

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 51 (1960)
Heft: 24

Artikel: Les matières plastiques utilisées dans l'isolement des fils et des câbles
Autor: Senarclens, G. de
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-917093>

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: 16.03.2025

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)

Bericht über die 19. Schweizerische Tagung für elektrische Nachrichtentechnik

vom 16. September 1960 in Basel

An dieser Tagung, die gemeinsam mit der Vereinigung «Pro Telephon» organisiert wurde, nahmen rund 480 Personen teil. Es wurden folgende Vorträge gehalten:

1. Aufbau und Eigenschaften der Kunststoffe.
Referent: Prof. Dr. F. Held, Zürich.
2. Les matières plastiques utilisées dans l'isolation des fils et câbles.
Referent: Dr. G. de Senarclens, Breitenbach.

3. Anwendung von Kunststoffen in der Herstellung von Formstücken.
Referent: Dr. G. O. Grimm, Rapperswil.
4. Erfahrungen mit Kunststoffen.
Referent: Dr. H. Künzler, Bern.

Die Vorträge werden in zwangsloser Folge im Bulletin SEV veröffentlicht.

Turnusgemäss begrüßte Direktor W. Ehrat, Bern, Präsident der Vereinigung der «Pro Telephon», die Anwesenden und übergab dann den Tagesvorsitz an Prof. H. Weber, Zürich.

Les matières plastiques utilisées dans l'isolement des fils et des câbles

Conférence donnée à la 19^e Journée Suisse de la technique des télécommunications, du 16 septembre 1960 à Bâle, par G. de Senarclens, Breitenbach

621.315.616.9 : 621.315.33 + 621.315.211

Les plus importantes matières plastiques artificielles utilisées dans la fabrication des fils et câbles des télécommunications, d'une part comme isolants électriques, d'autre part comme protection mécanique et chimique, sont le chlorure de polyvinyle plastifié (PVC), les polyéthylènes et le polystyrène. Leur constitution, leurs propriétés, leurs avantages, sont décrits sommairement, puis l'évolution qu'elles ont subie pour permettre le remplacement des matériaux conventionnels: papier, caoutchouc, plomb. La question du fissurage des gaines de câbles en PVC ou en polyéthylène, sous l'effet combiné des contraintes mécaniques, des rayons ultraviolets et de substances chimiques est traitée spécialement. Les déboires conduisent la recherche vers des produits améliorés. Des plastiques nouveaux apparaissent également, notamment le polyéthylène irradié, le polypropylène, certains élastomères et des plastiques thermiquement stables.

Plastifiziertes Polyvinylchlorid (PVC), Polyäthylen und Polystyrol sind die wichtigsten bei Drähten und Kabeln der Fernmeldetechnik verwendeten Kunststoffe; sie dienen einerseits als elektrische Isolation, andererseits als mechanischer oder chemischer Schutz. Ihr Aufbau, ihre Eigenschaften, ihre Vorteile werden kurz beschrieben, ebenso ihre Entwicklung, die es erlaubt, sie anstelle der konventionellen Materialien, wie Papier, Gummi, Blei, einzusetzen. Auf die Rissbildung bei Kabelmühteln aus PVC oder aus Polyäthylen, die unter dem vereinten Einfluss mechanischer Beanspruchung, ultravioletter Strahlen und chemischer Substanzen auftreten kann, wird besonders eingegangen. Misserfolge führen zur Suche nach verbesserten Produkten. Neue Kunststoffe werden ebenfalls besprochen, so das bestrahlte Polyäthylen, das Polypropylen, gewisse Elastomere und wärmebeständige Kunststoffe.

A. Introduction

Il y a 125 ans, Faraday isolait ses appareils avec de la soie, du coton, du papier, du bois verni, des cires, de bitumes, de l'ambre, du soufre et du quartz. Les huiles, le caoutchouc et le mica étaient connus, mais peu utilisés. La gomme laque était employée sous forme de vernis. Un siècle plus tard, la situation n'avait pas changé d'une façon fondamentale. Les huiles isolantes étaient utilisées comme diélectriques et comme milieu réfrigérant. Quelques résines synthétiques avaient remplacé des résines naturelles, notamment la bakélite, dont on faisait des matières moulées et des stratifiés isolants. Mais ces matières

plastiques n'ont été choisies qu'en raison de leurs propriétés mécaniques. C'est une chance que leurs propriétés diélectriques aient été acceptables, car elles avaient été développées pour d'autres buts. Il en était d'ailleurs ainsi pour la plupart des isolants utilisés avant la guerre. On choisissait, parmi les matériaux existants, ceux dont les propriétés diélectriques étaient les meilleures et on les adaptait à une technique particulière.

La situation n'était pas différente dans l'isolement des câbles. La gutta percha, généralement développée de chatterton (mélange d'asphalte et de résine) et de chanvre, a été introduite en 1847 et n'a

pas complètement disparu. Les presses à plomb datent de 1879. Les câbles avec conducteurs isolés au papier et à l'air n'ont pas subi de changement important depuis 1892.

Des progrès ne pouvaient être attendus que de recherches fondamentales. Il fallait d'une part connaître la relation entre les propriétés d'un corps et sa constitution, d'autre part apprendre à faire un corps d'une constitution donnée, par exemple un haut polymère.

Les recherches ont été longtemps l'apanage des universités. Il n'en est plus de même aujourd'hui. Les grandes entreprises industrielles disposent de laboratoires remarquablement équipés. On y fait de la recherche pure sans but déterminé, mais on y fait aussi et surtout de la recherche scientifique dans le but d'obtenir un produit pour une application donnée. La plupart des matières plastiques, dont il sera question dans un instant, sont nées de ces recherches industrielles.

On sait aujourd'hui, grâce à elles, comment créer des macromolécules et quelle constitution il faut leur donner pour qu'elles aient de bonnes propriétés mécaniques et diélectriques. Les connaissances que l'on possède de leur chimie moléculaire et de leur mise en œuvre permettent, ou permettront, de les faire à peu près sur mesure.

Il faut reconnaître que rarement recherches scientifiques ont été conduites avec tant d'énergie et tant de succès. Le développement est extrêmement rapide et les produits sont devenus si nombreux qu'il est difficile d'en suivre l'évolution. Ce qui était vrai il y a quelques années ne l'est souvent plus aujourd'hui.

Il devient donc difficile d'introduire un nouveau plastique sur le plan industriel, puisque, au moment où des résultats d'essais pratiques sont connus, le plastique est le plus souvent dépassé par d'autres. On en est donc réduit à des essais de laboratoires accélérés, avec toutes leurs imperfections. Ils expliquent certaines désillusions, qui sont cependant, dans l'ensemble, tout à fait négligeables.

Le but de cet exposé est de vous présenter celles des matières plastiques qui ont trouvé une large application dans l'isolement des conducteurs électriques. Il ne peut être question de les décrire en détails. Je voudrais simplement donner sommairement quelques-unes de leurs propriétés, les comparer entre elles, faire ressortir leurs avantages et leurs inconvénients et, si possible, la tendance des chercheurs.

Ma tâche sera un peu facilitée par le fait qu'il y a peu de matières plastiques qui, tout en étant économiquement intéressantes, répondent aux exigences sévères imposées aux isolants de fils et câbles, exigences énumérées au tableau I.

Aucun isolant ne réunit la totalité des qualités désirables. Il en sera probablement toujours ainsi, parce que les exigences augmentent en même temps que les produits s'améliorent. Le choix devient donc un compromis dicté par des considérations techniques et commerciales.

Cependant, les plastiques utilisés actuellement dans l'isolement des conducteurs électriques ont tous des avantages appréciables sur les isolants qui les

Propriétés générales

Tous conducteurs

- a) souplesse à froid et allongement de rupture élevé
- b) stabilité chimique et physique jusqu'au moins 70 °C
- c) résistance à la compression
- d) fabrication et emploi simples et prix modéré
- e) pas de tensions mécaniques dans la couche de plastique
- f) gamme étendue de teintes
- g) incombustibilité

Propriétés spéciales

Conducteurs courants faibles

- a) constante diélectrique basse
- b) résistivité diélectrique très élevée
- c) faibles pertes diélectriques à toutes fréquences

Conducteurs courants forts

- a) rigidité électrique élevée
- b) résistivité diélectrique élevée
- c) faibles pertes diélectriques
- d) bonne conductivité calorifique

Enveloppe extérieure des fils et câbles

- a) parfaite résistance à l'eau
- b) très faible perméabilité à la vapeur d'eau
- c) résistance à l'oxydation, aux intempéries et à la lumière
- d) résistance à l'huile et aux agents chimiques du sol
- e) résistance aux moisissures
- f) résistance aux contraintes mécaniques
- g) résistance aux rongeurs
- h) faible poids spécifique

ont précédés. Ils ne sont pas hygroscopiques et sont extrêmement peu perméables à la vapeur d'eau. La résistance d'isolement des fils reste longtemps bonne, même si le manteau d'un câble devait être accidentellement détérioré. Les connexions sont plus faciles à établir, les épissures ne doivent pas être séchées. Les plastiques résistent mieux que le papier aux contraintes mécaniques. Beaucoup d'entre eux sont incombustibles. La gamme étendue de teintes facilite l'identification des circuits. Les manteaux de câbles sont beaucoup plus légers que le plomb. Le transport et le montage des câbles en sont facilités.

La mise en œuvre des plastiques est plus simple que celles du papier et du plomb. Le centrage du fil, indispensable dans les gros câbles, offre cependant certaines difficultés.

Il nous paraît nécessaire de vous rappeler ce que sont les plastiques avant de nous arrêter à ceux qui ont trouvé un emploi dans le domaine qui nous intéresse.

B. Les matières plastiques pour fils et câbles

I. Généralités

On a coutume de diviser les matières plastiques en

- a) Plastiques thermodurcis,
- b) Thermoplastes,
- c) Elastomères,

appelés aussi caoutchoucs vulcanisés. Les premiers gardent leurs propriétés mécaniques jusqu'à la température de décomposition, les seconds se ramollis-

sent lorsque la température augmente et reprennent leur état original au refroidissement, les troisièmes sont caractérisés par une grande élasticité.

Les matériaux thermodurcis ne sont pas utilisés dans l'isolement des câbles, parce qu'ils sont rigides et électriquement trop médiocres pour trouver un emploi dans les câbles coaxiaux. Nous n'en parlerons pas.

Les élastomères ne sont guère utilisés comme isolants des câbles des télécommunications. On les trouve quelquefois comme enveloppe extérieure, protection mécanique et chimique. Nous n'en parlerons que pour autant qu'une comparaison soit nécessaire, d'autant plus qu'ils ont été excellemment décrits par *H. M. Weber* dans le numéro 23 de novembre 1959 du Bulletin ASE.

Les thermoplastes sont utilisés en grandes quantités aussi bien comme isolants, que manteaux de câbles, que séparateurs des câbles coaxiaux. C'est d'eux dont nous allons parler.

Parmi les matières thermoplastiques du tableau II les plus utilisées dans les câbles sont le chlorure de polyvinyle plastifié et le polyéthylène. Le polystyrène est employé dans les câbles coaxiaux et le polyamide (Nylon) dans les fils de combats de différentes armées. Parmi les élastomères, il faut citer avant tout le caoutchouc butyle et, pour les enveloppes de câbles, le polychloroprène.

2. Chlorure de polyvinyle (PVC)

On sait que le chlorure de polyvinyle (PVC) se présente sous forme d'une poudre blanche, obtenue en polymérisant le gaz chlorure de vinyle en présence d'eau, d'un dispersant et d'un catalyseur de polymérisation. Suivant le procédé de polymérisation, ces produits subsistent dans l'isolant final. Le procédé de polymérisation joue donc un rôle prépondérant dans la qualité des produits obtenus, surtout des propriétés électriques.

Caractéristiques générales de quelques thermoplastes

Extraites de l'Encyclopédie des Isolants du Comité Technique 15 du CES

Tableau II

	Propriétés diélectriques						Propriétés mécaniques		Résistance à la combustion	Température max. admise en service	Résistance aux agents chimiques		
	Rigidité électrique	Résistivité transversale	Facteur de pertes tg δ de 50 à 10 ⁶ Hz	Pouvoir inducteur spécifique	Constance des propriétés diélectriques en fonction de la température	Constance des propriétés diélectriques en fonction de l'humidité	Résistance à la traction et à la flexion	Résilience			Eau	Huiles minérales froides	Agents oxydants (air, ozone, etc.)
Chlorure de polyvinyle, dur				3...5						75...90			
Chlorure de polyvinyle plastifié (contenant 15...50% de plastifiant)				4...9						75...90			
Polyéthylène				2,3						60...90			
Polystyrène				2,5						60...90			
Polytétrafluoréthylène (Téflon, Fluon, etc.)				2						180...225			
Polyamides (Nylon)				4...6						90...105			
mauvais	Méthode d'essai et unité	kV/cm	Ω cm				kg/cm ²				Absorption %		
excellent		< 25	< 10 ⁹	> 0,3			< 250				> 25		
dispersion entre les moins bonnes et les meilleures qualités		> 630	> 10 ¹⁶	< 0,0001			> 6300				< 0,2		

Les tableaux I et II présentent sous forme schématique les principales caractéristiques de quelques thermoplastes et de quelques élastomères utilisés pour isoler les conducteurs électriques. Ils sont extraits de l'Encyclopédie des Isolants rédigée par le Comité Technique 15 du Comité Electrotechnique Suisse [1]¹⁾.

¹⁾ Voir la bibliographie à la fin de l'article.

Pour l'isolation des conducteurs électriques, on doit utiliser un PVC qui a été, avant séchage, séparé du milieu aqueux au sein duquel la polymérisation a été effectuée et qui a été lavé pour le débarrasser des dispersants et des produits de décomposition des catalyseurs de polymérisation. On fabrique plusieurs variétés de résines de ce genre, qui diffèrent par leur poids moléculaire moyen.

Le PVC malaxé vers 150...160 °C se transforme en une masse plastique que l'on peut façonner à l'extrudeuse, à la calandre ou à la presse. On évite une altération du PVC sous l'effet de l'air, de la chaleur ou de la lumière, par l'addition d'un faible pourcentage de stabilisants.

Les produits obtenus de cette manière sont durs à température ordinaire. Ils peuvent être assouplis et profondément modifiés par l'adjonction de plastifiants, qui sont des liquides organiques, formant avec le PVC un gel colloïdal stable. En augmentant la quantité de plastifiant, on augmente la flexibilité et l'allongement de rupture et on diminue la température de fragilité, la résistance à la traction et la résistivité diélectrique.

Les isolants de fils et câbles contiennent tous des plastifiants. Ceux-ci étant nombreux, le choix est difficile. Les échecs du début sont dus à un choix malheureux, qu'on évite aujourd'hui.

Le PVC est en outre additionné de lubrifiants, pour faciliter le travail aux machines et de matières de charge diverses et de pigments pour faire varier la couleur et certaines propriétés, en particulier les propriétés diélectriques.

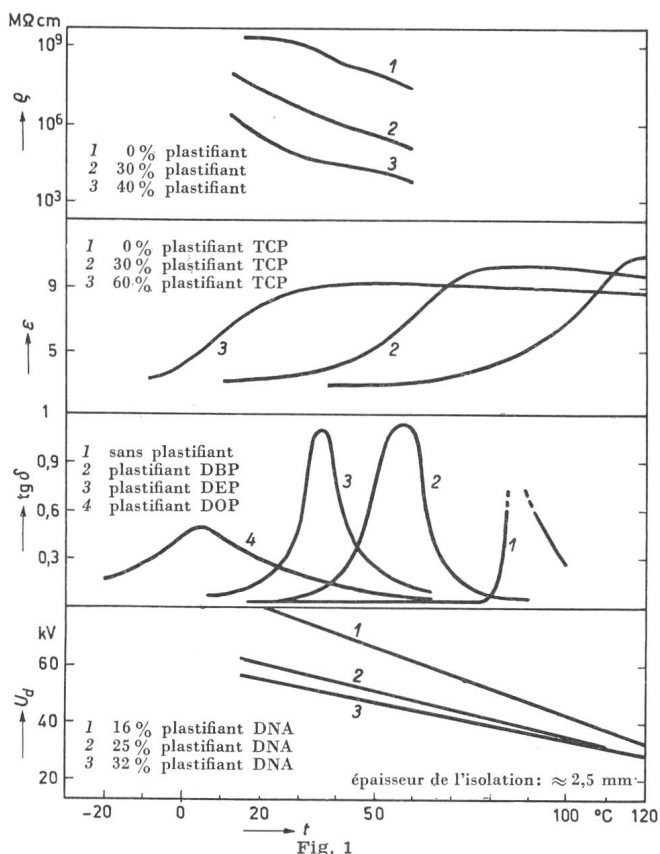


Fig. 1
Propriétés diélectriques d'isolations PVC en fonction de la température t

Épaisseur de l'isolation: environ 2,5 mm

U_a Rigidité diélectrique; $tg \delta$ Pertes diélectriques;

ϵ Constante diélectrique; ρ Résistivité; t Température

La fig. 1 montre que les propriétés diélectriques du chlorure de polyvinyle plastifié, comme d'ailleurs les autres propriétés, sont très fortement fonction de la température.

On y voit que la variation de la résistivité suit une droite dans l'échelle logarithmique. L'inclinaison de cette droite dépend du mélange. Une aug-

mentation de plastifiant provoque une translation vers le bas. La rigidité diélectrique varie d'une façon analogue. Le facteur de pertes $tg \delta$ et la constante diélectrique varient suivant une courbe, dont le maximum est à une température d'autant plus basse que le mélange est plus riche en plastifiant; la nature du plastifiant a également une influence très marquée.

On entend souvent dire que le PVC ne devrait pas être utilisé pour l'isolement des conducteurs pour distribution de courant continu en milieu humide. Ce n'est plus exact. O. Leuchs [2] a montré que les dégâts par courant continu étaient dus à une électrolyse, qui n'est possible qu'après une forte absorption d'eau. Celle-ci dépend d'une part des substances hydrophiles que l'isolant contient, d'autre part de la tension de vapeur environnante. Parmi les substances hydrophiles, il faut citer surtout les agents émulsifiants contenus dans certains types de PVC. Les plastifiants ne jouent pratiquement pas de rôle, par contre dans la perméabilité à la vapeur d'eau.

Pour qu'un mélange PVC résiste au courant continu, il faut donc qu'il résiste à l'eau. Ce problème est maintenant bien résolu, comme le prouvent les fils isolés au PVC employés dans les bobinages de moteurs immergés dans l'eau et, surtout, les gaines en PVC pour câbles de tous types.

Sans doute, les manteaux de câbles ont donné au début pas mal d'ennuis. Non seulement ils perdaient leur souplesse et changeaient de couleur au cours des mois, mais ils présentaient souvent des craquelures en surface, voire même se déchiraient sous une faible contrainte mécanique.

On imagina alors un appareil, appelé «Weatherometer» [3], qui reproduisait les conditions de service, en exposant les câbles aux effets alternés du soleil et de la pluie. Une semaine dans l'appareil correspondait assez bien à plusieurs mois de service dans nos régions. On découvrit alors que la dégradation du PVC sous l'effet de la chaleur ou de la lumière était due à une rupture des chaînes macromoléculaires à leurs points faibles. De l'acide chlorhydrique se dégageait, puis de l'oxygène se fixait sur les valences devenues libres. On constata qu'une résine affaiblie thermiquement devenait sensible à la lumière et vice versa.

On peut résoudre le problème des manteaux de câbles en PVC:

a) en utilisant une résine aussi pure que possible,
b) en introduisant des stabilisateurs de dégradation thermique,

c) en rendant le mélange impénétrable aux rayons lumineux avec des pigments appropriés et en introduisant des corps capables d'absorber les rayons ultra-violetts,

d) en choisissant des plastifiants peu volatiles, très compatibles avec le PVC et résistant à l'oxydation, souvent grâce à l'adjonction d'anti-oxydants.

Les isolants PVC ont donc atteint un stade qui permet de les utiliser dans les domaines les plus variés de l'électrotechnique, surtout dans l'isolement des fils et des câbles. Est-ce dire que tous les problèmes soient résolus? Sans doute pas, car chaque jour en apporte de nouveaux. Un des derniers en

date a été le fil isolé multicolore à dessin hélicoïdal, que l'industrie suisse a été la première à réaliser.

3. Polyéthylènes

a) Polyéthylènes haute et basse pression

On appelle polyéthylènes un groupe de plastiques crée en Grande Bretagne par les ICI. Ce sont des résines hydrocarbonées résultant de la polymérisation du gaz éthylène, sous très haute pression en présence d'oxygène, ou, plus récemment, sous basse pression, en présence de catalyseurs spéciaux.

isolant principal des câbles sous-marins et comme gaine extérieure des câbles téléphoniques, souvent mélangé à environ 10 % de polyisobutylène.

Cependant, là aussi les déboires ne furent pas épargnés. Les gaines exposées à la lumière et aux agents atmosphériques devenaient cassantes après quelques temps. Cette friabilité provenait d'une oxydation, accélérée catalytiquement par des radiations ultraviolettes. Le polyéthylène se dégradait. Les chaines macromoléculaires étaient rompues là où elles étaient ramifiées.

Caractéristiques générales de quelques élastomères

Extraites de l'Encyclopédie des Isolants du Comité Technique 15 du CES

Tableau III

	Propriétés diélectriques						Propriétés mécaniques		Résistance à la combustion	Températures limites d'utilisation °C	Résistance aux agents chimiques		
	Rigidité électrique	Résistivité transversale	Facteur de pertes tg δ de 50 à 10 ⁶ Hz	Pouvoir inducteur spécifique	Constance des propriétés diélectriques en fonction de la température	Constance des propriétés diélectriques en fonction de l'humidité	Résistance à la traction	Allongement à la rupture			Eau	Huiles minérales froides	Agents oxydants (air, ozone, etc.)
Caoutchouc naturel				2,7						- 45... + 70			
Butadiène-nitrile acrylique (GR-N)				13						- 20... + 120			
Polychloroprène (Néoprène)				6...12						- 35... + 90			
Polyisobutylène-isoprène (caoutchouc butyle)				2,6						- 40... + 120			
Polyéthylène chloro-sulfone (Hypalon)				5...8						- 20... + 110			
Silicones				4...5						- 60... + 180			
mauvais	Méthode d'essai et unité	kV/cm	Ω cm				kg/cm ²	%			Absorption %		
excellent		< 25	< 10 ⁹	> 0,3			< 40	< 100			< 25		
dispersion entre les moins bonnes et les meilleures qualités		> 630	> 10 ¹⁶	< 0,0001			> 200	> 500			< 0,2		

Lorsque les résines ne contiennent aucune charge, elles se présentent sous la forme d'un produit cireux, blanc et d'aspect translucide. Les propriétés particulières qui ont été présentées au tableau II, sont leur flexibilité, leur ténacité, leur résistance à l'eau et à l'humidité tout à fait exceptionnelle, leur inertie chimique et leurs propriétés électriques remarquables. Leur densité est inférieure à 1. Elles sont combustibles, si on n'y ajoute pas des adjuvants spéciaux.

Ces qualités en font un isolant électrique idéal, notamment pour les fils et les câbles. C'est aussi là qu'il a trouvé ses premières applications et la technique des radars n'aurait pas été possible sans lui. Elle a absorbé la presque totalité du polyéthylène pendant la guerre. Peu après, il fut introduit comme

L'étude au weather-o-meter et la mesure de la fragilité à basse température permirent de constater qu'on obviait à cet inconvénient en introduisant un pigment brun ou noir dans le polyéthylène, de préférence du noir de fumée. La nature et la grosseur des grains (< 25 μm), la proportion dans le mélange (environ 2 %) et une dispersion parfaite dans la masse revêtaient une grande importance. Une adjonction d'antioxydants, sans noir de fumée, n'était pas effective. C'est dire qu'on ne peut pas faire les manteaux en polyéthylène en n'importe quelle couleur.

On pensait être au bout de ses peines. Il n'en était rien. Les gaines, excellentes au weather-o-meter, se fissuraient fréquemment en service, le plus souvent sur la partie convexe d'un coude.

Les recherches systématiques permirent de constater que ces fissures étaient dues à l'action de substances chimiques à caractère polaire. En outre, lorsque la gaine était sollicitée polyaxialement, plus de 300 substances, notamment les hydrocarbures, les alcools, les huiles, certains savons, etc., provoquaient des fissures.

Il serait probablement faux de prétendre que ce sont les déboires précités qui ont conduit les chercheurs vers de nouveaux types de polyéthylènes. Quoi qu'il en soit, ces nouveaux produits ont donné la solution à bien des problèmes et ouvrent de nouveaux domaines d'application, déjà par le seul fait qu'ils résistent mieux à la température.

Quelques propriétés des principaux polyéthylènes
(valeurs approximatives et sujettes à modifications)

Tableau IV

	Types				
	ICI «haute pression»	Standard Oil Co.		Ziegler	Philips
		1	2		
Conditions de fabrication					
Catalyseur	Oxygène peroxydes	Oxyde de nickel sur charbon	Oxyde de molybdène sur oxyde d'aluminium	Alkyl d'aluminium Chlorure de titane	Oxyde de chrome sur oxyde d'aluminium
Pression kg/cm ²	1000...2000		30...100	0...30	80...100
Température °C	150...200		230	70	80...100
Propriétés					
Densité habituelle	0,92	0,94	0,95...0,97	0,96	0,96
Densités possibles	0,90...0,95	0,94...0,96	0,95...0,97	0,94...0,96	0,95...0,97
Cristallinité %	65	80	87	87	93
Ramification des chaînes	25	20	2	3	1,5
(groupes -CH ₃ - dans 1000 -CH ₂ -)					
Poids mol. moyen	50 000	100 000	300 000	300 000	300 000
Propriétés électriques					
Constante diélectrique	2,28	2,32	2,34	2,34	2,34
Résistivité Ωcm	> 10 ¹⁹	> 10 ¹⁹	> 10 ¹⁹	> 10 ¹⁹	> 10 ¹⁹
Propriétés mécaniques					
Dureté Shore	55	60	70	70	75
Résistance à l'allongement kg/cm ²	100	180	220...300	270	270
Température à laquelle la résistance à la traction atteint 200 kg/cm ²	- 15	+ 10	+ 50	+ 50	+ 50
Friabilité					→
Flexibilité	←				
Résistance au « stress cracking »					→

Quelques produits agissaient très rapidement. Cela permit des essais accélérés. On constata alors que le poids moléculaire du polyéthylène jouait un rôle déterminant. Pratiquement tous les polyéthylènes d'un poids moléculaire de 22 000 se fissaient. A 24 000, 40 % résistaient, à 27 000 96 %. A 29 000 il n'y avait plus de fissures. Ces résultats s'expliquent par le fait que la solubilité d'un thermoplaste diminue exponentiellement avec l'augmentation du poids moléculaire.

Mais des craquelures pouvaient également se former sans l'influence de substances chimiques agressives. Un allongement de 20 %, sous une sollicitation exercée en deux directions simultanément, pouvait suffire. C'est le phénomène du «stress cracking».

Il sortirait de cet exposé d'en expliquer les raisons. Relevons simplement qu'il provient de la structure même de certains polyéthylènes, du poids moléculaire et des ramifications dans la macromolécule linéaire. Il est avantageux d'augmenter le poids moléculaire et la densité, sans augmenter la grandeur des cristaux. Les copolymères éthylène-propylène et éthylène-butylène résistent mieux au fissurage. Une adjonction de polyisobutylène est avantageuse, parce qu'elle fait reculer le domaine cristallin [4].

On a tendance à désigner les produits anciens, qui sont encore de loin les plus utilisés, par «polyéthylènes haute pression» et les nouveaux par «polyéthylènes basse pression», les premiers ayant une faible densité, les seconds une densité plus élevée. Cette désignation n'est pas judicieuse, parce que les différents modes de fabrication permettent de varier la densité dans des limites assez larges. Ce serait mieux de différencier les polyéthylènes par leur densité, comme l'a proposé l'ASTM, à savoir:

densité basse	0,910...0,925
densité moyenne	0,926...0,940
densité haute	0,941...0,965
densité très haute	> 0,965

Il peut paraître anormal de traiter ici les différents types de polyéthylènes. Ils ont cependant une grande importance dans l'évolution future des isolations de câbles et, pour cette raison, ne peuvent pas être passés sous silence.

Le tableau IV groupe les principales propriétés des polyéthylènes actuellement à disposition. Les techniques de fabrication étant en pleine évolution, les valeurs indiquées ne sont pas définitives.

b) Polyéthylène irradié

Charlesby [5] a montré, vers 1952, qu'en soumettant un échantillon de polyéthylène au rayonnement mixte d'une pile atomique (rayons γ et neutrons), sa température de ramollissement augmentait progressivement jusqu'à l'infusibilité. Il résistait d'une façon continue à environ 130 °C et momentanée à 250 °C. Le module d'élasticité augmentait également, de même que la résistance à la traction, au «stress cracking», à l'oxydation et aux intempéries. Ses propriétés diélectriques n'étaient pas modifiées. Chauffé, un ruban de polyéthylène irradié se contractait de plus de 25 %.

Chapiro [6] obtint des résultats analogues avec des rayons γ et des rayons x et Lawton [7] avec des électrons.

On peut modifier ainsi les propriétés d'objets en polyéthylène, dans la masse ou en surface seulement, suivant l'intensité et la durée du rayonnement. On peut greffer sur le polyéthylène activé de cette manière d'autres substances chimiques, notamment des dérivés vinyliques.

Le mécanisme chimique de la réaction n'est pas exactement connu, mais on sait qu'elle est accompagnée d'une libération hydrogène et d'une formation de liaisons libres qui peuvent se fixer entre elles ou sur d'autres corps.

on peut le transformer en du polyéthylène mousse. En choisissant un gaz, dont la constante diélectrique est égale à 1, on obtient un polyéthylène mousse, dont la constante diélectrique se place entre 1,4 et 1,7, si la densité de ce polyéthylène est entre 0,440 et 0,600.

Etant donné que le polyéthylène mousse est constitué par 50 % de gaz, on peut facilement prévoir que certaines propriétés du polyéthylène seront affaiblies, tandis que d'autres seront améliorées. Le tableau V montre ces différences sur un fil isolé.

Un papier dense a une constante diélectrique de 2,5 à 3. Dans les câbles, avec tout l'air inclus, on peut compter avec une constante diélectrique de 1,5...1,6.

Trois matières plastiques ont des constantes diélectriques analogues: le polyéthylène, le tétrafluoréthylène (Teflon) et le polystyrène, qui ont en outre une rigidité diélectrique très élevée et une parfaite résistance à l'eau.

Le tétrafluoréthylène est d'un prix trop élevé. Pour les câbles téléphoniques le polystyrène est trop dur.

Le tableau VI présente d'après Windeler [8], les valeurs comparatives du papier et des polyéthylènes normal et mousse dans un câble isolé.

Propriétés générales du polyéthylène mousse

Tableau V

Caractéristiques	Polyéthylène normal	Polyéthylène mousse
Diamètre du fil isolé	6	6
Résistance à la traction à 23° C	150	45
Allongement de rupture à 23 °C	580	310
Rigidité diélectrique instantanée (sur 3 mm et par mm)	25 000	9000
Densité	0,92	0,47
Tangente de l'angle de pertes		
à l'état de livraison	1 000 Hz	0,00028
à l'état de livraison	10 000 Hz	0,00030
après 100 jours dans l'eau	1 000 Hz	0,0004
Constante diélectrique		
à l'état de livraison	1 000 Hz	2,3
à l'état de livraison	10 000 Hz	2,3
après 100 jours dans l'eau	1 000 Hz	2,3

En irradiant des conducteurs isolés au polyéthylène, on améliore donc l'ensemble des propriétés de l'isolant. Ce procédé est en voie d'introduction et on s'en promet généralement beaucoup.

c) Polyéthylène mousse

En mélangeant du polyéthylène avec un produit chimique sensible à la chaleur, qui libère un gaz à une température donnée (agent de gonflement),

Le polyéthylène mousse présente, techniquement parlant, un avantage certain dans les câbles à courants porteurs, la constante diélectrique étant identique à celle du papier et la constante d'affaiblissement étant plus basse à haute fréquence.

4. Polypropylène

Parmi les matières plastiques nouvelles qui pourraient être appelées à jouer un rôle important dans

Quelques valeurs mesurées sur un câble de 51 paires

Tableau VI

Isolation	Diamètre int. de la gaine mm	Capacité mutuelle F/km	Constante d'affaiblissement à 20 °C			Déséquilibre de capacité pf/500 m	Tension d'essai	
			1 kHz db/km	60 kHz db/km	150 kHz db/km		entre conducteurs kV	à la masse kV
Polyéthylène normal	23,3	0,051	0,77	2,80	4,27	108	10	10
Papier	20,3	0,052	0,78	3,07	4,75	325	0,7	1,4
Polyéthylène mousse	24,6	0,041	0,69	2,44	3,71	129	3	10
Papier	23,8	0,041	0,69	2,52	3,98	251	0,7	1,4

l'isolement des conducteurs électriques, il faut citer le polypropylène. Il est obtenu par polymérisation du gaz propylène, avec des méthodes analogues à celles employées pour le polyéthylène basse pression.

La molécule de propylène $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CH}_3$ n'est pas symétrique comme celle de l'éthylène $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$. La place du groupe $-\text{CH}_3$ dans la macromolécule peut varier (formes atactique, isotactique et syndiotactique) et, avec elle, beaucoup des propriétés du plastique.

On tend, pour l'isolement des câbles, vers la forme entièrement isotactique, c'est-à-dire dans laquelle tous les groupes $-\text{CH}_3$ sont du même côté. C'est

orienter les molécules, puis refroidi brusquement. Les fils et rubans fabriqués de cette manière sont beaucoup plus souples et résistants que le polystyrène avant l'étirage.

Le matériau orienté porte le nom de Styroflex. Il est utilisé couramment comme séparateur des câbles coaxiaux et dans les câbles à courants porteurs.

6. Tétrafluoréthylène: Teflon

Le tétrafluoréthylène a pratiquement les mêmes propriétés diélectriques que le polyéthylène et, en plus, une résistance thermique remarquable, qui

Comparaison des propriétés de quelques matériaux utilisés dans les gaines de câbles
Tableau VII

	Poids spécifique	Rigidité électrique	Propriétés mécaniques				Résistance chimique	
			Résistance au fluage	Résistance au pliage à froid	Souplesse	Résistance à l'abrasion	Résistance aux agents atmosphériques	Résistance aux produits du sol
Chlorure de polyvinyle plastifié (contenant 30...40 % de plastifiant)	1,2... 1,5							
Polyéthylène	0,91... 0,97							
Néoprène	1,5... 1,7							
mauvais excellent								

par le choix du catalyseur et des conditions de polymérisation qu'on y parvient. Il semble cependant que tous les problèmes ne soient pas résolus et qu'on ait quelque peine à fabriquer des plastiques toujours identiques.

Le polypropylène est intéressant au point de vue commercial et technique. Il résiste mieux à la chaleur que les polyéthylènes non irradiés. Sa température de ramollissement se place vers 160 °C. Il est plus cristallin que les polyéthylènes, donc plus dur et plus tenace. Il est plus sensible à l'oxydation et a tendance à devenir fragile vers -10 °C. Sa densité est de 0,90...0,91. Sa résistance à l'allongement atteint 300...400 kg/cm² et l'allongement de rupture 500...700 %.

Les propriétés diélectriques sont semblables à celles des polyéthylènes, avec une constante diélectrique un peu plus basse (2,0). On peut faire des polypropylènes insensibles au «stress cracking».

L'avenir du propylène pourrait bien être en copolymérisation avec d'autres monomères, par exemple l'éthylène.

5. Styroflex

Le polystyrène, connu pour la fabrication des objets de toutes formes, peut être étiré à chaud pour


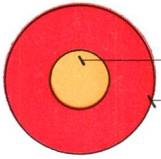
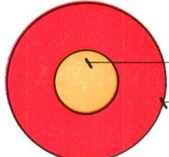
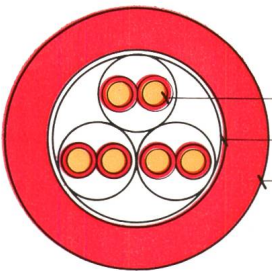
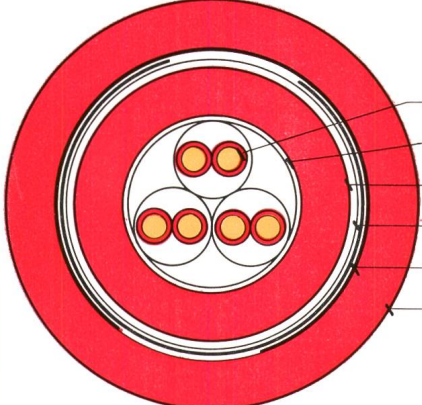
dépasse 200 °C, une totale incombustibilité et une grande inertie chimique. Malheureusement son prix élevé et la mise en œuvre difficile limitent son emploi à des applications particulières, notamment l'aéronautique et la marine.


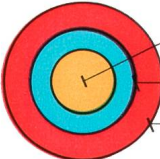
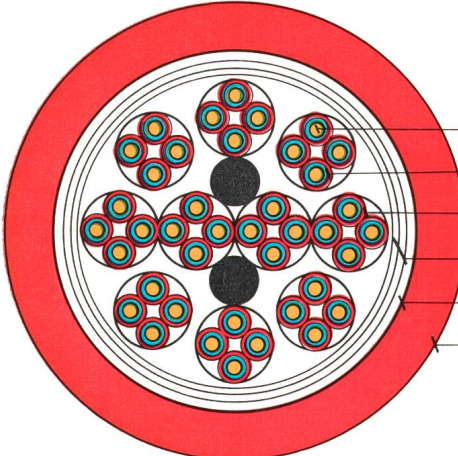
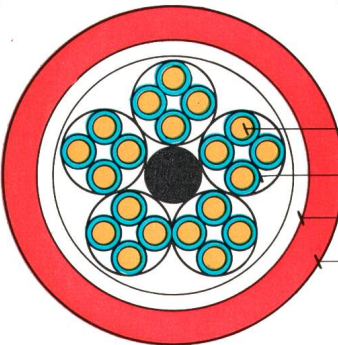
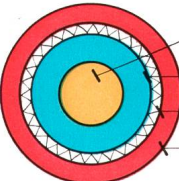
C. Remplacement du plomb des câbles par les plastiques

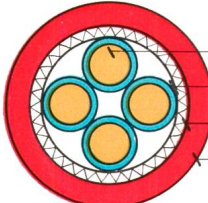

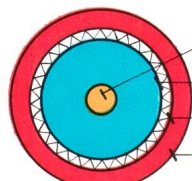
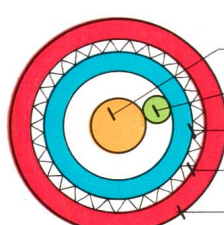
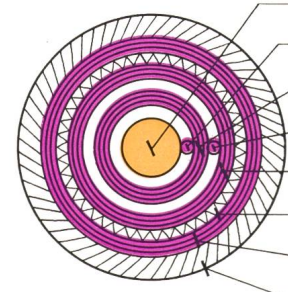
Nous venons de voir que le chlorure de polyvinyle plastifié, les polyéthylènes et certains élastomères sont utilisés dans les gaines de câbles. Est-ce dire qu'ils peuvent remplacer le plomb dans les câbles actuels?

La réponse est certainement non, si on ne procède pas à d'autres changements. Le plomb a, en effet, trois fonctions: il protège les câbles de la corrosion, ce que peuvent faire plusieurs plastiques, il évite la reprise d'eau par le papier, ce que ne peuvent pas faire les plastiques, parce que la perméabilité à la vapeur d'eau n'est pas nulle, il assure enfin une protection électrique, pour laquelle il faut un conducteur.

Les plastiques peuvent donc remplacer une partie du plomb des câbles actuels ou la totalité dans

Matières plastiques	Désignation et constitution des fils et câbles	But du plastique					Spécifications
		Isolation	Protection mécanique	Rendre incombustible	Protection chimique	Elément de construction	
I. Chlorure de polyvinyle	<p>Fil d'appareillage M 49</p>  <p>fil de cuivre isolation PVC</p>	●					PTT Tfl-2411-10./54
	<p>Fils d'installation J 51</p>  <p>fil de cuivre isolation PVC</p>	●					PTT Tf3-3566-8./52
	<p>Fils de distribution V 48</p>  <p>fil de cuivre isolation PVC</p>	●					PTT Tfg-1-2412
	<p>Câbles pour centraux téléphoniques Z 49 et câbles d'installation G 51</p>  <p>M 49 ruban de papier gaine PVC</p>	●		●			PTT Tfl-2411-10./54 PTT Tf3-3567-10./52
	<p>Câbles d'installation armés G 51-aT</p>  <p>M 49 ruban de papier gaine PVC ruban de coton feuillard d'acier plombé gaine PVC</p>	●		●	●		PTT Tf3-3567-10./52

Matières plastiques	Désignation et constitution des fils et câbles	But du plastique					Spécifications
		Isolation	Protection mécanique	Rendre incombustible	Protection chimique	Élément de construction	
II. Polyéthylène	Câbles Feeder 	●				●	
	Fil de connexion 	●		●	●		PTT L-1633
III. Chlorure de polyvinyle et polyéthylène	Câbles téléphoniques M 58 	●		●	●		PTT 25 a 76
	Câbles téléphoniques types F 	●		●			PTT et KTA (STM)
	Câbles coaxiaux 	●		●	●		différentes normes

Matières plastiques	Désignation et constitution des fils et câbles	But du plastique					Spécifications
		Isolation	Protection mécanique	Rendre incombustible	Protection chimique	Elément de construction	
<p>IV. Chlorure de polyvinyle et polyamide (Nylon)</p> <p>V. Mousse de polyéthylène</p> <p>VI. Polystyrène¹⁾</p> <p>VII. Tétrafluoréthylène (Teflon)</p>	<p>Câbles de microphone</p>  <p>litze de cuivre isolation PET écran statique gaine PVC</p>	●	●	●			différentes normes (application particulière)
	<p>Fil d'appareillage M 49 - Nylon</p>  <p>fil de cuivre isolation PVC gaine Nylon</p>	●	●	●			à l'état d'essai
	<p>Câbles coaxiaux</p>  <p>fil ou litze de cuivre polyéthylène mousse écran statique gaine PVC</p>	●	●	●		●	en voie d'introduction
	<p>Câbles haute fréquence</p>  <p>fil de cuivre émaillé spirale de Styroflex isolation PET écran statique gaine PVC</p>	●	●	●		●	différentes normes
	<p>Câbles coaxiaux haute fréquence</p>  <p>fil de cuivre argenté spirale TFE ruban TFE spirale TFE ruban TFE écran statique ruban TFE tressage de verre imprégné de silicone</p>	●	●	●		●	différentes normes

¹⁾ Le polystyrène est en outre utilisé sous forme de Styroflex dans beaucoup de câbles coaxiaux.

des câbles profondément modifiés. Les plus connus de ces câbles modifiés sont les câbles «Alpeth» et «Stalpeth» [9].

Le tableau VII donne une comparaison de quelques propriétés des matériaux utilisés en remplacement du plomb dans les câbles.

D. Conclusion

J'en arrive au terme de mon exposé. Il n'avait pas la prétention d'être complet et j'ai ignoré les silicones, les polyamides, le polyisobutylène et bien d'autres plastiques, de même que les fils émaillés, pour m'en tenir à l'essentiel. J'espère cependant avoir démontré que les recherches scientifiques dont je parlais au début, doublées de recherches technologiques, avaient donné des résultats extrêmement prometteurs.

En Suisse, grâce à l'initiative et la compétence des organes responsables des PTT, nous avons souvent pu montrer la voie. Beaucoup de plastiques ont trouvé leur place dans les conducteurs téléphoniques, comme le montre le tableau VIII.

Chaque pays industriel a fait son propre développement. Certaines réalisations sont très spectaculaires, par exemple les câbles téléphoniques transatlantiques, en service depuis 1956, dont l'isolant est un polyéthylène additionné de polyisobutylène [10].

Ce n'est là qu'un début, parce que la chimie des hauts polymères, notamment des copolymères, est en plein développement. Nul doute que nous connaîtrons ces prochaines années des réalisations au moins aussi intéressantes que celles que j'ai eu le plaisir de vous présenter.

Bibliographie

- [1] *Encyclopédie des isolants électriques*. Classification, tableaux synoptiques et feuilles signalétiques. Zurich: Association Suisse des Electriciens (ASE) 1958.
- [2] *Leuchs, O.*: Wasser- und Gleichstromfestigkeit von Polyvinylchlorid-Isolierungen. *Kunststoffe* t. 41(1951), n° 10, p. 309...320.
- [3] *Wallder, V. T.*: Polyethylene for Wire and Cable. *Electr. Engng.* t. 71(1952), n° 1, p. 59...64.
Wallder, V. T., W. J. Clarke, J. B. Decoste et J. B. Howard: Weathering Studies on Polyethylene. *Wire and Cable Applications*. *Industr. Engng. Chem.* t. 42(1950), n° 11, p. 2320...2325.
- [4] *Hopkins, I. L.*: Brittleness in Polyethylene. *Bell Labor Rec.* t. 36(1958), n° 1, p. 5...8.
Clegg, P. L., S. Turner et P. I. Vincent: Polyethylene-Mechanism of Fracture. London: Imperial Chemical Industries Ltd. 1958.
- [5] *Charlesby, A.*: The Effect of High-Energy Radiation on Some Long-Chain Polymers. *Plastics [London]* t. 18(1953), n° 190, p. 142...145.
Charlesby, A.: Effect of High-Energy Radiation on Long-Chain Polymers. *Letter in Nature [London]* t. 171(1953), n° 4343, p. 167.
- [6] *Chapiro, A.*: Radiations ionisantes et macromolécules. 2^e partie: Irradiation des polymères à l'état solide. *Industr. Plast. mod.* t. 9(1957), n° 1, p. 41...47.
Chapiro, A.: Radiations ionisantes et macromolécules. 3^e partie: Irradiation des solutions de polymères. Synthèse des copolymères greffés. *Industr. Plast. mod.* t. 9(1957), n° 2, p. 34...41.
- [7] *Lawton, Elliot J., J. S. Balwit et A. M. Bueche*: Properties of Irradiated Polyethylene. Effect of Initial Molecular Weight. *Industr. Engng. Chem.* t. 46(1954), n° 8, p. 1703...1709.
- [8] *Windeler, A. S.*: Polyethylene Insulated Telephone Cable. *Bell Syst. techn. J.* t. 32(1953), n° 5, p. 1245...1256.
- [9] *Haselhorst, H.*: Nachrichten-kabel und -leitungen mit Kunststoffen. *Siemens Z.* t. 32(1958), n° 4, p. 182...187.
- [10] *Swallow, J. C.*: The Use of Polythene in Submarine Cables. *Post Off. electr. Engrs. J.* t. 49(1957), n° 4, p. 305...307.

Adresse de l'auteur:

G. de Senarclens, D^r en chimie, directeur, Fabrique Suisse d'Isolants, Breitenbach (SO).