

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 76 (1985)

Heft: 4

Artikel: Rapports et discussions de la session 1984 de la CIGRE

Autor: Schmidt, B. R.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-904567>

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: 22.12.2024

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

Rapports et discussions de la session 1984 de la CIGRE

B.R. Schmidt

Au séminaire «Kabeltechnik 84», le Rapporteur spécial du groupe «Câbles à haute tension» de la CIGRE a présenté un résumé de la session du 6 septembre 1984 et une comparaison des diverses opinions exprimées en rapport avec les questions techniques qui restent encore ouvertes. Le texte est présenté dans l'article qui suit.

Am Seminar «Kabeltechnik 1984» an der ETH in Zürich präsentierte der Autor dieses Beitrages – gleichzeitig Berichterstatte der CIGRE-Gruppe «Hochspannungstechnik» – eine Zusammenfassung der CIGRE-Tagung vom 8. September 1984 sowie eine Darstellung der unterschiedlichen Auffassungen bezüglich noch offener technischer Fragen. Der Text dieses Vortrages ist nachfolgend wiedergegeben.

1. Introduction

La CIGRE (Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques) est une société scientifique internationale dont l'activité concerne la recherche de nouvelles technologies en relation avec leur utilisation dans les réseaux à très haute tension (60 kV et plus). Elle se concentre sur l'étude des problèmes fondamentaux et présente les solutions possibles sur la base d'études théoriques et pratiques.

Une session de la CIGRE a lieu tous les deux ans à Paris et y réunit plus de 2000 participants venant de 80 pays. C'est là que se discutent les dernières expériences. Il est ainsi possible de faire le point sur l'état actuel de la technique dans le domaine de l'énergie électrique.

Onze rapports ont été ainsi discutés le 6 septembre 1984 dans le sous-groupe «Câbles». Leur contenu se répartit sur les trois sujets préférentiels proposés: câbles sous-marins, câbles à isolation synthétique et câbles destinés au transport de grandes puissances.

La discussion est conduite par un spécialiste, appelé «Rapporteur spécial», sur la base du Rapport CIGRE 21-00 qu'il a publié préalablement. Ce rapport résume les différentes idées présentées et pose les questions fondamentales que la discussion devrait permettre d'éclaircir.

2. Câbles d'énergie sous-marins

Dans ce domaine, le développement technique procède par bonds successifs. En effet, l'importance d'un nouveau projet de traversée sous-marine est telle qu'il justifie et nécessite des études et essais pratiques considérables permettant souvent des progrès technologiques très importants.

Pour avoir une vue d'ensemble, examinons brièvement la problématique caractéristique des câbles sous-marins.

Elle est surtout due à leur *longueur* et aux difficultés très particulières de leur *pose*.

Actuellement, il semble que le volume et le poids, quoique gigantesques, ne constituent plus des difficultés majeures, vu les installations de fabrication existantes et les possibilités de maintenance offertes par les navires câbliers. De même, pour l'alimentation en huile et la tenue en pression d'un très long circuit de câbles à huile; bien que de tels systèmes se rencontrent aussi dans des installations terrestres, la difficulté est augmentée ici par l'exigence du maintien d'une pression d'huile supérieure à la pression hydrostatique dans le cas où le câble est sectionné accidentellement.

Un groupe de travail de la CIGRE a justement mis au point une méthode de calcul de ces variations transitoires de pression.

Mais c'est dans les problèmes mécaniques rencontrés lors de la pose des câbles sous-marins que les études les plus intéressantes ont été présentées à cette session de la CIGRE. L'un des rapports (21-10) explique comment on est arrivé à réaliser ce qui était une impossibilité il y a quelques années: oser placer à 300 m de profondeur de gros et lourds câbles à huile 400 kV 1600 mm² sur un fond marin comportant des blocs de rocher de plusieurs mètres, à travers le détroit de Messine qui est soumis à de violents courants de marée qui changent de direction 4 fois par jour. Il y a donc 4 câbles (un de réserve) sur une longueur de 6,5 km. L'étude détaillée et la préparation du tracé ont été rendues possibles grâce à un engin sous-marin d'observation et de travail. De tels engins sont de plus en plus souvent utilisés dans de nombreux pays en relation avec l'installation de ces câbles. Malgré le coût élevé de cette technique, les avantages sont tels qu'ils augmentent beaucoup les possibilités, surtout pour des fonds

Adresse de l'auteur

Bernard R. Schmidt, Câbleries et tréfileries de Cossonay, 1305 Cossonay-Gare

difficiles. En plus de l'étude et de l'aménagement du tracé, ils sont utilisés avec succès pour surveiller la pose. Plus tard, ils permettent une inspection et un contrôle détaillés du câble, donnant la possibilité bienvenue d'un travail d'entretien pour réduire le risque de dommages graves et subits.

L'utilisation de telles machines sous-marines pour des travaux d'aménagement du tracé est cependant limitée à des profondeurs ne dépassant pas quelques dizaines de mètres et à des travaux légers tels que coupe dans la craie ou les coraux et dégagement à l'explosif de roches plus dures. Dans le cas particulier, ces engins ont aussi servi à placer au fond des cordes colorées destinées à marquer exactement le tracé du futur câble à certains endroits, de façon à arriver exactement sur les véritables ponts sous-marins installés préalablement entre des rochers. Comment est-il possible de placer ensuite le câble lui-même au bon endroit?

La précision de positionnement d'un navire est aujourd'hui de quelques mètres grâce aux équipements électroniques modernes. A partir de là, la précision de pose du câble au fond de la mer est de l'ordre de 10% de la profondeur pour autant que les courants ne dépassent pas un nœud.

La distance entre câbles voisins, qu'on choisit en général légèrement plus grande que la profondeur, est en fait déterminée par les modalités des réparations envisageables: possibilité d'ancrage du navire pendant la réparation et espace suffisant pour poser sans risque la surlongueur du câble de remplacement. L'écartement des câbles diminue aussi le risque d'un accident mécanique multiple. La préparation de cette traversée sous-marine a encore nécessité une étude très poussée des contraintes subies par un câble suspendu entre des rochers. Le risque de fatigue par oscillations est lié à la présence d'un violent courant sous-marin, la rigidité du câble étant dans ce cas un élément favorable. Dans un autre exemple cité lors de la discussion, une méthode originale de protection a été présentée qui consiste à verser du gravier depuis la surface de la mer, de façon à recouvrir et protéger le câble. Ce procédé a été utilisé jusqu'à 70 m de profondeur dans la mer du Nord.

Un deuxième rapport (21-04) présente la traversée entre le Canada et l'île de Vancouver où 6 câbles à huile transportent deux fois 1200 MW à 525 kV. Malgré leur gros diamètre, les câbles de 1600 mm² ont pu être posés

en longueurs unitaires de 30 km grâce à une jonction souple réalisée en usine. La profondeur est de 400 m et les moyens utilisés sont semblables à ceux du rapport précédent.

3. Câbles à isolation synthétique

Ce sujet a inspiré 5 rapports qui permettent, avec la discussion qui a suivi, de faire le point sur l'utilisation de ces isolants dans le domaine des câbles à haute tension. On observe une tendance générale à les préférer aux câbles à huile jusqu'à la tension de 150 kV. A 220 kV, 150 km de circuits triphasés fonctionnent en France sans aucune défaillance. Depuis 1980, il y a des câbles 300 kV de ce type en Norvège.

Une évolution heureuse se dessine dans ces discussions techniques: on compare beaucoup moins les caractéristiques des isolations entre elles en regardant seulement leurs propriétés spécifiques. Les études se font presque toujours sur des câbles complets essayés en conditions réelles. En effet, tous les éléments de leur construction et de leur mode d'installation influent sur la qualité de l'ensemble.

Le meilleur isolant ne peut pas donner un bon câble s'il n'est pas utilisé très soigneusement. Tous les auteurs sont d'accord sur les conditions essentielles qui permettent d'assurer la qualité d'un câble extrudé: dans l'ordre d'importance, il semble bien que ce soit *d'abord l'absence de toute irrégularité* aux surfaces de séparation de l'isolation et des semi-conducteurs, suivie d'une *extrême propreté des matériaux*, puis d'un *flux optimum dans la tête de la boudineuse*. L'effet des *procédés de réticulation* paraît par contre avoir moins d'importance qu'on ne pensait, et des comparaisons minutieuses n'arrivent pas à déceler de différence de qualité diélectrique entre les câbles issus de l'une ou de l'autre technique, même si l'apparence de l'isolant n'est pas identique (rapports 21-01 et 21-06).

3.1 Echauffement des câbles

Plusieurs rapports arrivent, par des essais différents sur câbles complets, à des conclusions semblables pour les conséquences d'un fort échauffement des câbles: les contraintes thermomécaniques, dans des conditions expérimentales proches de la pratique, montrent bien que les déformations d'une isolation en polyéthylène réticu-

lé commencent aux environs de 80°C et sont encore minimales à 90°C. Mais quand on chauffe davantage, ces déformations ne sont plus réversibles; après 105°C, qui est la température de fusion cristalline, elles deviennent inacceptables pour la sécurité.

Il a été relevé aussi, parmi les effets de la réticulation, qu'elle n'abaisse pas seulement cette température de fusion cristalline, mais aussi la rigidité diélectrique qui est en soi meilleure dans le polyéthylène non réticulé (rapport 21-03). Ces phénomènes ne se rencontrent pas dans l'EPR qui n'a pas de réseau cristallin.

Un rapport (21-01) cite une très intéressante confirmation expérimentale de la théorie qui veut que la tension-limite de claquage d'un câble, au choc et à fréquence industrielle, dépende directement du gradient électrique maximum, situé à l'interface de l'isolant et du conducteur. Des essais sur un câble comportant deux couches isolantes de constantes diélectriques différentes ont donné des résultats exactement conformes au calcul. C'est également une preuve indirecte qu'il est possible aujourd'hui d'obtenir une qualité parfaitement uniforme de l'isolant même s'il est extrudé en grande épaisseur.

3.2 Effets de l'eau

On a beaucoup parlé de la mesure de la teneur en humidité d'un isolant synthétique. Tous les avis concordent pour constater la difficulté d'une telle opération, si on veut obtenir un minimum de précision. La préparation de l'échantillon doit être faite très minutieusement et les différentes méthodes de mesure exigent toutes de très grandes précautions pour éviter des erreurs. Ces études montrent que la répartition de l'eau dans l'isolant est très hétérogène (on a trouvé, sur une seule section transversale de câble PRC, des valeurs allant de 30 à 3700 ppm). Des phénomènes de migration d'eau, dépendant fortement de la température, du temps et de l'humidité relative extérieure à l'isolant, bouleversent constamment cette répartition. Les chiffres cités dans la littérature technique ne sont donc souvent que des moyennes.

L'explication physique de l'effet de l'eau dans l'isolation préoccupe les chercheurs depuis de nombreuses années. Les résultats des essais, comme ceux de l'expérience en service, ne concordent pas du tout: tandis qu'un rapport affirme qu'en France la grande majorité des défauts constatés en

service sont dûs à l'humidité, un autre rapport constate qu'on ne connaît, en Norvège, aucun défaut dû à l'eau sur 12 000 km de câbles sous-marins et terrestres munis d'une simple gaine PVC sur un écran en fils de cuivre. Et il s'agit dans les deux cas du même isolant: le polyéthylène réticulé. En conséquence, les Français n'installent pas un mètre de câble sans gaine étanche et les Norvégiens continuent d'utiliser la construction traditionnelle, même à 150 kV.

Toutefois, les discussions de cette année à la CIGRE permettent peut-être d'expliquer de telles différences. Plusieurs essais concordent pour montrer que l'eau ne dégrade pas directement l'isolant, mais qu'elle agit en révélateur d'irrégularités qui existaient déjà dans l'isolation. Un effet bien connu de tous les observateurs est la formation bien visible d'arborescences dues à l'eau. Malheureusement, il faut bien constater aussi qu'on ne peut pas trouver de corrélation entre le nombre et la dimension de ces arborescences et la tenue diélectrique de l'isolation.

Cependant, une théorie semble se confirmer pour expliquer leur création et leur propagation. On peut la résumer ainsi: il existe, autour des impuretés solides, des microfissures que des observations microscopiques minutieuses permettent de déceler; comme la solubilité de l'eau dans le polyéthylène diminue quand la température s'élève, la vapeur d'eau se trouve chassée dans les fissures; le champ électrique y produit une ionisation locale qui favorise une condensation de la vapeur sursaturée: l'arborescence d'eau apparaît.

D'autres essais montrent que les contraintes mécaniques favorisent également la formation des arborescences; la considération des réseaux cristallins dans l'isolation permet d'expliquer cet effet par la même théorie, comme d'ailleurs la constatation de la bonne tenue de l'EPR en présence d'eau. La performance de ce câble sous-marin isolé au PRC, dont un rapport (21-06) nous apprend qu'il n'a révélé aucune baisse de ses qualités diélectriques après 10 ans de service sans gaine étanche, est probablement due à la qualité physique intrinsèque de l'isolation.

Ces idées relancent la discussion et pourraient indiquer d'autres moyens de lutte contre les effets de l'eau, soit la diminution des contraintes mécaniques et des impuretés dans l'isolant.

Il a d'ailleurs aussi été remarqué

qu'une gaine étanche autour d'un câble ne touche qu'à un aspect du problème: en effet, l'eau peut entrer dans l'isolation par cinq processus différents: elle peut déjà se trouver dans la matière première utilisée pour fabriquer le câble, isolant ou semi-conducteur; elle peut être introduite pendant la fabrication; elle se produit de toute façon par formation chimique lors de la réaction de réticulation; et finalement l'eau peut entrer après l'installation du câble.

3.3 Contrôle des câbles

Encore plus importante que les théories sur la diffusion de l'eau et la formation des arborescences est la question essentielle: par quel moyen peut-on constater qu'un câble haute tension à isolation synthétique n'est plus en parfait état? Une méthode classique est de prélever des échantillons et de faire des essais de claquage, au choc ou à 50 périodes. Ce système n'est évidemment pas applicable sur un câble déjà installé. Tout le monde cherche donc autre chose. Malheureusement, la réponse à cette question reste toujours la même: aucune des méthodes de mesure connues (décharges partielles, angle de pertes, etc.) ne permet d'apprécier le vieillissement d'un câble à isolation synthétique. Pourtant de très nombreux essais ont été cités, soit sur des câbles relevés après une longue période de fonctionnement, soit sur des câbles vieillis artificiellement pendant plusieurs années avec des cycles thermiques, avec et sans présence d'eau.

3.4 Durée de vie

Un autre point d'intérêt est le problème commun à tous les constructeurs: comment des *essais de courte durée* peuvent-ils permettre de prédire, avec une certitude raisonnable, la *durée de vie* d'un câble? Les théories statistiques, et celle de Weibull en particulier, ont été appliquées depuis de nombreuses années aux câbles extrudés. Il est trop tôt pour conclure à leur validité dans tous les cas et dire s'il est possible, avec une formule exponentielle simple, d'extrapoler à 50 ans des résultats d'essais ne portant que sur quelques mois. Cet outil de travail permet cependant des comparaisons utiles.

Deux faits donnent à penser que les déductions que l'on en tire sont probablement *pessimistes* (ce qui est rassurant au point de vue de la sécurité): les

progrès de la technique sont si rapides que le câble actuel ne correspond plus à celui qui a servi à établir la courbe de vie utilisée aujourd'hui, ce qui est en contradiction directe avec le désir légitime de vérifier ces théories par des essais à long terme. D'autre part, il est probable qu'il y a des *effets de seuil* dus en particulier à la dimension des particules et microvacuoles incluses et à la tension d'extinction des décharges partielles; il devrait donc en découler que la représentation de la vie du câble en fonction du gradient électrique appliqué n'est pas une courbe sans points d'inflexion.

3.5 Décharges partielles

En jetant un coup d'œil sur ces discussions à propos des essais et mesures de câbles haute tension à isolation synthétique, il faut remarquer qu'on ne parle presque plus des décharges partielles, alors que c'était un grand sujet d'intérêt il y a quelques années encore. C'est probablement dû au fait que les procédés de fabrication se sont améliorés au point qu'on ne rencontre plus que rarement des décharges partielles de valeur élevée. Elles ne posent donc plus de problème important et n'intéressent plus les chercheurs, d'autant plus qu'elles ne permettent pas d'apprécier la santé d'un câble, comme on vient de le voir.

3.6 Dilatation des câbles de gros diamètre

Une question qui a soulevé un certain intérêt est la dilatation des câbles de gros diamètre due à leur échauffement. Cette variation peut être de l'ordre de grandeur de plusieurs millimètres et doit être compensée par un matelas amortisseur sous la gaine.

Les deux techniques citées sont les rubans compressibles et les cannelures longitudinales élastiques, cette dernière construction semblant préférée. Pour des installations verticales, il faut des brides à ressort pour maintenir les câbles en polyéthylène réticulé, tandis qu'on peut se contenter de brides classiques pour le polyéthylène (échauffement moindre) et l'EPR (moins de dilatation et plus d'élasticité). Dans les courbes de trop petit rayon, si la température du conducteur est trop élevée, il peut se déplacer latéralement sous l'influence des forces exercées et réduire ainsi dangereusement l'épaisseur d'isolation.

Plusieurs orateurs ont cité des essais d'endurance, avec des cycles thermi-

ques, pour les câbles et leurs accessoires. Mais pour autoriser des comparaisons valables, on recherche une méthode d'essai normalisée reproduisant des conditions pratiques d'installation. Un groupe de travail de la CIGRE étudie cette question en essayant de tirer parti de toute l'expérience accumulée.

4. Câbles pour transport de grandes puissances

La problématique du transport de grandes puissances électriques par câble peut se présenter de deux manières différentes: si la ligne est relativement longue et que la charge atteint des valeurs élevées pendant une bonne partie du temps, on est conduit à limiter au maximum les pertes coûteuses en choisissant de hautes tensions, de grosses sections de conducteur et, si cela ne suffit pas, en installant plusieurs circuits en parallèle. Il y a cependant des cas où un refroidissement artificiel se justifie pour limiter le nombre de câbles.

Si, par contre, le tracé ne dépasse pas quelques centaines de mètres ou que la liaison fonctionne souvent à puissance réduite, le coût des pertes s'amenuise par rapport à celui de l'installation et il devient intéressant de recourir à un refroidissement forcé, c'est-à-dire à une évacuation artificielle des pertes Joules et diélectriques de façon à maintenir la température du conducteur dans des limites supportables par l'isolant.

Le refroidissement artificiel le plus simple consiste à intercaler des tuyaux de circulation d'eau entre les câbles; un tel système a déjà été utilisé en 1957 au Canada en liaison avec des câbles à huile 115 kV; récemment une installation de ce genre a été faite en Autriche pour transporter 1030 MVA à 400 kV.

On peut approximativement quadrupler le courant admissible en *plaçant les câbles dans un tube ou un caniveau rempli d'eau;* à 400 kV, les câbles du tunnel de la Severn, en Grande-Bretagne, peuvent transporter 2700 MVA.

Le refroidissement le plus efficace est évidemment celui qui se fait par *circulation d'un fluide à l'intérieur du conducteur.* Ce système, qui permet dans certains cas de découpler la capacité de transmission, n'a été utilisé jusqu'à présent que pour des circuits à moyenne tension, mais les études en cours (rapports 21-08 et 21-09) montrent qu'on peut atteindre 1500 MVA à 110 kV, 5000 MVA à 400 kV et 10 000 MVA à 1100 kV sur 250 m.

Le fluide utilisé pour le refroidissement dans le conducteur est en général l'huile même qui sert à l'isolation d'un câble à huile. On emploie parfois de l'eau qui permet une meilleure évacuation des pertes, mais entraîne de telles complications pratiques (séparation des fluides dans le câble, isolation aux extrémités) que son utilisation n'est adoptée que dans les cas où il n'y a pas d'autre solution techniquement possible. En cas d'arrêt de la circulation du fluide de refroidissement, l'échauffement du conducteur est plus rapide dans le cas de l'eau, car les pertes sont plus grandes.

Les puissances de transport possibles avec ces différents câbles à refroidissement forcé sont telles qu'elles couvrent largement les besoins prévisibles pour l'an 2000, dans tous les pays. Ceci explique l'abandon des recherches sur les câbles supraconducteurs et cryogéniques.

Un rapport intéressant décrit l'installation d'essai, à Suvereto, en Italie, de 200 m de câble à huile 1100 kV 2000 mm², qui a permis de confirmer une excellente concordance entre les échauffements mesurés et calculés, pour différents régimes thermiques, en tenant compte d'interruptions des refroidissements internes et externes. L'essai de durée en cours doit examiner des régimes cycliques avec 4400, puis 9900 MVA.

5. Câbles à isolation gazeuse

Pour des raisons pratiques de dimension et de rigidité des câbles, il n'est guère possible d'utiliser des

conducteurs de plus de 2500 mm². Au-delà, on en arrive aux tubes rigides en aluminium, soudés sur place les uns aux autres: c'est ce qu'on appelle les *câbles à isolation gazeuse.*

C'est donc une technique calquée sur celle des sous-stations blindées, isolées au gaz SF₆.

La longueur du tracé est limitée à quelques centaines de mètres, le diamètre à 50 cm environ et la puissance transportée atteint, dans un exemple cité, 1900 MVA à 275 kV. Si nécessaire, le refroidissement forcé est facile, puisque le conducteur est un tube.

Le premier système à 500 kV est installé cette année au Japon pour transporter 5400 MVA sur 140 m.

Du point de vue économique, deux études présentées à la CIGRE concordent pour indiquer que ce type de câble peut devenir une solution intéressante, en courtes longueurs, quand on a une tension dépassant 275 kV, avec un courant de 4000 A ou plus. On rejoint là les possibilités des câbles classiques avec refroidissement forcé dans le conducteur.

Une particularité de ces câbles est leur faible impédance caractéristique et leur faible atténuation en haute fréquence. Comme ils sont en général reliés à une ligne aérienne, le problème de la protection contre les surtensions est plus délicat que pour les câbles classiques. Avec l'installation de parafoudres aux deux extrémités du câble à isolation gazeuse, on arrive cependant à ce que les surtensions n'y dépassent pas de plus de 20% le niveau de protection des parafoudres.

6. Conclusion

En conclusion, on peut dire que cette session 1984 de la CIGRE a été très intéressante. Plus de 60 orateurs y ont apporté non seulement leurs idées, mais des indications précises sur des expériences ou des essais réalisés pour faire avancer les connaissances techniques. Les sujets et les questions proposés ont permis d'apporter des réponses valables sur des points assez divers dans le domaine des câbles de 60 kV et plus.