on essaiera d'établir une classification en formant un certain nombre de subdivisions représentées sur la fig. 1.

Le premier groupe que nous distinguons est celui des câbles classiques dans lesquels la matière d'imprégnation est enfermée une fois pour toutes dans la gaine d'étanchéité, sans être soumise à une pression intérieure ou extérieure. Ces câbles sont imprégnés d'une matière visqueuse et appelés généralement chez nous «câbles à masse».

Lorsque les trois conducteurs d'un câble triphasé ne sont pas limités par un écran individuel comme dans le cas du câble unipolaire, il y a intérêt à les réunir sous une ceinture isolante commune qui donne selon la pratique suisse une épaisseur égale d'isolant entre phases d'une part et entre phase et terre d'autre part. Ce sont les câbles à ceinture utilisables de la basse tension à 12 kV environ.

Au-delà de 12 kV, il faut rendre le champ électrique radial par un écran métallisé placé sur l'isolant de façon à éviter dans celui-ci des contraintes tangentielles auxquelles il résiste mal. Nous les appelons souvent chez nous: câbles

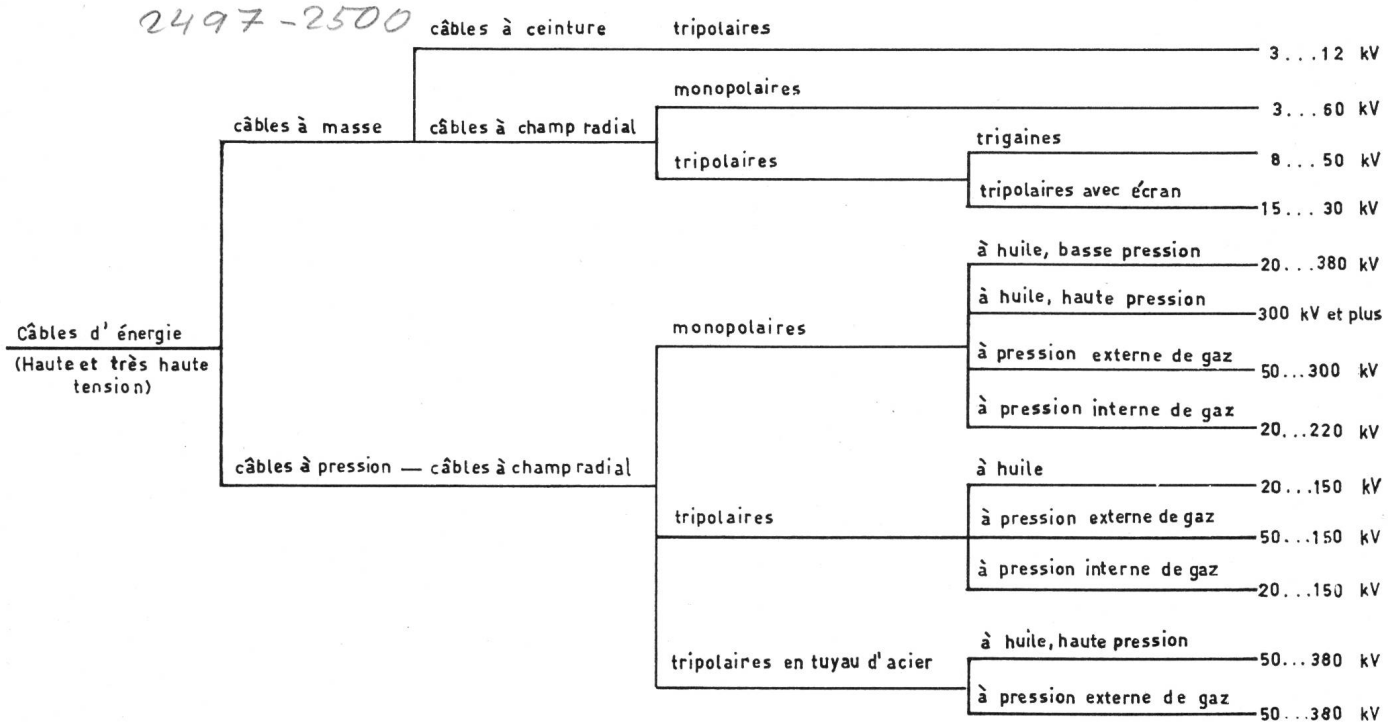

Fig. 1
Classification des câbles électriques isolés au papier imprégné

Höchstaedter ou câbles H, du nom de celui qui le premier a eu l'idée de cet écran individuel.

Parmi les câbles tripolaires, le câble triplomb à trois gaines d'étanchéité distinctes mérite une mention spéciale; il admet des intensités de courant un peu supérieures parce que le refroidissement est meilleur, son installation est plus aisée et surtout l'écoulement longitudinal de la matière d'imprégnation est réduit par l'absence des bourrages peu denses du câble tripolaire à une seule gaine d'étanchéité. Le câble triplomb existe depuis longtemps mais il semble que chez nous on ait quelque peu tardé à reconnaître ses qualités.

Dans les câbles classiques à masse le champ électrique en service ne dépasse généralement pas 4 kV/mm pour tenir compte de la présence des vacuoles qui se forment dans l'isolant lors du refroidissement. Aux tensions supérieures à 60 kV, l'augmentation de la pression dans l'isolant autorise des gradients de potentiel en service beaucoup plus élevés, plus de 15 kV/mm dans certains cas.

D'où les câbles à pression. Ils sont naturellement à champ radial et ont donné lieu à une prolifération de types qui ont tous leur raison d'être dans certains cas déterminés. On retrouve à peu près les mêmes systèmes en câbles monopolaires et tripolaires, soit:

Le câble à huile fluide dont la pression d'huile est maintenue par des réservoirs en bout de ligne. Cette pression d'huile doit être plus élevée que la pression atmosphérique, qui est la limite inférieure des câbles dits à basse pression, lorsque le gradient de fonctionnement dépasse 13 kV/mm et que des papiers très minces et denses sont utilisés, donc pour les câbles à plus de 300 kV.

Une autre technique consiste à comprimer l'isolant en plaçant du gaz sous pression entre une membrane et un tube extérieur étanche. D'où le câble à pression externe de gaz.

Dans les câbles à pression interne de gaz, c'est la loi de Paschen qui joue. Le gaz sous pression dans les déjoints du papier réduit le libre parcours des électrons et abaisse donc le seuil d'ionisation.

On retrouve la même subdivision, mais pour des raisons d'encombrement à des tensions moins élevées, en câbles tripolaires avec gaine normale d'étanchéité.

Si inversement on tire trois conducteurs isolés dans un tuyau d'acier posé préalablement on obtient un troisième groupe de câbles à pression fonctionnant à peu près selon les mêmes principes que les précédents.

4. Examen des différents types de câbles: variantes de construction

Après avoir rapidement rappelé quels sont les principaux types de câbles à disposition, nous allons, plus en détail maintenant, voir comment ils sont utilisés aujourd'hui et quelles modifications de la construction de base s'imposent.

En basse tension, nous l'avons dit, c'est le comportement des câbles isolés au papier lors des surcharges qui lui attire les faveurs de l'exploitant. L'expérience de certains d'entre eux est déterminante, comme à Zurich, par exemple, où pendant la guerre, alors que le cuivre faisait défaut, il fallut faire supporter au réseau un accroissement extraordinaire de la consommation. De ce point de vue, le papier maintient donc ses positions, en tous cas pour les grosses charges.

Les fabricants se sont de leur côté efforcé de simplifier le montage de ce type de câble en allégeant les boîtes d'extrémité et les coffrets terminaux et en les adaptant à la technique du raccordement par sertissage, de plus en plus répandue. Puisque la soudure n'était plus nécessaire on a cherché à éviter aussi le chauffage de la matière de remplissage traditionnelle dont le retrait doit être complété après refroidissement, ce qui prend du temps et complique les programmes de montage des jonctions et des dérivations.

A cette fin, les mêmes techniques peuvent être appliquées que pour les câbles à isolation thermoplastique, soit en utilisant les résines époxydes, les matières pressées à froid ou une solution colloïdale asphaltique qui se gélifie après la coulée. Le choix entre ces différentes techniques dépend de l'organisation de montage dont dispose l'utilisateur, des sections moyennes des câbles à raccorder et d'une étude économique. En effet, ces techniques apparemment simples et rapides demandent du soin et une bonne instruction des monteurs. Elles sont plus faciles à appliquer aux petits qu'aux gros câbles.

Certaines simplifications et réductions de dimensions et de poids peuvent aussi être réalisées sur le câble lui-même en partant notamment de conducteurs sectoraux comprimés ou en aluminium massif, dont le raccordement a été facilité par les presses à sertir. En égouttant les plus possible l'isolant des câbles après l'imprégnation ou en rubanant des papiers imprégnés préalablement, on évite la migration longitudinale de la masse excédentaire des câbles posés en pente. Un allégement peut être évidemment obtenu en remplaçant la gaine de plomb par une gaine ondulée en acier, en cuivre ou en aluminium. Malheureusement cela entraîne une augmentation de diamètre due à l'ondulation. Cette solution donne toutefois une bonne protection mécanique et une bonne conductibilité de la gaine. En collant sur une feuille d'aluminium de 0,2 mm d'épaisseur une gaine de polyéthylène, on obtient un ensemble mécaniquement très robuste et parfaitement étanche. Ce type de gaine est utilisé depuis plus d'une dizaine d'années sur des câbles téléphoniques isolés au papier sec et peut à plus forte raison être employé sur des câbles d'énergie isolés au papier imprégné.

Nous avons comparé les poids, diamètres et résistances ohmiques de la gaine des câbles à basse tension, à conducteurs en cuivre normaux de 4×16 à 4×300 mm² de section. La fig. 2 montre que le câble le plus lourd est évidemment le type PPb-T à gaine de plomb isolé au papier. Puis

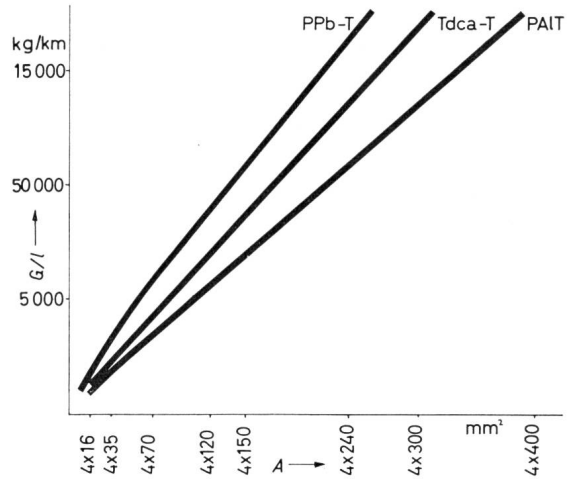

Fig. 2
Poids des câbles
G poids; *l* longueur

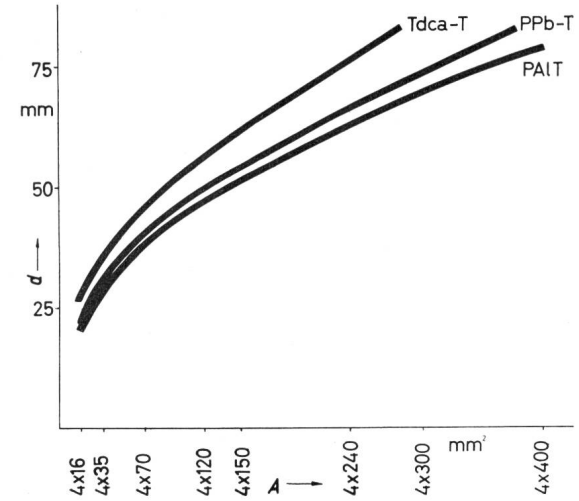

Fig. 3
Diamètre extérieur des câbles Tdca-T, PPb-T, PAlT

vient le câble à isolant thermoplastique type Tdca-T. Le câble en papier avec la gaine aluminium-polyéthylène, le type PAlT, est plus léger d'un tiers par rapport au même câble papier-plomb de 4×240 mm². Sur les diamètres, le gain est intéressant, comme le montre la fig. 3. Par rapport au Tdca-T, le type PAlT est au moins d'un cinquième plus petit.

La conductibilité électrique de l'écran d'aluminium de 0,2 mm équivaut à celle d'une gaine de plomb de 1,5 mm d'épaisseur. Les gaines de plomb sont cependant plus épaisses et donnent une résistance un peu plus basse. Mais la gaine aluminium-polyéthylène a une résistance nettement inférieure à celle du câble Tdca-T (fig. 4).

Une réduction supplémentaire de diamètre et de poids accompagnée d'une amélioration de la conductibilité longitudinale des gaines peut être réalisée en plaçant le conducteur neutre sous forme concentrique entre la ceinture isolante et la gaine d'étanchéité. Dans ce cas, le conducteur neutre concentrique est composé de brins de cuivre en forme de ligne brisée ou ondulée, appliqués parallèlement à l'axe du câble, afin qu'ils puissent être écartés aisément lors du montage.

Ces quelques exemples de constructions nouvelles montrent qu'il est possible d'alléger le câble à basse tension traditionnel tout en conservant les avantages de l'isolation au papier imprégné.

Ce que nous venons de dire pour les câbles à basse tension est aussi valable pour les câbles de 3 à 12 kV, tant en ce qui concerne la forme des conducteurs, que l'isolation au papier préimprégné et les gaines d'étanchéité. Le point

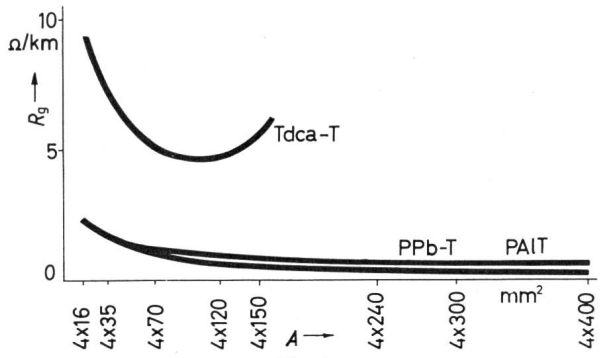

Fig. 4
Résistance ohmique en courant continu à 20 °C de la gaine métallique des câbles Tdca-T à isolation thermoplastique, PPb-T à isolation papier sous gaine de plomb et PAlT à isolation papier sous gaine «polymet»

faible des câbles à matière visqueuse est la migration longitudinale du compound sous l'action de la pesanteur le long des fortes pentes. La matière d'imprégnation s'écoule surtout par les torons des conducteurs qui offrent une moins grande résistance que les papiers. On a estimé que l'écoulement était 1000 fois plus fort dans le conducteur que dans les papiers.

Ceci conduit à utiliser des conducteurs rétreints ou des conducteurs en aluminium massif. Dans un câble triplomb à conducteurs rétreints, l'écoulement est extrêmement faible, car la matière n'y trouve plus de canaux longitudinaux pour couler.

Une solution plus économique pour les câbles à ceinture de moins de 12 kV consiste, pour éviter l'écoulement, à utiliser des matières stabilisées, également connues sous le nom anglais de matières «non draining». Ce sont des cires microcristallines restant solides au-delà des températures normales de service. La stabilisation de la matière peut aussi être obtenue en incorporant du polyéthylène à certaines huiles visqueuses. Les pertes diélectriques des câbles à matière stabilisée ne sont pas plus élevées que celles des câbles classiques sortant d'usine, et restent beaucoup plus constantes par la suite malgré l'effet des cycles de température. Les matières stabilisées peuvent être employées jusqu'à 20 kV.

Les câbles pour les tensions de 16 à 20 kV sont tous, rappelons-le, des câbles à écran H, donc à champ radial. Il faut rappeler l'introduction, pour ces tensions déjà, d'un écran de papiers semi-conducteurs sur la corde de cuivre ou d'aluminium. Ces papiers jouent deux rôles dont le premier est utile surtout aux très hautes tensions. Ils freinent les électrons émis par la surface métallique des conducteurs sous l'effet d'un fort champ électrique et empêchent ceux-ci de détériorer l'isolant. Le second rôle est, comme l'expérience l'a révélé, très important dans les câbles à masse. Ces papiers semi-conducteurs restent collés aux papiers de l'isolant lors du pliage du câble ou quand l'isolant se dilate sous l'effet de l'échauffement. Ainsi l'isolant adhère en toutes circonstances à l'électrode intérieure, qui est à la tension du conducteur, et à l'électrode extérieure, l'écran métallisé H, qui est à la terre. Même si, comme nous l'avons vu, il y a écoulement de matière dans le conducteur et que celui-ci se vide partiellement, il ne se créera pas de vacuoles dans la partie de l'isolant soumise au champ électrique.

Ce principe est aussi valable pour les autres types d'isolant, les isolants thermoplastiques par exemple. Il est toujours préférable que l'isolant soit compris entre deux électrodes faites d'une matière dont les caractéristiques physiques soient aussi proches que possible des siennes propres.

Avec les tensions supérieures à 20 kV, on entre progressivement dans la grande famille des câbles à pression dont le câble à huile est le plus simple à définir, puisque le fluide sous pression est aussi la matière d'imprégnation. En utilisant de l'huile de très faible viscosité, il a été possible de prolonger la longueur des tronçons entre deux réservoirs de compensation. Cette longueur dépend du profil du tracé, mais on peut maintenant se contenter d'alimenter une ligne de câble à huile tous les 3 à 5 km seulement. Ces réservoirs de compensation sont encombrants, mais en contre-partie de cet inconvénient inhérent au câble à huile, celui-ci offre

une sécurité de fonctionnement illustrée par le fait que c'est le seul système régulièrement employé à 400 kV et plus. Les progrès réalisés dans la confection des frettes des gaines étanches permettent d'employer des câbles à huile fluide sur des dénivellations supérieures à 300 m sans jonction d'arrêt. La température au conducteur d'un câble à huile pouvant sans inconvénient, ni pour le papier, ni pour l'huile, monter à plus de 80 °C, il est souvent utilisé pour le transport de courants très élevés, même à des tensions relativement basses, comme câble de générateur par exemple. Il se prête, de par sa construction, remarquablement bien au refroidissement par circulation forcée d'huile.

Les qualités des câbles à pression externe de gaz ont été rendues proches de celles des câbles à huile par l'introduction de matières d'imprégnation à base de polyisobutylène leur conférant un facteur de pertes diélectriques très bas jusqu'à la température de 90 °C. Dans ce type de câble, le remplacement de la membrane souple en plomb par une membrane en polyéthylène permet à la pression de gaz d'être mieux transmise à l'isolant.

Le câble préimprégné à pression interne de gaz a l'avantage de la simplicité tant dans sa construction, que lors du montage et dans le système de maintien de la pression de gaz. Il est insensible aux dénivellations. Il est intéressant car il montre peut-être la voie vers l'utilisation de rubans synthétiques qui pourraient remplacer les rubans de papier pour constituer une isolation feuilletée.

En effet, le remplacement du papier par des rubans de polyéthylène à haute densité par exemple, conserverait les avantages de l'isolation en couches dont nous avons parlé, tout en abaissant dans une très grande proportion les pertes diélectriques qui, nous l'avons vu, deviennent prohibitives au-dessus de 400 kV. Cependant l'imprégnation de cet isolant imperméable avec un liquide se heurterait à des difficultés considérables, tandis que la mise sous pression de gaz de l'ensemble est déjà beaucoup plus concevable. Parallèlement, en utilisant du polyéthylène au lieu de papier, on améliorerait le rapport de la constante diélectrique du ruban isolant à celle du gaz dans les déjoints où le champ électrique serait réduit d'autant. En choisissant le polyéthylène à haute densité, nous aurions un des rubans qui se prêtent le mieux à ce genre d'expérience; néanmoins cette matière est encore loin de pouvoir supporter les pointes de température que tolère le papier. Cela pourrait bien être le mot de la fin, car on touche par ces essais de remplacement du papier dans les câbles à très haute tension aux préoccupations essentielles des fabricants du monde entier, depuis plus de dix ans, sans qu'une solution paraisse s'imposer, même au stade de laboratoire.

5. Conclusion

Ce tour d'horizon trop rapide, car les câbles isolés au papier couvrent encore un domaine étendu, nous a permis d'énumérer toutes les améliorations et les progrès réalisés au prix de travaux considérables de recherche et de développement. A l'instar d'autres techniques anciennes, que ce soit celle de la montre ou du moteur d'auto, celle-ci semble devoir à chaque instant compter les jours qui lui restent à vivre avant d'être submergée par la vague des nouveaux produits. Et pourtant, force est d'admettre que ces techniques anciennes sont fondées sur des principes solides que les grandes découvertes de la science moderne n'ont pas réussi à rendre désuets.

L'évolution des câbles au papier se situe sur trois plans:

a) Amélioration des matières premières;
b) Perfectionnement des machines de fabrication;
c) Conceptions nouvelles.

Il est heureux de constater que la marche du progrès dans ce domaine aussi ne s'est pas ralentie et que par conséquent les câbles isolés au papier imprégné continuent à apporter des solutions aux problèmes posés par le transport souterrain de l'énergie.

Adresse de l'auteur:
G. de Montmollin, phys. dipl. EPF, directeur technique de la Société d'Exploitation des Câbles Electriques, 2016 Cortaillod.