

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 72 (1946)  
**Heft:** 12

**Artikel:** Les silicones: leur utilisation dans la construction électrique  
**Autor:** Senarclens, G. de  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-54626>

### **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:** 02.02.2025

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

# BULLETIN TECHNIQUE

## DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

**ABONNEMENTS :**

Suisse : 1 an, 17 francs

Etranger : 20 francs

Pour sociétaires :

Suisse : 1 an, 14 francs

Etranger : 17 francs

Prix du numéro :

75 centimes

Pour les abonnements  
s'adresser à la librairie  
F. Rouge & C<sup>ie</sup>, à Lausanne.

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale.

**COMITÉ DE PATRONAGE.** — Président : R. NEESER, ingénieur, à Genève ; Vice-président : G. EPITAUX, architecte, à Lausanne ; secrétaire : J. CALAME, ingénieur, à Genève. Membres : *Fribourg* : MM. L. HERTLING, architecte ; P. JOYE, professeur ; *Vaud* : MM. F. CHENAUX, ingénieur ; E. ELSKES, ingénieur ; † E. JOST, architecte ; A. PARIS, ingénieur ; Ch. THÉVENAZ, architecte ; *Genève* : MM. L. ARCHINARD, ingénieur ; E. MARTIN, architecte ; E. ODIER, architecte ; *Neuchâtel* : MM. J. BÉGUIN, architecte ; R. GUYE, ingénieur ; A. MÉAN, ingénieur ; *Valais* : M. J. DUBUIS, ingénieur ; A. DE KALBERMATTEN, architecte.

RÉDACTION : D. BONNARD, ingénieur, Case postale Chauderon 475, LAUSANNE.

**Publicité :****TARIF DES ANNONCES**

Le millimètre

(larg. 47 mm.) 20 cts.

Tarif spécial pour fractions de pages.

En plus 20% de majoration de guerre

Rabais pour annonces répétées.



ANNONCES-SUISSES S.A.

5, rue Centrale

LAUSANNE

&amp; Succursales.

**CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE**

A. STUCKY, ingénieur, président ; M. BRIDEL ; G. EPITAUX, architecte ; R. NEESER, ingénieur.

**SOMMAIRE :** *Les silicones. Leur utilisation dans la construction électrique* par G. DE SENARCLENS, Breitenbach. — **DIVERS :** *Plantons des jalons* par J. TÂCHE, ingénieur. — *Au sujet de l'article « Plantons des jalons »* par JACQUES PASCHOUD. — **NÉCROLOGIE :** *Oscar Oulevey, architecte.* — **BIBLIOGRAPHIE.** — **COMMUNIQUÉS.** — **CARNET DES CONCOURS.** — **SERVICE DE PLACEMENT.**

## Les Silicones.

### Leur utilisation dans la construction électrique

par G. DE SENARCLENS, Breitenbach<sup>1</sup>.

#### Introduction.

Depuis quelques années, de nouveaux produits chimiques réalisés en Amérique, connus sous le nom de Silicones, font l'objet de maintes conversations techniques. De grandes espérances sont fondées sur leur utilisation et les résultats relevés au cours d'essais de laboratoire ou semi-industriels laissent espérer qu'ils amèneront une profonde transformation dans la structure des machines et appareils électriques.

Comme beaucoup de nouveaux produits, majeurs avant l'âge de raison, on se plaît à leur attribuer des propriétés universelles susceptibles de bouleverser une technique que les impatientes se plaisent déjà à qualifier de surannée. Ceci est parfaitement normal. Après la première guerre mondiale déjà, la résine bakélite avait également fait l'objet d'innombrables discussions entre techniciens désireux de combler de multiples lacunes auxquelles ils se heurtaient dans leur désir de progrès. A cette époque, la bakélite était loin de présenter sa forme actuelle et seuls quelques initiés en connaissaient les propriétés. Les défauts ne se sont révélés qu'au cours d'applications industrielles. Aujourd'hui, elle occupe une place prépondérante et si, contrairement à ce que l'on avait espéré un moment, elle ne s'est pas révélée comme un produit universel, elle a néanmoins permis la réalisation de multiples applications dont on ne saurait se dispenser à l'heure actuelle.

Il n'en sera sans doute pas autrement avec les Silicones, produits encore mystérieux en Europe. Leur excellente tenue à la chaleur, leur pouvoir agglomérant exceptionnel, leurs

propriétés diélectriques et leur résistance à l'humidité permettront de réaliser, en les associant aux textiles de verre ou d'amiante, des isolants extrêmement intéressants, conservant une grande souplesse après exposition de plusieurs centaines d'heures à une température de 200° C.

Nos renseignements ont été puisés en grande partie dans des périodiques américains et anglais, dans les publications de la société qui fabrique les Silicones et dans les brevets. Ils n'ont pas la prétention d'être complets et exempts de toute erreur. Ils seront sans doute corrigés au fur et à mesure que de nouvelles Silicones apparaîtront et ils devront être contrôlés par des essais pratiques dans nos usines. Nous croyons néanmoins qu'ils ont de l'intérêt et qu'ils permettront aux constructeurs suisses de se faire une idée de cette nouvelle réalisation américaine.

#### Généralités.

Les Silicones sont des composés organo-siliciques polymérisés à caractère résineux et dans lesquels les atomes de silicium se trouvent isolés les uns des autres dans la molécule de résine par d'autres atomes ou groupements atomiques dénués de silicium.

Leurs propriétés les placent entre les produits organiques et inorganiques. Elles ont la plasticité des composés organiques et une résistance à la chaleur se rapprochant de celle des composés inorganiques.

Les Silicones ont été réalisées pour la première fois au début de ce siècle par des chimistes anglais, sans toutefois atteindre des résultats pratiques. Les recherches furent abandonnées après bien des insuccès.

Récemment, la fibre de verre ayant pu être fabriquée industriellement en excellente qualité, le problème s'est posé de développer des vernis et des agglomérants nouveaux, doués d'une résistance à la chaleur telle que les qualités de la fibre de verre pourraient être pleinement utilisées. Chacun sait, en effet, que les vernis employés jusqu'à maintenant

<sup>1</sup> Cette étude a été publiée au n° 6, 1946, du *Bulletin de l'Association suisse des électriciens*, qui a bien voulu mettre à notre disposition les clichés des figures. (Réd.).

sont des composés organiques ne supportant pas une température de régime supérieure à 130° C. Il était donc grandement souhaitable de remplacer ces vernis par des composés qui permettraient d'augmenter sensiblement cette température de régime et, partant, d'augmenter la puissance d'un moteur de poids donné ou de diminuer son poids à puissance donnée.

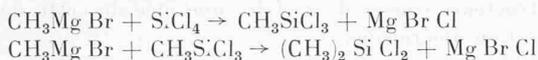
Les fabricants de fibres de verre étaient particulièrement désireux de donner à leur nouveau textile un produit résineux équivalent. Il ne faut donc pas s'étonner que ce soit le travail en commun d'une fabrique de produits chimiques, la Dow Chemical Co., et d'une fabrique de verre, la Corning Glass Co., qui donna les résultats espérés. Une nouvelle société, la « Dow Corning Co. », à Midland, Michigan, fut créée et c'est elle qui a réalisé les Silicones.

Le terme Silicones est une désignation générale qui couvre une quantité de dérivés organiques du silicium, dont les propriétés diffèrent parfois grandement d'un produit à l'autre. On y trouve une série de lubrifiants liquides, des graisses, des compounds, etc., tous produits ayant atteint leur état final, c'est-à-dire ne subissant pas de transformation sous l'effet d'une température élevée. Mais on y trouve également des résines, des vernis d'imprégnation, des enduits, des colles, des matières plastiques qui, pour atteindre toutes leurs qualités, doivent subir un étuvage prolongé à température élevée (150-250° C). On trouve enfin des isolants de toutes sortes constitués par des textiles de verre ou d'amiante, par du mica, etc., associés aux Silicones.

**Préparation chimique.**

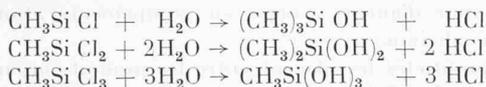
Il n'appartient pas à une telle publication de donner des détails sur la fabrication des Silicones. Il nous paraît toutefois intéressant d'en donner le principe, ne serait-ce que pour expliquer le prix très élevé de ces produits et enlever l'idée si répandue que les Silicones sont faites « avec du sable, de l'eau de mer, du charbon et des huiles ». C'est peut-être vrai, mais assurément un peu trop simplifié.

La préparation est faite à partir des halogénures de silicium, en solution dans un solvant incongelable, à basse ou à très basse température, et d'un ou plusieurs magnésiens de Grignard, dont le rôle est d'incorporer dans la résine les groupes choisis. Par exemple :



Les sels de magnésium sont séparés sous forme d'une masse granuleuse, en laissant les dérivés du silicium en solution.

On hydrolyse ensuite, de préférence à 0° C. Par exemple :



Les composés hydrolysés se polymérisent aisément par déshydratation, en donnant des produits de condensation initiaux solubles dans le solvant choisi, par exemple l'éther. On lave la solution pour éliminer l'acide, puis on concentre. On peut poursuivre la condensation et la polymérisation par un chauffage convenable.

Quand le produit de réaction est chauffé progressivement à 200° C pendant 24 heures, puis maintenu 48 heures à cette température, on obtient un solide clair, incolore, inodore, ayant la consistance de la corne. Cette substance est insoluble dans l'eau, l'alcool, le glycol, le tétrachlorure de carbone, etc. Elle est difficile à enflammer, brûle lentement en

laissant des cendres blanches de silice. On peut la chauffer à l'air à 200° C pendant plusieurs jours sans obtenir de décoloration, de fusion ou d'autres modifications, exceptée une fragilité un peu plus grande. A 300° C il se produit à l'air une oxydation qui désagrège le produit en 24 heures. Par contre, on peut chauffer à 550° C dans le vide pendant 20 heures sans désagrégation.

D'une façon tout à fait schématique, on peut présenter la préparation des Silicones selon la figure 1.

Il faut donc faire la différence entre les produits entièrement condensés, qui peuvent être utilisés tels quels, et les produits incomplètement condensés, fournis purs ou en solution, qui doivent être « cuits » pour acquérir toutes leurs qualités.

*Produits finis Silicones.*

- Fluides (DC 200, 500, 550, 700, 701, 702, 703, 710).
- Graisses (pour robinets, pour valves, pour vide poussé, pour paliers : DC 31, 33, 41, 44).
- Compounds (DC 4 et DC 7).
- Films.

*Produits intermédiaires Silicones.*

- Vernis (DC 993, 996, 2052).
- Résines (DC 801, 803, 2102, 2103).
- Masses plastiques Silastic :
  - a) série SR pour moulage et boudinage (SR 66, 67, 73, 74) ;
  - b) série SC pour enduits (SC 60, 69, 75).

Tous ces produits ont ceci de commun qu'ils résistent bien aux températures élevées, qu'ils ont une excellente tenue à l'eau et aux intempéries, qu'ils sont doués de bonnes qualités diélectriques, enfin qu'ils sont chimiquement inertes et sans effet physiologique.

Nous ne les décrivons pas en détail, parce que ce serait fastidieux et parce qu'ils subiront certainement des modifications au cours de ces prochains mois. Nous en donnerons tout simplement les caractères principaux.

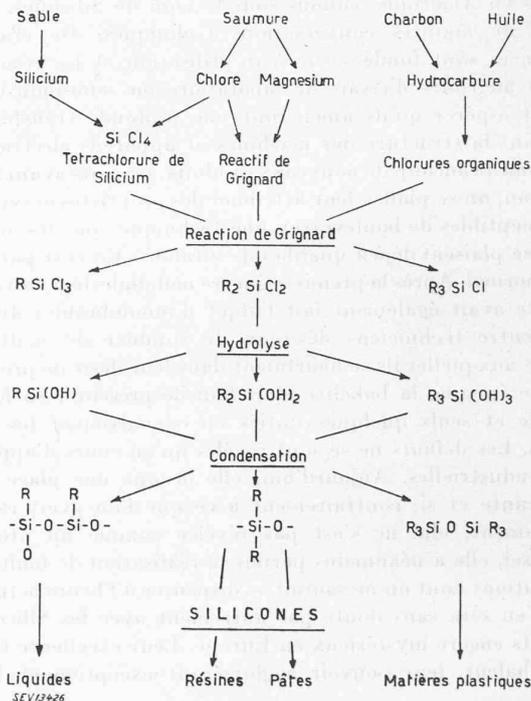


Fig. 1. — Représentation schématique de la préparation des Silicones.

**Produits finis.**

*Fluides.*

Les fluides DC sont des liquides incolores, inodores et chimiquement inertes. Ce fut une des premières classes de Silicones fabriquée industriellement. Avant la guerre ils étaient encore des curiosités de laboratoires. Aujourd'hui, ils ont fait leur preuve dans bien des applications.

Ils sont actuellement au nombre de 25. Leur viscosité varie de 0,65 à 1000 centistokes, leur température d'ébullition de 100° C à plus de 600° C, leur poids spécifique de 0,760 à 1,110. Les plus connus sont les fluides DC 200 et DC 500, livrés à 5, respectivement 7 viscosités différentes. Ils sont caractérisés par les propriétés générales suivantes :

Liquides clairs et limpides restant fluides à très basse température, viscosité changeant peu en fonction de la température (fig. 2),

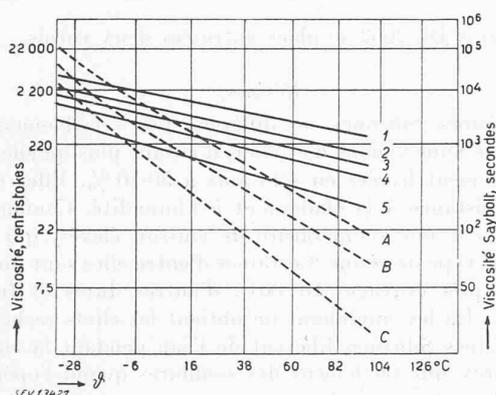


Fig. 2. — Variation de la viscosité de fluides Silicones (1—5) et d'huiles minérales (A—C), en fonction de la température.

stabilité à chaud, réaction neutre, inertie chimique, sans effet corrosif sur les métaux,

température d'inflammation plus élevée que celle du pétrole, à fluidité égale,

mouillent la surface du verre, de la céramique et des métaux ; les rendent hydrophobes,

excellente résistance aux agents oxydants, aux acides et à beaucoup de solutions corrosives,

pas d'action dissolvante sur les caoutchoucs naturels et synthétiques ou sur les matières plastiques, même à température élevée,

insoluble dans l'eau et les alcools aliphatiques à point d'ébullition bas (méthanol, alcool isopropylique, etc.). Partiellement miscibles avec le butanol, les essences minérales, le dioxane. Miscibles avec la plupart des solvants organiques non polaires (benzol, toluène, xylol, solvant naphtha, trichloréthylène, etc.),

non volatiles, sauf les fluides ayant une viscosité très basse ; tension de vapeur négligeable jusqu'à 200° C,

constante diélectrique très basse. Faible facteur de pertes à toutes fréquences. Bonne rigidité électrique, à savoir 10 000 à 12 000 V/mm. Résistance d'isolement : 1.10<sup>14</sup> ohms/cm.

fréquence Hz	constante diélectrique à 25° C	facteur de pertes à 25° C
10 <sup>3</sup>	2,85	0,0001
10 <sup>6</sup>	2,83	0,0002
10 <sup>7</sup>	2,82	0,0002
10 <sup>8</sup>	2,81	0,0006

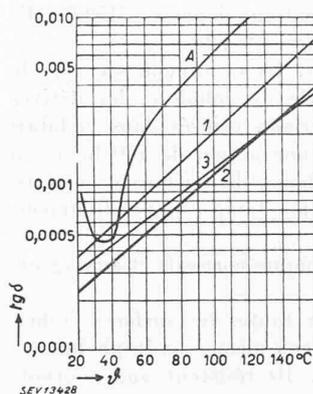


Fig. 3. Facteur de pertes tg δ en fonction de la température θ.

- A Huile de transformateurs 15 cs
- 1 Fluide Dc 500, 20 cs
- 2 Fluide Dc 500, 50 cs
- 3 Fluide Dc 200, 500 cs

La chaleur spécifique est d'environ 0,35-0,37.

Ils sont sans effet physiologique.

Les fluides DC ont trouvé leur application principale comme lubrifiants (pression faible), comme transporteurs de chaleur, dans la construction des amortisseurs, des pompes et des freins hydrauliques.

Leurs excellentes qualités diélectriques permettent de les utiliser en lieu et place des huiles de transformateurs et de disjoncteurs, qu'ils dépassent grandement dans leur tenue à la chaleur. La figure 3 donne une comparaison entre les facteurs de pertes d'une huile de transformateurs et de différents fluides DC, en fonction de la température.

*Graisses.*

Les graisses DC sont des Silicones étudiées spécialement pour le graissage des robinets, valves, paliers, etc., soumis à des températures particulièrement élevées, à des agents corrosifs ou à la vapeur d'eau. Elles ne durcissent pas à basse température (—35° C) et ne coulent pas à haute température (200-280° C).

Elles sont caractérisées par une tension de vapeur très faible jusqu'à 200° C, ce qui permet d'éviter la souillure des produits qui les environnent. Elles n'ont pas d'action corrosive sur les métaux et les matières plastiques. Elles résistent aux agents oxydants.

Elles seront d'une grande utilité pour le graissage des paliers des machines électriques isolées aux Silicones.

Certaines d'entre elles sont noires et peu isolantes, d'autres brunâtres, très isolantes, mais un peu moins résistantes à la chaleur.

*Compounds.*

Les compounds DC représentent un matériel d'isolation imperméable, stable à chaud, destiné à l'obturation des dispositifs d'allumage des moteurs d'avions et à l'équipement des appareils radio et radar et des appareils oxygène.

Ils sont caractérisés par les propriétés générales suivantes : Ils résistent à l'humidité, ne sont pas hygroscopiques et assurent l'étanchéité parfaite des appareils.

Ils sont homogènes, incolores, d'emploi facile.

Ils ne durcissent ni ne fondent et ne se fissurent pas entre —40° C et + 200° C. Toutefois, ils ont tendance à couler lentement au-dessus de 200° C. On peut ainsi réparer les fissures qui se seraient formées dans une bougie d'allumage. Ils ne sèchent pas à l'air et ne s'épaississent pas sous l'effet prolongé d'une température élevée.

Ils sont solubles dans beaucoup de solvants organiques, tels que la gazoline, le benzol et le tétrachlorure de carbone. Ils sont insolubles dans les huiles minérales, les antigel et l'eau.

Leur température d'inflammation dépasse 315° C. Ils brûlent lentement avec une flamme blanche.

Ils sont chimiquement inertes. Ils ne ramollissent pas le caoutchouc, le néoprène, l'éthyle de cellulose, les dérivés vinyliques ou tous autres matériaux utilisés dans la fabrication des câbles, même après une action de 100 heures à 150° C. Appliqués sur le caoutchouc, ils améliorent sa résistance au vieillissement, en même temps qu'ils diminuent l'effet corona.

Ils résistent aux produits chimiques corrosifs et aux agents oxydants.

Ils mouillent et adhèrent sur toutes les surfaces sèches, métalliques ou non, mais sont eux-mêmes hydrophobes.

Ce sont d'excellents isolants. Ils résistent aux courants de fuite.

Ils n'ont pratiquement pas d'effet physiologique. Toutefois, ils peuvent avoir une action irritante sur les yeux, qui apparaît quelques heures après la manipulation pour disparaître généralement après une nuit. Cette irritation ne provient pas des vapeurs, mais d'un contact direct.

Ils ont un faible coefficient de dilatation.

Ils peuvent être fabriqués pratiquement à toutes viscosités, du pétrole léger à la graisse consistante. Ils sont livrés habituellement à l'état visqueux et très visqueux (médium et épais).

Leur poids spécifique est 0,98-1,00, le coefficient de dilatation par degré C, mesuré de 0° C à 150° C, est 0,020-0,025 %. Pénétration 24-40.

Leurs qualités diélectriques sont excellentes :

Constante diélectrique à 1000 Hz	2,8
Facteur de pertes, à 1000 Hz, $\text{tg } \delta =$	0,06...0,07
Tension de percement	20 000 V/mm
Essai de résistance à l'arc (ASTM 149-41)	80 s
Résistance à l'étincelle	
1500 étincelles par seconde	bon après 2 h
8800 étincelles par seconde	brûle après 10 s
Résistance d'isolement	
à 20° C	$1 \cdot 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$
à 200° C	$1 \cdot 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$

#### Films.

On peut fabriquer également des films entièrement en Silicones, d'une épaisseur variant entre 0,025 et 0,10 mm. Ils ont ceci d'intéressant qu'ils gardent leur flexibilité à 150-175° C et ne carbonisent pas aux températures élevées. Il est vraisemblable qu'ils trouveront une certaine application dans la fabrication des condensateurs et pour l'isolation des bobinages.

### Produits intermédiaires.

#### Vernis.

Les vernis Silicones sont incontestablement des produits extrêmement intéressants qui trouveront sans doute des applications immédiates dans la fabrication du matériel isolant et dans le traitement des machines électriques. Ce sont, en effet, les seuls vernis connus capables de résister à une température continue de 175-200° C. Ils sont destinés avant tout à imprégner ou enduire les composés à base d'amiante ou de textiles de verre, à fixer la soie de verre et l'amiante sur les conducteurs, à coller le mica sur la soie de verre et l'amiante, enfin à imprégner ou recouvrir les bobinages électriques.

Ils permettent d'assurer une protection efficace contre les surcharges, d'augmenter la vie des machines travaillant dans des conditions défavorables, d'élever la température ambiante, même en milieu humide, de réduire les dimensions et le poids

des machines électriques, enfin d'éliminer les possibilités d'inflammation par défaut d'isolement.

Le traitement des bobinages se fait suivant les méthodes habituelles, au trempage, sous vide et pression, au pistolet, etc., à la seule différence près que la température de séchage est beaucoup plus élevée que pour les vernis habituels. Il est donc nécessaire de disposer d'étuves atteignant au moins 200° C.

Caractéristiques	DC 993	DC 996
Extrait sec	50 %	60 %
Densité à 25° C	1,005	1,050
Viscosité à 25° C, en poises	1...2	2...5
Durée de séchage. Films de 0,05 mm sur clinquants aluminium		
à 250° C	1...3 h	—
225° C	6...15 h	—
150° C	—	1...4 h
Tens. de percement, par 0,01 mm	600...800 V	600...800 V
Constante diélectrique, à 1000 Hz	3,5	3
Facteur de pertes, à 1000 Hz,		
$\text{tg } \delta =$	0,007	0,007

Le vernis DC 2052 se place entre ces deux vernis.

#### Résines.

Les résines Silicones ne diffèrent pas sensiblement des vernis que nous venons d'étudier, d'autant plus qu'elles sont habituellement livrées en solutions à 50-70 %. Elles ont la même résistance à la chaleur et à l'humidité. Comme eux, elles exigent une température de cuisson élevée, qui varie suivant le type de résine. Certaines d'entre elles sont dures et souples après étuvage (DC 801), d'autres dures et friables (DC 803). En les combinant on obtient les effets recherchés.

Les résines Silicones libèrent de l'eau pendant la cuisson, ce qui provoque facilement des soufflures quand l'opération est conduite trop rapidement.

Elles peuvent être pigmentées et siccativées avec du manganèse ou du cobalt.

Elles ont trouvé une application dans la fabrication des stratifiés à base de textiles de verre, fabrication particulièrement délicate, mais qui, bien conduite, permet de réaliser des produits intéressants. Qu'on en juge :

Résistance à la flexion à 25° C	2170...2320 kg/cm <sup>2</sup>
Absorption d'eau à 25° C	
immersion 24 heures	0,15...0,30 %
immersion 1 semaine	0,30...0,50 %
Constante diélectrique à 25° C, à 1 MHz	
à 50 % d'humidité	4
après 24 heures d'immersion	4,2
Facteur de pertes à 1 MHz	
à 0 % d'humidité relative	$\text{tg } \delta = 0,003$
à 50 % d'humidité relative	$\text{tg } \delta = 0,0035$
après 24 heures d'immersion	$\text{tg } \delta = 0,005$
Facteur de pertes après étuvage de 24 h à 250° C, puis immersion dans l'eau	$\text{tg } \delta = 0,013$

Il est probable que les résines Silicones pourront être utilisées un jour pour l'isolement des conducteurs métalliques.

#### Masses plastiques Silastics.

Les Silastics, masses plastiques à base de Silicones, constituent le dernier groupe de produits mis au point dans les laboratoires de recherches de la Dow Corning Co. Ils forment un complément intéressant aux matières plastiques organiques, telles que le caoutchouc, le chlorure de polyvinyle et les copolymères.

Il était nécessaire de mettre sur le marché des produits supportant une température continue de 125° C sans se ramollir et sans vieillir. Les Silastics sont les premières réalisations intéressantes. Ils peuvent être utilisés jusqu'à une

température de régime de 150° C et passagère de 250° C. Ils sont flexibles à très basse température.

A vrai dire, nous ne pensons pas que les produits mis actuellement à disposition par la Dow Corning Co. soient sous leur forme définitive. Leurs propriétés mécaniques sont insuffisantes, principalement la tension de rupture et la résistance à l'allongement.

Il existe deux genres de Silastics : les Silastics SR pour le moulage, l'injection et le boudinage, et les Silastics SC pour l'enduction.

#### Silastics SR.

Ils se présentent sous la forme de feuilles genre crêpe, parfois légèrement poissantes. Ils contiennent habituellement de l'oxyde de titane qui leur donne une teinte blanche.

Le mode d'emploi est beaucoup plus compliqué que celui des matières plastiques habituelles, en ce sens que le moulage et le boudinage se font à froid et doivent être suivis d'une cuisson prolongée à haute température, dans un moule, dans un autoclave de vulcanisation ou une étuve à air chaud. Cette cuisson dure 10 heures, à savoir : 1 heure à 80° C, 1 heure à 90° C, 2 heures à 110° C, 2 heures à 130° C et au moins 4 heures à 150° C. Elle est d'autant plus difficile à réaliser que la masse boudinée est extrêmement tendre. Ce sont là des difficultés passagères. Voici, à titre documentaire, les caractéristiques de deux Silastics :

	SR 66	SR 67
Dureté Shore	75...80	70...75
Tension de rupture, kg/cm <sup>2</sup>	25,7	24
Constante diélectrique,		
à 1000 Hz	7,5	7,2
à 1 MHz	8	7,5
Tension de percement, V/mm	20 000	20 000
Facteur de pertes, à 1000 Hz	tg δ = 0,009	0,005
à 1 MHz	tg δ = 0,002	0,0013

#### Silastics SC.

Ils se présentent sous forme de pâtes, libres de solvants, ayant à peu près la consistance de la vaseline. Ils sont appliqués généralement à la râcle ou au rouleau, mais peuvent également être dissous dans des hydrocarbures aromatiques ou des essences de pétrole très légères pour l'application par trempage ou au pistolet.

Les Silastics SC adhèrent fortement sur le verre et la plupart des métaux. On peut obtenir ainsi des revêtements très résistants à la chaleur, à l'humidité et aux agents chimiques.

Les Silastics SC doivent également subir une cuisson à haute température, dont la durée dépend de l'épaisseur du film, de la nature du support et du Silastic utilisé. Elle se fait à l'air, dans un gaz inerte ou dans la vapeur d'eau surchauffée.

Les Silastics SC 60 et SC 63 ont trouvé une application intéressante dans la fabrication des stratifiés armés, employés principalement comme matériel de calage. L'armature est constituée par des textiles de verre, par des tissus métalliques, voire même par des feuilles de métal. On a pu réaliser ainsi des membranes et des plaques parfaitement stables entre -40° C et +150° C.

Nous croyons savoir que les feuilles d'aluminium assemblées en plaques épaisses, dont on a parlé récemment dans la presse technique, étaient obtenues par collage au Silastic SC.

Le Silastic SC 75 a été employé pour recouvrir les résistances électriques, classe 1.

#### Isolants Silicones.

On entend par « Isolants Silicones » des isolants stables à haute température, contenant un certain pourcentage de

Silicones, généralement un vernis ou une résine. On a employé en Amérique les produits suivants :

1. Tissus de verre verni, largeur 45 cm, épaisseur 0,10-0,68 mm.

2. Tissus de verre recouverts de splittings de mica agglomérés aux Silicones. Feuilles de 45 × 90 cm, épaisseur 0,20, 0,25 et 0,35 mm.

3. Fils conducteurs enrobés de soie de verre, agglomérés aux Silicones. Toutes dimensions.

4. Ciments Silicones.

5. Rubans micacés à la soie de verre. Toutes épaisseurs de 0,18-4,3 mm.

6. Rubans de soie de verre, en largeur de 2,5 cm et 0,35 mm d'épaisseur.

7. Tissus d'amiante traités aux Silicones. Feuilles 90 × 90 cm, épaisseur 0,9 mm.

#### Quelques essais faits avec les Silicones.

Bien des essais ont été faits en laboratoires pour contrôler la résistance à la chaleur des Silicones. Leur énumération serait longue. Qu'il nous soit permis de les résumer ainsi :

1. Des tissus de verre ont été traités d'une part avec un bon vernis classe B, d'autre part avec le vernis Silicone DC 993.

Après 24 heures à 205° C, le vernis Silicone avait gardé toute sa flexibilité. Après 2 heures le vernis classe B avait foncé fortement et était devenu friable. De 200 à 250° C les vernis Silicones suivent bien la « règle de 10° C », à savoir une augmentation de 10° C réduit de moitié la durée de vie du vernis.

2. Des essais de tenue à l'eau montrent que les Silicones ont la même résistance que les meilleurs enduits de caoutchouc vulcanisé. Toutefois, après un mois d'action à 200° C, les films organiques sont détériorés et poreux, tandis que le film de Silicones résiste parfaitement.

3. Les essais de tenue à chaud suivent les normes modifiées de l'A. S. T. M., à savoir l'application d'une couche de 0,05 mm de vernis sur chaque côté d'un clinquant d'aluminium et la mesure de sa flexibilité avec un appareil Erikson, après un étuvage prolongé, ont donné les résultats enregistrés dans le graphique figure 4. Le vernis organique était à base de résines synthétiques du type phénol-alkydes. On mesure le temps qu'il faut, à différentes températures, pour que le vernis se fendille après un allongement de 14 %, puis 12, 10...2 %.

Les mesures faites ont démontré qu'un vernis Silicone résistait jusqu'à 500 fois mieux aux températures élevées qu'un bon vernis organique.

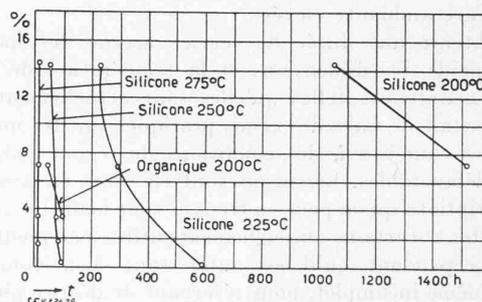


Fig. 4. — Résistance à l'allongement de différents vernis, silicones et organiques, après un étuvage prolongé à température élevée.

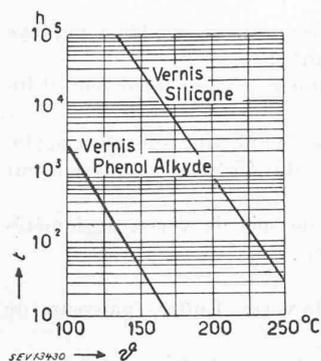


Fig. 5.  
« Vieillesse »  $t$  d'un vernis organique et d'un vernis silicone, appliqués sur un fil de cuivre, en fonction de la température  $\theta$  (on a mesuré le temps qu'il fallait pour que le vernis montre des fentes après un allongement du fil de 3 %).

Il est intéressant de constater que les vernis suivent bien la loi de Montsinger<sup>1</sup>.

4. Un essai très exact de la résistance d'un vernis à haute température peut être fait en appliquant le vernis sur un fil de cuivre, puis en faisant des essais périodiques d'allongement du fil après exposition à haute température. Ils ont démontré qu'il fallait 6954 heures à 150° C pour qu'un fil de cuivre émaillé montre des craquelures de l'isolation après allongement de 9 %. Un vernis organique est fendillé après 240 heures. A 200° C, le vernis Silicone se fendille après 215 heures si on l'allonge de 3 % ; le vernis organique résiste 2 heures.

On voit dans la figure 5 que le vieillissement d'un vernis organique est après 50 heures le même que celui du Silicone après 30 000 heures.

Ces essais démontrent clairement que les Silicones résistent sensiblement mieux aux températures élevées que les vernis organiques. On peut estimer qu'aux températures de régime habituelles, ils résisteront 20 à 100 fois plus longtemps, ou qu'ils permettent d'augmenter cette température de 50 à 75° C.

#### Emploi des résines Silicones dans l'isolation des machines électriques.

On sait depuis longtemps que la tenue à chaud des isolants d'une machine électrique a une importance primordiale, ou, exprimé différemment, que la température de régime est un des facteurs les plus importants dans la vie d'une machine électrique.

Le développement des Silicones est une étape dans l'évolution des isolants et, associées aux textiles de verre, d'amiante ou au mica, elles sont appelées à jouer un rôle de premier ordre dans la construction électrique. Elles devraient permettre :

1° de réduire le poids et les dimensions de bien des machines électriques ;

2° de placer les machines électriques également dans une température ambiante élevée ;

3° d'obtenir une durée de service accrue des machines dont le poids, les dimensions et la température de régime seraient maintenues telles qu'elles sont actuellement.

Il importait de faire des essais pratiques sur des machines électriques soumises à des conditions de régime particulièrement défavorables. Les essais sont en cours en Amérique. Les descriptions qu'on peut en trouver sont malheureusement incomplètes et certains renseignements utiles manquent. Nous pensons cependant qu'il est intéressant d'en donner un aperçu, même incomplet, nous réservant de décrire plus tard les essais des constructeurs européens.

<sup>1</sup> *Transformers by Temperature*. Amer. Inst. Electr. Engrs. Transactions, vol. 49 (1930), p. 776-792.

#### Essais sur bobinage d'induit.

Les premiers essais ont été faits sur des sections d'induit isolées différemment.

Le bobinage, type génératrice à courant continu, était constitué par 4 groupes de 3 sections, montés sur le même noyau de fer. Il a été soumis à de violentes vibrations et à de sévères épreuves thermiques.

Chaque section était composée de 2 demi-sections formées par 4 spires de fil de cuivre  $2,2 \times 4,4$  mm, isolé à la soie de verre imprégnée.

L'isolant d'encoches était en micanite pour les groupes 1 et 3 et en mica-soie de verre pour les groupes 2 et 4.

Les sections de groupes 1 et 3 étaient isolées au ruban d'amiante, celles des groupes 2 et 4 au ruban de soie de verre. Les sections des groupes 1, 2 et 3 étaient imprégnées avec un vernis organique synthétique et celles du groupe 4 avec un vernis Silicone.

L'induit de la génératrice était accouplé à un moteur à grande vitesse. Un volant non équilibré provoquait les vibrations. Le bobinage était couplé en série. Un dispositif permettait la montée rapide en température pendant 12 minutes. Un courant d'air refroidissait en 18 minutes.

L'essai dura 36 jours, à raison de 16 heures par jour. La température du bobinage variait entre 209 et 230° C.

Les enrubannages à l'amiante et au verre des groupes 1, 2 et 3 présentèrent de sérieuses détériorations. La soie de verre imprégnée au Silicone du groupe 4 était souple et flexible après l'essai. La soie de verre imprégnée qui recouvrait les fils des groupes 2 et 4 était en bon état, mais celle traitée au Silicone était plus flexible.

#### Moteur à induction.

Il est probable que le premier essai fait avec un moteur traité à la résine Silicone est celui fait sur un moteur à induction étanche, à refroidissement à ailettes, qui a été essayé dès le début d'avril 1942. Moteur de 7,5 kW, triphasé, 60 Hz, 440 V, 4 pôles, 1690 t/min. Il a été isolé avec les meilleurs isolants classe B connus, soie de verre et mica, et le tout a été imprégné au vernis Silicone. (On ne connaissait pas encore les isolants Silicones.)

#### Résumé des essais.

1. Des essais complets ont été faits à pleine charge et puissance maximale (augmentation de 100° C au couple thermo-électrique).

2. Le moteur a été surchargé au point d'atteindre 416° C en 1 1/2 h.

3. La charge a été réduite jusqu'à ce que la température se stabilise à 300° C.

4. Le moteur a été fortement surchargé pendant 45 minutes.

5. Après ces essais, le moteur a été révisé, puis soumis à un essai d'endurance, à une charge telle que l'augmentation de la température était de 210° C. La température réelle devait être environ 250° C ; elle fut maintenue 3376 h.

6. Le moteur a été démonté périodiquement pour examen et soumis à une forte humidité.

#### Résultat des essais d'endurance.

Après 920 heures, le vernis Silicone était encore en bon état. L'essai entre spires à haute tension (2000 V) et à haute fréquence, l'essai de résistance électrique et l'essai à haute tension après exposition à l'humidité ont été parfaitement tenus. Après 2250 heures, le vernis présentait certains défauts, mais les essais furent néanmoins tenus. Après 3376 heures, le moteur s'arrêta par suite d'un défaut de palier.

Le moteur a été démonté. La résine a été trouvée friable. Par places, le ruban de verre cassait facilement, surtout en dehors des cannelures. Les composés verre-mica étaient solides et relativement flexibles. A bien des endroits, l'enro-

bage de verre adhère sur les fils. Il faut toutefois se rappeler que, dans ce moteur, on avait employé des isolants classe B et que la Silicone n'a été utilisée que pour l'imprégnation finale.

#### Génératrice triphasée de grandeur moyenne.

L'enroulement du stator de cette génératrice était entièrement isolé avec une isolation Silicone, c'est-à-dire une résine Silicone pour le traitement de la fibre de verre couvrant le fil, pour le collage du mica, le traitement des tissus et rubans de verre, l'imprégnation des bobinages et la finition du stator. L'isolation à la masse était à base de verre-mica. Le verre traité n'a été utilisé que comme entre-couches. Les cales d'encoches étaient faites en amiantite, combinaison d'amiantite et de résine phénolique polymérisée, à part quelques-unes faites avec du verre aggloméré au phénoplaste.

Un premier arrosage fut effectué pour éprouver la tenue à l'eau de l'enroulement. La résistance d'isolement passa de 28 000 M  $\Omega$  à 2600 M  $\Omega$  après un arrosage de 48 heures (valeur une minute).

Pendant le chauffage du stator, la génératrice fut poussée à sa vitesse normale, l'enroulement du stator court-circuité. Le courant inducteur fut réglé pour produire un courant au stator 2  $\frac{1}{2}$  fois plus fort que normal et, partant, une température de 210° C. Pour obtenir un chauffage périodique de l'enroulement, le stator ne fut court-circuité qu'un jour sur deux. D'autres fois, le stator fonctionnait en circuit ouvert avec champ surexcité, qui provoquait une tension environ 40 % supérieure à la tension normale, donc un essai de surtension pour l'isolation.

Les températures suivantes ont été observées :

Air ambiant . . . . .	25° C
Enroulement . . . . .	211° C
Noyau d'induit . . . . .	94° C
Carcasse . . . . .	42° C
Air sortant de la machine	69° C

La machine a été examinée périodiquement pendant l'essai. Le vernis à l'extérieur ne présenta que peu de changement. La machine tourna 2966 heures, le stator étant aux conditions décrites. La température réelle de l'enroulement atteignit 250° C. A la fin de l'épreuve d'endurance, l'enroulement fut soumis à un essai de résistance à l'humidité. Les valeurs suivantes ont été mesurées :

début . . . . .	4900 M $\Omega$ (valeur 1 min)
après 3 jours . . . . .	2800
après 16 jours . . . . .	1300
après 19 jours . . . . .	380

Immédiatement après l'essai d'humidité, une série d'essais a été faite sur le stator sans le sécher.

1. Essai de tension à la masse à 1,4 fois la tension normale, pendant 5 minutes et à 60 Hz.
2. Essai en circuit ouvert, à vitesse normale avec un champ surexcité (surtension 40 %), pendant une heure.
3. Stator court-circuité avec champ d'excitation réglé pour une tension normale de circuit ouvert. Appliqué pendant deux minutes, sans relâchement apparent de l'enroulement.
4. Résistance d'isolement 10 200 M  $\Omega$ . Facteur de pertes, 3,2 %.
5. Mesure intentionnelle de la tension de claquage. Tient 1000 V, claque à 1600 V après 12 s.

#### Essais de laboratoire sur des moteurs normaux.

Une série de moteurs normaux, étanches avec refroidissement à ailettes, ont été isolés avec des Isolants Silicones et

mis à l'essai à haute température. Aucun n'a montré jusqu'à maintenant de défauts et tous ont été soumis avec succès à des surtensions. Ils sont encore à l'essai. Ils ont tourné jusqu'au moment de la publication des résultats les temps suivants :

Tableau I

Moteur kW	Température de l'enroulement °C	Durée de marche continue h
1,5	170	3486
1,5	165	3486
3	140	3996
3	160	3996
5,5	320	1907
5,5	320	1907
11	185	3506
11	170	3506
18	135	3291
18	160	3291
4,5	285	4500
7,5	250	3400
7,5	250	3400
18	240	3300
7,5	200	5200
7,5	185	5200

#### Bobines d'électro-aimants.

Plusieurs centaines de bobines d'électro-aimants de différents types, isolées avec des Silicones, sont en usage et sous contrôle dans les tramways américains. Les expériences faites ont démontré clairement qu'elles résistaient beaucoup plus longtemps que les bobines habituelles isolées avec des isolants classe B. Une de ces bobines a été en service plus de 5000 heures à une température contrôlée de 235-250° C.

#### Les lubrifiants.

Il est évident que si l'on veut pouvoir utiliser dans une machine électrique toutes les qualités de tenue à la chaleur des Silicones, il est nécessaire d'obtenir également des lubrifiants stables à haute température. Les Lubrifiants DC et les Graisses DC ont fait maintenant de tels progrès, qu'ils semblent avoir la même supériorité sur les lubrifiants habituels que les Vernis Silicones ont sur les vernis organiques. Les essais ont démontré que les lubrifiants organiques ne pouvaient être employés au-dessus de 90° C. Des essais semblables ont montré que les paliers lubrifiés avec les Silicones supportaient 50° C de plus. Des recherches sont actuellement en cours et il apparaît probable que les machines électriques pourront bientôt tourner à 175° C, avec des Isolants Silicones et des Lubrifiants Silicones, en particulier les graisses pour paliers.

#### Conclusion.

Il est hors de doute que les Silicones revêtent une importance considérable pour l'isolation des machines électriques et qu'elles sont appelées à un développement intéressant. En effet, les essais faits ont démontré qu'elles étaient douées d'une stabilité à haute température très supérieure à celle des produits organiques employés jusqu'à maintenant. Non seulement elles ne se décomposent pas, mais elles ne montrent aucun signe de vieillissement et c'est là, à notre idée, que réside l'intérêt principal des Silicones. Elles ont, d'autre part, une remarquable résistance aux agents chimiques, en particulier à l'eau, et de bonnes qualités diélectriques.

Les moteurs courants, ouverts ou demi-fermés, sont habituellement choisis d'après l'effort à fournir et leurs dimensions sont telles que la température de régime n'est pas

Tableau II. — Moteurs à induction totalement fermés. Refroidissement à ailettes.

	1,5 kW			11 kW			30 kW		
	Isolation			Isolation			Isolation		
	A	B	HTS <sup>1)</sup>	A	B	HTS <sup>1)</sup>	A	B	HTS <sup>1)</sup>
Pourcentage du poids total . . . . .	100 %	79,5 %	63 %	100 %	81 %	53 %	100 %	69,5 %	54 %
Facteur de puissance . . . . .	82 %	81,5 %	79,5 %	84,4 %	84,3 %	84,1 %	87 %	86 %	86 %
Température de régime °C . . . . .	40°	63°	113°	43°	65°	125°	44°	64°	106°

<sup>1)</sup> HTS = High Temperature Silicone.

élevée; les isolants classes A et B répondent parfaitement aux exigences. Il est donc inutile d'employer des Silicones pour ce genre de matériel.

Par contre, dans les moteurs fermés, habituellement étudiés pour utiliser au maximum l'énergie électrique disponible, la température de régime est assez élevée. Elle est généralement mal supportée par les isolants classe B. Les Isolants Silicones y trouveront une application intéressante.

Les moteurs fractionnaires d'appareils ménagers, de dynamos et démarreurs d'auto, etc., fonctionnant généralement à des températures compromettant leur durée, pourront être sensiblement améliorés.

Ils s'imposeront également partout où la place disponible pour le moteur électrique est très limitée. Ils seront enfin indispensables dans les appareils électriques placés dans une température ambiante élevée.

Mais ce n'est sans doute pas là que les Silicones trouveront leur application la plus intéressante. Il faudra étudier de nouveaux appareils électriques qui seront adaptés aux Silicones. On changera le rapport cuivre-fer, la qualité du fer, etc.

Quand bien même des chiffres précis ne peuvent pas encore être donnés, il paraît normal d'admettre que les Silicones rendront possible une température de régime de 50-75° C plus élevée que celle admise par les isolants classe B. La limite supérieure deviendrait donc 175° C (fig. 6).

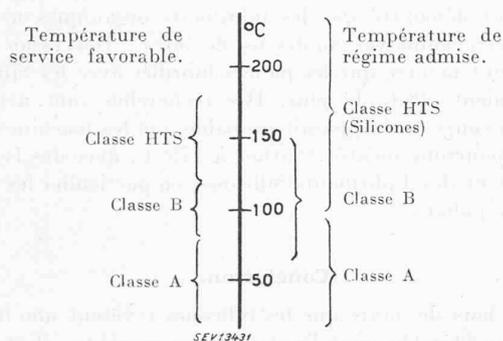


Fig. 6. — Température de régime admise pour les différentes classes d'isolants.

Il en résultera une diminution appréciable du poids des machines électriques. Le tableau II en donne une idée.

Le prix très élevé des Silicones, 30-70 fr/kg (7-18 dollars) ne sera pas un obstacle devant de tels avantages.

On a reproché à certaines Silicones de manquer de résistance à l'abrasion et d'être ramollies par les huiles et les solvants. Cela ne semble pas exact et ce jugement a sans doute été porté sur les premiers types de Silicones sortis des labo-

ratoires ou sur les Silastics. Depuis lors, de grands progrès ont pu être réalisés et il s'en fera certainement beaucoup encore.

La difficulté à prévoir pour l'utilisation rationnelle des Silicones consistera dans le traitement à haute température. Il sera, en effet, nécessaire de disposer d'installations et d'étuves atteignant 200° C.

Comme il était déjà difficile d'obtenir chez les utilisateurs de vernis gras à l'étuve, des températures de séchage de 120° C, il est à craindre que cette température de 200° C, nécessaire au traitement des Silicones, en limite l'emploi, ce qui serait évidemment regrettable.

L'emploi des Silicones doit exclure l'utilisation simultanée d'isolants organiques. Si des supports cellulosiques devaient être nécessaires, par exemple dans les produits micacés, on réduira leur emploi au strict minimum et on étuvera les appareils quelques heures à 200-250° C avant de les traiter aux vernis Silicones d'imprégnation ou de couverture.

Un mot pour terminer sur les possibilités de livraison des Silicones. Elles sont actuellement très limitées, mais les perspectives semblent s'améliorer rapidement. Nous croyons savoir que les appareils en construction permettront des livraisons industrielles en 1946. D'ici peu, des essais pratiques pourront être faits en Europe également. Nous pensons que ce jour marquera une date dans la construction électrique.

#### Bibliographie.

1. *Organic Derivatis of Silicon Preparation of Alkylsilicon Chlorides*. F. S. KIPPING. Proceedings, Chemical Society (London) 1904, p. 15.
2. *Silicones, A new Class of Polymers*. S. L. BASS, J. F. HYDE, E. C. BRITTON, R. R. MAC GREGOR. Modern Plastics, vol. 21 (1944), p. 124.
3. *Organo Silicon Compounds for Insulating Electrical Machines*. T. A. KAUPPI, G. L. MOSES. Amer. Inst. Electr. Engrs. Technical Paper 45...30, Dec. 1944.
4. *Silicones, A new Class of High Polymers of Interest to the Radio Industry*. S. L. BASS and T. A. KAUPPI. Presented before the Rochester Meeting of the Institute of Radio Engineers. Nov. 1944.
5. *Silicones, A new Class of High Polymers*. R. W. KOLDERMANN. Canadian Chemistry and Process Industries. Mars 1945.
6. *Silicones, High Polymeric Substances*. S. L. BASS, J. F. HYDE, E. C. BRITTON, R. R. MAC GREGOR. Modern Plastics. Nov. 1944.
7. *The Silicones, A new Plastic Family*. Plastics. Jan. 1945.
8. *Organo Silicon Films*. F. J. NORTON. General Electric Review. 1944, n° 8, p. 47.
9. *Silicones, The Modern Miracle of Electrical Insulation*. Coil Walk. Jan. 1945.
10. *The Application of Silicone Resins to Insulation for Electric Machinery*. J. DE KIEP, L. R. HILL, G. L. MOSES. Amer. Inst. Electr. Engrs. Technical Paper 45...23. Dec. 1944.
11. *Insulation Temperature Limits Increased by New Silicone Resins*. G. L. MOSES. Westinghouse Engineer. 1944, p. 138-141.
12. *Chem. and Eng. News*, vol. 22 (1944), p. 1134.
13. *Chem. and Met. Eng.* 1944, July.