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

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 72 (1981)

Heft: 3

Artikel: Utilisation des fluides silicones dans les transformateurs de distribution, en vue du remplacement des Askarels

Autor: Gandillon, C. / Boss, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905074

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

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

Utilisation des fluides silicones dans les transformateurs de distribution, en vue du remplacement des Askarels

Par C. Gandillon et P. Boss

621.314.21:678.842

Les recherches effectuées sur les fluides Silicones ont montré que leurs caractéristiques se rapprochent beaucoup de celles des Askarels. Les transformateurs remplis avec un fluide Silicone grade 50 peuvent satisfaire les normes en vigueur (publ. ASE 3156.1972). Toutefois, la non-inflammabilité des Askarels ne se retrouve pas chez les fluides silicones, que l'on considère comme difficilement inflammables et propageant mal la flamme.

Untersuchungen an Siliconflüssigkeiten haben gezeigt, dass diese sehr ähnliche Eigenschaften aufweisen wie Askarele. Mit Siliconflüssigkeit Grad 50 gefüllte Transformatoren können die gültigen Normen (Publ. SEV 3156.1972) erfüllen. Entgegen den unbrennbaren Askarelen sind Silikonflüssigkeiten jedoch nur schwer entflammbar und schlecht brennbar.

1. Introduction

Depuis de nombreuses années, des transformateurs de distribution à bain d'Askarels sont utilisés. La caractéristique de non-inflammabilité des Askarels, que l'on ne retrouve pas dans les autres fluides isolants connus, est due à la teneur élevée en chlore des polychlordiphenyles (ou PCB), principaux constituants des Askarels. Cette propriété est mise à profit dans le cas où le danger d'incendie peut conduire à de graves pertes en matériel et en vies humaines, comme par exemple lorsqu'il s'agit de magasins à grande surface ou de sous-sols d'usine. La stabilité électrique et la non-inflammabilité ont fait le succès des Askarels depuis près de 40 ans, en particulier dans les condensateurs de puissance et les transformateurs de distribution.

Aux alentours de 1966 on a découvert des traces de polychlordiphenyles (ou PCB) dans l'environnement, ouvrant ainsi le dossier de l'écotoxicité des Askarels. Malgré les recommandations de l'OCDE et les directives de la CEE [1], la pression des milieux écologistes l'emporte aujourd'hui. Certaines usines ont même cessé leur production d'Askarels. Pour le moment, les Askarels sont tolérés en Suisse dans les systèmes fermés et contrôlables. Ces produits ont été répertoriés parmi les toxiques de classe 1, c.-à-d. dans celle pour laquelle les exigences sont les plus sévères.

Cette situation a poussé les industries intéressées à étudier depuis plusieurs années des fluides isolants pouvant éventuellement remplacer les Askarels. En fait, on ne trouve actuellement pas sur le marché un fluide réalisant les performances de ceux-ci, spécialement en ce qui concerne la non-inflammabilité. Cependant, parmi les diélectriques étudiés, les fluides Silicones sont ceux dont l'ensemble des propriétés se rapproche le plus des Askarels. Ils sont en particulier difficilement inflammables et propagent mal la flamme.

Il n'est pas inutile à ce propos de mentionner que, quoique les Askarels soient non-inflammables, ils ne se décomposent pas moins à haute température en produisant de l'acide chlorhydrique gazeux, extrêmement toxique et agressif, alors que les Silicones donnent de la silice et du gaz carbonique, qui ne présentent pas ce grave désavantage.

La difficulté en cas d'emploi des Silicones dans les transformateurs provient des caractéristiques réglant les échanges thermiques. Celles des Silicones sont moins favorables que celles des huiles minérales ou des Askarels. Les échanges thermiques se fondent sur des paramètres qui doivent être obtenus expérimentalement. Il a donc été nécessaire de procéder à des essais pour préciser ces points. Par rapport à des fluides classiques, l'utilisation des Silicones dans les transformateurs peut conduire à une diminution d'environ 10% de la puissance transmise pour conserver les mêmes échauffements. Dans certains cas cependant, le transformateur rempli d'huile Silicone peut transmettre la totalité de la puissance calculée pour les huiles. Seul le constructeur possède les données techniques nécessaires pour résoudre les problèmes qui se posent.

2. Les fluides Silicones

Les fluides Silicones sont obtenus à partir des organochlorosilanes. Ceux-ci, après hydrolyse, se polymérisent en présence de catalyseurs. Ces fluides sont des polymères linéaires. La longueur de la chaîne se règle en ajoutant un certain pourcentage de Triorgano-Siloxanes qui bloquent la polymérisation. Les produits utilisés dans l'industrie électrique sont des polyméthylsiloxanes, c.-à-d. des polymères pour lesquels la partie organique est constituée par des groupes méthyles. La formule générale est celle de la figure 1.

3. Propriétés physiques

Le tableau I donne un aperçu des propriétés comparées d'une huile minérale, d'un Askarel et d'un fluide Silicone.

Il existe toute une série de fluides Silicones dont la gamme des viscosités va de 1 à 2500000 mm^2/s. La viscosité de ceux utilisés dans le domaine électrique doit être la plus basse possible. Le type qui a été choisi est de grade 50 c.à.d. qu'il a une viscosité d'environ 50 mm^2/s à 20 °C. Les viscosités inférieures sont inutilisables parce que le point de feu diminue très vite et parce que les fluides à faible viscosité sont beaucoup plus chers.

En comparant les courbes de viscosité (fig. 2) d'une huile minérale, d'un Askarel et d'un fluide Silicone grade 50, on s'aperçoit immédiatement que les pentes sont très différentes. Au-dessous d'une certaine température, la viscosité du Silicone est plus basse que celle de l'huile minérale; il en découle que la circulation se fera mieux à basse température avec un bain de Silicone qu'avec un bain d'huile minérale. A température élevée par contre, l'utilisation de l'huile minérale sera plus favorable, ce qui est important, car l'une des caractéristiques principales d'un liquide isolant est sa capacité de refroidissement en service.

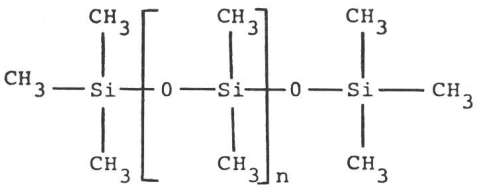


Fig. 1 Formule générale des fluides Silicones

Valeurs comparées d'un fluide Silicone grade 50 avec une huile minérale et un Askarel Tableau I

	Unité	Fluide Silicone	Huile minérale	Askarel
Propriétés physiques				
Densité à 20 °C	g/cm³	0,96	0,87	1,56
Coefficient de dilatation	$1/°C \cdot 10^{-3}$	1	0,74	0,73
Indice de réfraction à 20 °C		1,404	1,475	1,616
Viscosité 20 °C	mm²/s	54	18	21
50 °C		32	7,2	2
Point de congélation	°C	−65	−48	−45
Point éclair	°C	290	150	—
Point de feu	°C	360	165	—
Chaleur spécifique 25 °C	$J \cdot g^{-1} K^{-1}$	1,42	2,09	1,67
Conductibilité thermique	$W \cdot m^{-1} K^{-1}$	0,15	0,12	0,1
Evaporation 150 °C/24 h	%	0,06	10	—
Propriétés chimiques				
Indice d'acidité	mg KOH/g	0,01	0,02	0,01
Saturation en eau à 20 °C et 100 % H.R.	ppm	180	60	120
Propriétés diélectriques				
Constante diélectrique à 20 °C		2,7	2,3	4,6
Facteur de pertes tgδ à 90 °C	%	0,03	0,15	3
Rigidité diélectrique (e = 2,5 mm)	kV	75	80	75

4. Propriétés chimiques

L'étude de la stabilité thermique d'un fluide isolant en présence d'oxygène, en d'autres termes de sa stabilité à l'oxydation, est importante car elle détermine la durée de vie d'un transformateur, facteur économique primordial.

Le vieillissement des huiles minérales se mesure au moyen de l'indice d'acidité, de la teneur en dépôt et de la tgδ. Si l'on applique ces critères aux fluides Silicones, on ne constate aucun vieillissement aux températures usuelles. Même à 180 °C, comme le montre le tableau II, après 1200 h, l'indice d'acidité n'a pratiquement pas changé. Chose intéressante, les Silicones ne forment pas de dépôts. La stabilité thermique propre, c.-à-d. en l'absence d'oxygène, est extrêmement élevée. En effet, après 4800 h à 200 °C, on ne constate qu'une très faible augmentation de l'indice d'acidité, aucun dépôt.

Lors des essais à haute température en présence d'oxygène, il se produit une augmentation de la viscosité des Silicones. Si l'on prend comme base le doublement de la viscosité, la figure 3 montre que le temps mis pour atteindre le double de la viscosité augmente très rapidement lorsque la température baisse. A 140 °C, en partant d'un fluide Silicone de grade 50, il faudrait environ 30 ans pour arriver à 100 mm²/s. Lorsque la surface de contact air-Silicone diminue, ce temps augmente encore. Par exemple à 180 °C, si la surface est 20 fois plus petite, le temps nécessaire passe de 100 h à 1200 h. Ce qui repousse très loin dans le temps le doublement à 140 °C. Comme dans un transformateur la surface pour un même volume est encore plus petite, on peut conclure raisonnablement qu'une augmentation extrêmement faible de la viscosité risque de se produire pendant la vie de l'appareil, si celui-ci travaille aux environs de 140 °C. Pour des températures élevées, il faut utiliser des transformateurs scellés.

5. Propriétés électriques

A part la présence d'impuretés solides, l'une des causes de l'abaissement de la rigidité diélectrique est la teneur en eau.

La figure 4 donne un aperçu de la teneur en eau d'un Silicone grade 50 en fonction de la température et de l'humidité

Stabilité thermique d'un fluide Silicone grade 50 en présence d'oxygène et en atmosphère inerte Tableau II

Atmosphère	Durée de l'essai heures	T °C	Indice d'acidité mgKOH/g	Dépôt %	tg δ % 90 °C
Air	0	110°	0,01	0	0,02
	1200		0,01	0	0,02
Air	0	180°	0,01	0	0,02
	1200		0,01	0	0,09
Azote	0	200°	0,01	0	0,02
	4800		0,05	0	0,18

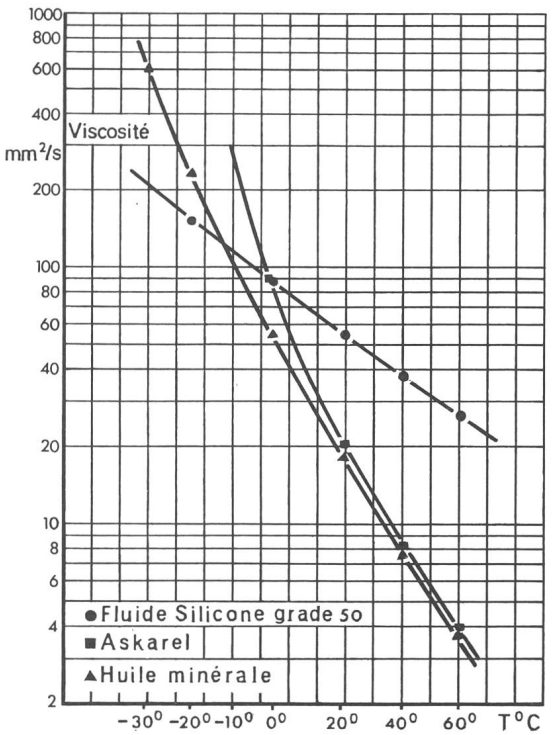


Fig. 2 Comparaison entre les viscosités d'une huile minérale, d'un Askarel et d'un fluide Silicone grade 50 en fonction de la température

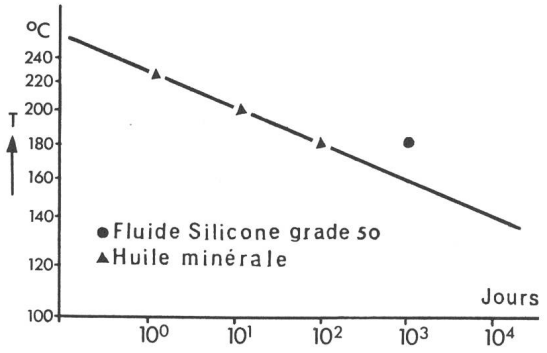


Fig. 3 **Temps en jours mis par un Silicone grade 50 pour atteindre le double de la viscosité initiale en fonction de la température, en présence d'air**

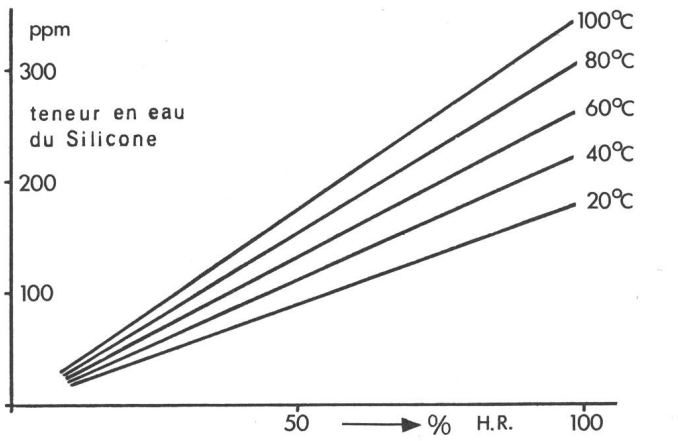


Fig. 4 **Teneur en eau d'un fluide Silicone grade 50, en fonction de la température et de l'humidité relative (H.R.) de l'air**

relative. Par rapport à une huile minérale, les Silicones absorbent beaucoup plus d'eau. Il est connu que pour une huile minérale la saturation se situe, à 20 °C, à environ 60 ppm d'eau, alors que pour les Silicones le graphique indique 180 ppm.

On admet que l'eau dissoute dans l'huile au-dessous du point de saturation se comporte de manière analogue à la vapeur d'eau dans l'air. Sur la figure 5, où l'on a noté l'humidité relative du Silicone et de l'huile en fonction de celle de l'air, une droite unique rend compte du fait que les Silicones se comportent comme les huiles minérales vis-à-vis de l'eau.

Dans un transformateur où l'huile est en contact direct avec l'air ambiant, un équilibre s'établit entre le fluide et l'atmosphère. La figure 6 montre qu'à humidité relative égale, la rigidité diélectrique est plus faible pour les Silicones que pour les huiles minérales. La prévention de l'humidité au stockage lors du traitement et en service est donc importante.

La tgδ est une mesure de caractère global en relation avec les impuretés contenues dans l'huile et spécialement celles qui résultent du vieillissement. Les valeurs du tableau II montrent que la tgδ n'augmente que très peu. D'après les études [2], les produits de vieillissement des Silicones se forment surtout par pontage d'une chaîne à l'autre et par formation de produits cycliques.

Au point de vue polarité, la composition du fluide après vieillissement n'est pas bien différente de l'état initial.

6. Inflammabilité

Le problème capital du remplacement des Askarels est en fait la question de la résistance au feu et de la propagation de la flamme. Dans tout endroit où le danger d'incendie peut conduire à des pertes de vies humaines ou matérielles élevées, l'utilisation d'un fluide isolant non inflammable est important.

Actuellement, on ne connaît aucun fluide isolant égalant les Askarels dans ce domaine. Les Silicones possèdent un point de feu élevé et peuvent être qualifiés de difficilement inflammables. Le point de feu des fluides Silicones se situe vers 340 à 360 °C, donc approximativement au double de celui de l'huile minérale (tableau I). L'indice limite d'oxygène est utilisé pour classer les fluides à ce sujet. Plus cet indice est élevé, plus la flammabilité est mauvaise. D'après *Nelson* [3], un fluide Silicone grade 50 a un indice de 21, une huile minérale de 15, l'Askarel supérieur à 38.

La présence de produits volatils inhérents à la fabrication abaisse le point de feu. Deux fluides examinés ayant l'un 0,06 % et l'autre 0,2 % de volatil, montraient pour le premier un point de feu de 360 °C, et pour le deuxième 340 °C.

De nombreux tests existent qui permettent de cerner les différents aspects des phénomènes de combustion, d'entretien et de propagation de la flamme. Ils ne peuvent que refléter chacun un aspect du problème. Cependant, il est acquis que du fait que les Silicones dégagent peu de calories en brûlant, la combustion s'entretient mal. La fumée produite, formée de Silice, a tendance à étouffer le feu.

Un aspect non négligeable du problème de l'incendie est la formation de produits de décomposition nocifs. Les Askarels à haute température dégagent de l'acide chlorhydrique gazeux extrêmement agressif et corrosif qui peut avoir des conséquences désastreuses sur l'appareillage électronique en particulier. Les Silicones par contre ne dégagent que de la Silice, du CO_2, donc des gaz inoffensifs et non corrosifs.

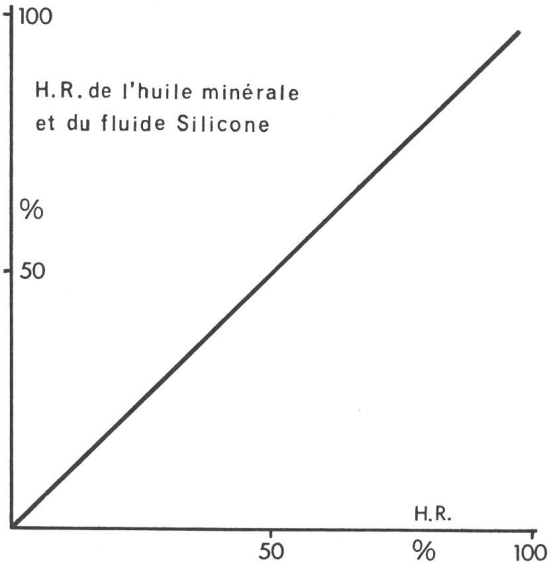


Fig. 5 **Humidité relative de l'huile minérale et d'un fluide Silicone grade 50 en fonction de celle de l'air**

7. Propriétés thermiques

Le transfert de chaleur dans les transformateurs refroidis par un diélectrique liquide dépend des paramètres suivants: viscosité, conductibilité thermique, coefficient de dilatation, densité et chaleur spécifique. Cela vaut pour des transformateurs refroidis par convection naturelle ou par circulation forcée. Le transfert est optimal si, pour une configuration donnée, la viscosité est aussi faible que possible et si les quatre autres paramètres sont aussi élevés que possible.

Un transformateur rempli avec de l'huile Silicone grade 50 et fonctionnant à température ambiante verra ses échauffements augmenter par rapport à un transformateur identique, mais rempli avec de l'huile minérale ou avec un Askarel. Cet accroissement d'échauffement peut se calculer sur la base de relations empiriques. Afin d'éliminer l'incertitude liée à l'utilisation de telles formules, des essais d'échauffement selon la publication CEI 76–2 (ASE 3156) ont été faits sur des transformateurs remplis successivement avec une huile minérale et une huile Silicone grade 50.

Des essais poussés ont été effectués sur un transformateur de distribution triphasé avec cuve à plis: $P = 400$ kVA, $U = 400/18\,000$ V, $T_{cc} = 4\,\%$, $f = 50$ Hz. En plus des échauffements (air, huile, cuivre) mesurés conformément aux normes en vigueur, la distribution des températures dans les enroulements a été relevée grâce à des thermocouples placés dans le canal d'huile séparant les enroulements HT et BT. Le tableau III montre les températures et échauffements mesurés lors des essais. On observe effectivement un échauffement plus élevé pour le transformateur rempli avec l'huile Silicone grade 50, de l'ordre de 10 à 12 °C.

Le type de transformateur essayé avec une huile Silicone grade 50 remplit totalement les exigences imposées par les normes concernant les échauffements limites admissibles, tout en conservant sa puissance nominale. Il présente une réserve d'échauffement importante lorsqu'il est rempli avec de l'huile minérale. Cela est dû en particulier à la normalisation ainsi qu'aux faibles pertes imposées au constructeur.

Il est évident que pour certains types de transformateurs, le remplacement du fluide diélectrique aura pour conséquence soit une diminution de la puissance nominale, soit une modification de la cuve ou du système de réfrigération. On ne pourra donc que recommander aux utilisateurs de prendre contact avec le fabricant avant d'envisager l'échange du fluide diélectrique de ses transformateurs. Une majoration des limites d'échauffement peut être envisagée après entente entre utilisateur et fournisseur, dans le cas de transformateurs neufs remplis avec l'huile Silicone grade 50 et isolés avec des matériaux de classe thermique supérieure à la classe A.

Comparaison des températures d'échauffement obtenues dans un transformateur de 400 kVA, 18/0,4 kV avec une huile minérale et un fluide Silicone grade 50 Tableau III

	Echauffement (°C)	
	Huile minérale	Huile Silicone grade 50
$\Delta\vartheta$ huile – air max [1])	33,5	37,8
Enroulement HT $\Delta\vartheta$ cuivre – air [2])	49,8	59,3
Enroulement BT $\Delta\vartheta$ cuivre – air [2])	49,3	55,8
ϑ bas canal d'huile	50,5	53,5
ϑ milieu canal d'huile	58,0	71,5
ϑ haut canal d'huile	65,0	76,5

[1]) selon ASE 3156, max 55 °C [2]) selon ASE 3156, max 65 °C

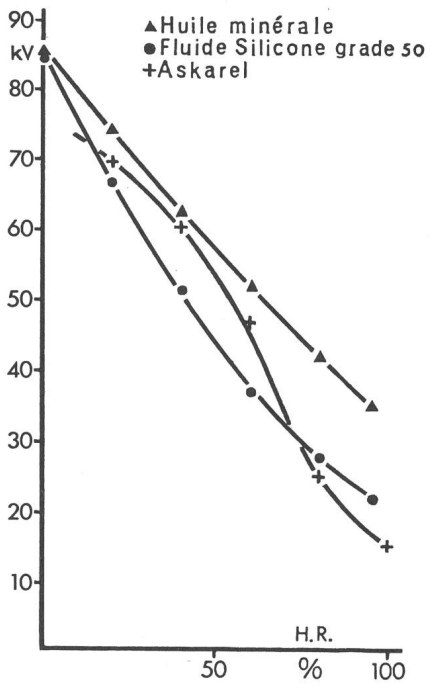


Fig. 6 Rigidité diélectrique d'un fluide Silicone grade 50, d'un Askarel et d'une huile minérale en fonction de l'humidité relative (H.R.) de l'air (température 20 °C)

8. Conclusion

1. Au point de vue des propriétés chimiques, on constate que le vieillissement des fluides Silicones est pratiquement nul au-dessous de 140 °C. Quant aux caractéristiques électriques, il faut avant tout considérer la rigidité diélectrique et le facteur de pertes tgδ. Pour ce qui est de la première, les fluides Silicones présentent des valeurs plus basses que les huiles minérales et les Askarels. Il est nécessaire d'assurer un traitement efficace du fluide avant la mise en service, ainsi qu'une surveillance de la teneur en eau au cours de l'exploitation. L'évolution de la tgδ dans le temps est, en revanche, meilleure que celle des Askarels et, a fortiori, de celle des huiles minérales.

2. L'étude du transfert de chaleur dans le cas des huiles Silicones a montré que pour un même transformateur la température en fonctionnement sera plus élevée par rapport à l'huile minérale ou l'Askarel. Malgré cela, il est souvent possible de tenir les valeurs prescrites (publ. ASE 3156.1972). Mais, dans certains types de transformateurs, le respect des normes d'échauffement conduira à une diminution de la puissance nominale. Il est donc recommandé aux utilisateurs de consulter le fabricant avant d'envisager l'échange du fluide. L'utilisation d'isolants de classe thermique F ou H, combinés avec l'huile Silicone, permet de réaliser des transformateurs à liquide isolant de classe supérieure.

3. Quant au problème de la non-inflammabilité, il faut souligner qui il n'est pas résolu actuellement dans le domaine des fluides isolants. Les Silicones sont reconnus comme difficilement inflammables et propageant mal la flamme, mais en cela

ils n'atteignent de loin pas les performances des Askarels. Ils présentent par contre l'avantage de l'absence d'agressivité et de nocivité de leurs vapeurs lors de la décomposition à haute température dans un incendie.

4. Le problème écologique n'a pas été traité ici. Il est important, puisqu'il a motivé la mise à l'index des Askarels. De nombreuses recherches ont été faites qui montrent que les Silicones peuvent être considérés comme non-polluants.

5. Toutes ces considérations ont conduit à utiliser les fluides Silicones dans certains types de transformateurs, en attendant la découverte d'un liquide isolant remplissant encore mieux toutes les conditions exigées dans le domaine de l'appareillage électrique.

Bibliographie

[1] Directives du conseil de la Commission Economique pour l'Europe (CEE) du 27 juillet 1976. Journal Officiel des Communautés Européennes No. L 263, du 27 septembre 1976, p. 201...203.

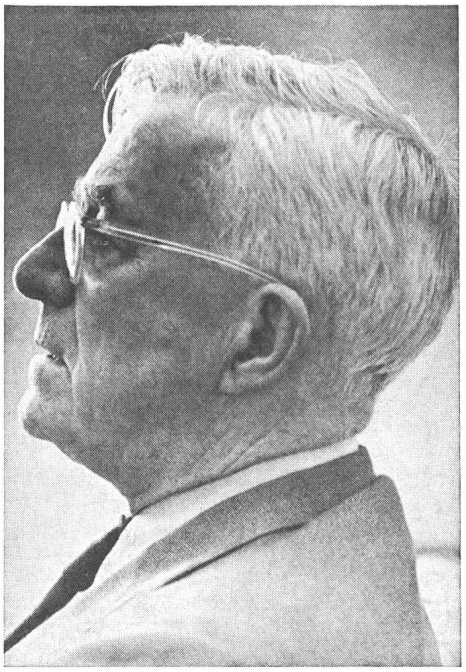
[2] *A.C.M. Wilson:* Insulating liquids: Their uses, manufacture and properties. IEE-Publication. London/New York, Peter Peregrinus, 1980.

[3] *R.A. Nelson:* Silicone-liquid-filled transformers. Proceedings of the American Power Conference 39(1977), p. 1069...1074.

Adresse des auteurs

Claude Gandillon, Dr ès sciences, et *Pierre Boss,* Ingénieur ETS, S.A. des Ateliers de Sécheron, Case postale 40, 1211 Genève 21 (société membre du groupe Brown Boveri).

Irving Langmuir 1881–1957



Obituary notice R. S. 1958

Langmuir, zugleich Chemiker und Physiker, hat sowohl auf theoretischem Gebiet als auch in der Technik Hervorragendes geleistet. Wohl sein grösstes Verdienst ist die Verbesserung der Wolfram-Glühlampe durch Einführung der Gasfüllung (zuerst Stickstoff, dann Argon) und die Wendelung des Glühfadens, wodurch höhere Temperaturen, längere Lebensdauer und zudem eine Verbilligung auf einen Fünftel erzielt wurde. Die sog. Halbwattlampe wies eine Lichtausbeute von gegen 50 lm/W auf gegenüber 3 lm/W bei der Kohlenfadenlampe. Wesentlich zu diesem Erfolg trug die von ihm entwickelte Quecksilber-Hochvakuumpumpe bei, die auch den Weg zur hochevakuierten Radioröhre frei machte. Mit Lichtbögen zwischen Wolfram-Elektroden gelang Langmuir die Dissoziation von H_2 in atomaren Wasserstoff, bei dessen Rekombination Temperaturen bis 6000 °C entstehen, die für Spezialschweissungen nötig sind.

Untersuchungen über monomolekulare Schichten brachten neue Erkenntnisse über die chemischen Verbindungen (Valenzen) und über Katalysatoren. Nach der Theorie von Langmuir tendiert die Natur bei Molekülbindungen nach gefüllten Elektronenschalen, wie bei Edelgasen. Während dem Ersten Weltkrieg entwickelte er zusammen mit *Coolidge* die Unterseeboot-Abwehr und im Zweiten Krieg die Enteisung von Flugzeugen sowie zusammen mit *V. J. Schaefer* die Vernebelung mit weissem Rauch. Durch Injektion von Silberjodid oder Trockeneis von Flugzeugen aus gelang es den beiden, Wolken zum Regnen zu bringen.

Irving Langmuir erblickte am 31. Januar 1881 in Brooklyn das Licht der Welt. Sein Vater, schottischer Abstammung, war Manager bei der New Yorker Lebensversicherungsgesellschaft. Die englische Mutter, Tochter eines Anatomie-Professors, gebar vier Buben, von denen Irving der dritte war. Die ersten Schuljahre verlebte der Junge in Brooklyn. 1892 bis 1895 wohnte die Familie in Paris, dann folgte die Highschool-Periode in New York. 1898 starb der Vater, erst 54jährig. Dank guter Vorsorge konnten die Söhne trotzdem studieren. Irving erwarb 1903 an der Columbia-University das Diplom als Metallurgie-Ingenieur, zog aber sofort nach Göttingen, wo er 1906 bei Professor *Nernst* mit einer Dissertation über die «Dissoziation von Wasserdampf und Kohlendioxyd in der Umgebung glühender Platindrähte» doktorierte.

Nach den Staaten zurückgekehrt, wirkte er von 1907 an als Chemielehrer am Stevens Institute of Technology in Hoboken (NJ). Auf Einladung des Direktors des Forschungslaboratoriums der General Electric machte er dort eine Ferienpraxis und trat im Juli 1909 zu GE über. Hier begannen die erwähnten Arbeiten zur Verbesserung der Glühlampe. An den gleichen Problemen arbeitete man übrigens auch in Europa. Als Langmuir 1913 für GE die verschiedenen massgebenden Patente erhielt, reichten Ingenieure der AEG in Berlin nur wenige Tage später ganz ähnlich lautende Patentansprüche ein. Für sie war es zu spät.

Langmuir wurde 1932 Direktor des GE Forschungslaboratoriums, welchen Posten er bis 1950 innehatte. Er blieb aber der GE über diesen Termin hinaus als Consulting Engineer verbunden.

Im April 1912 hatten die Langmuirs geheiratet und wohnten von da an in Schenectady. Sie adoptierten einen Knaben und ein Mädchen. Irving Langmuir starb am 18. August 1957 an den Folgen eines Herzanfalles in Falmouth (Mass.). Seine Frau sagte von ihm, er sei ein ebensoguter Ehemann und Vater gewesen wie ein Wissenschaftler. Bergsteigen in den Rocky Mountains und in der Schweiz, Segeln, Fliegen (er besass lange ein eigenes Flugzeug, das er selber pilotierte, und war mit Lindbergh befreundet) gehörten zu seinen grössten Hobbies. Daneben war er ein begeisterter Musikliebhaber und Naturschützler.

Langmuir wurde mit Ehrungen überhäuft; so war er 15facher Ehrendoktor, Mitglied mehrerer Akademien und Träger von mehr als einem Dutzend Ehrenmedaillen. Die grösste Ehre, der Nobelpreis für Chemie, wurde ihm 1932 zugesprochen. *H. Wüger*