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: 68 (1977)

Heft: 22

Artikel: Recherche de solutions aux problèmes posés par l'utilisation des Askarels dans l'appareillage électrique

Autor: Boyer, P. L.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915085

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: 09.12.2025

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

Recherche de solutions aux problèmes posés par l'utilisation des Askarels dans l'appareillage électrique

Par P.L. Boyer

621.315.615:615.91;

La découverte de l'écotoxicité des Askarels, diélectriques liquides aux propriétés remarquables, a soulevé, outre les implications légales, un ensemble complexe de problèmes technico-économiques aussi bien pour les producteurs d'Askarels que pour les fabricants et les utilisateurs d'appareillage électrique. L'examen de la situation actuelle et des perspectives futures démontre qu'il n'existe aucune solution rapide, unique et définitive à cette situation. Les producteurs de matériaux isolants diélectriques, les fabricants et les utilisateurs d'appareillage électrique devront joindre leurs efforts pour mettre au point les solutions optimales sur les plans techniques et économiques.

Die Entdeckung der Umweltschädlichkeit der als bemerkenswerte flüssige Dielektrika bekannten Askarele hat neben den rechtlichen auch eine ganze Reihe technisch wirtschaftlicher Probleme aufgeworfen, die sowohl die Produzenten der Askarele als auch die Apparatehersteller und die Anwender betreffen. Die Untersuchung der heutigen Situation und der Zukunftsaussichten zeigt, dass es keine schnelle, allgemeingültige und definitive Lösung gibt. Nur gemeinsame Bestrebungen aller Beteiligten können zu den wirtschaftlich und technisch optimalen Lösungen führen.

1. Introduction

Les Askarels sont des liquides diélectriques à base de polychlorobiphényles (PCB) ou de mélanges de ces mêmes PCB avec des chlorobenzènes. Ils présentent une excellente résistance au feu, ne formant pas de mélanges gazeux explosifs en cas de décomposition par l'arc électrique – d'où leur appellation – et se distinguent par leurs remarquables propriétés électriques et leur stabilité thermique et chimique. Ils sont utilisés avec succès, depuis de nombreuses années, dans l'appareillage électrique, en particulier dans les condensateurs de puissance et les transformateurs de distribution. En combinaison avec divers isolants solides, ils ont assuré à cette catégorie d'appareillage électrique une fiabilité élevée, une longue durée de vie et une très grande sécurité de fonctionnement, cela à des coûts favorables se réduisant encore avec les progrès technologiques.

En 1966, des traces de PCB furent découvertes dans l'environnement, ouvrant ainsi le dossier de l'écotoxicité des PCB [1][1]). On leur reprochait, alors, leur toxicité liée à une faible biodégradabilité.

Malgré la publication de recommandations pour l'emploi des Askarels dans l'appareillage électrique [2; 3] et d'appels à l'objectivité [4], en dépit des décisions et recommandations de l'OCDE et des récentes directives de la CEE [5] concernant une limitation raisonnable de la mise sur le marché et de l'emploi des PCB, la pression des milieux écologiques l'emporte aujourd'hui très nettement. Dans ces conditions, les fabricants et utilisateurs d'appareillage électrique contenant des PCB sont inquiétés par:

– la recherche de conformité aux prescriptions légales encore insuffisamment harmonisées dans les pays industrialisés;
– les conditions de destruction des résidus liquides et des déchets solides de fabrication et celle des appareils défectueux en service ou parvenus au terme normal de leur utilisation;
– les précautions et mesures à prendre lors de l'installation de nouveaux appareils contenant encore des PCB;
– la disponibilité toujours plus incertaine des approvisionnements en PCB de qualité conforme aux prescriptions en vigueur;
– l'abandon plus ou moins brutal d'un produit aux performances remarquables au profit de produits ou de technologies apparemment séduisantes mais n'offrant encore aucune garantie suffisante;
– le lancement, d'ailleurs déjà engagé depuis au moins 5 ans, de recherches de solutions de remplacement extrêmement coûteuses dans une situation conjoncturelle peu favorable.

Les progrès réalisés jusqu'ici avec la technologie des PCB et l'accroissement constant des exigences des utilisateurs concernant la fiabilité des appareils et celles du législateur au sujet de l'écotoxicité ont atteint un tel point que la solution à court terme de l'ensemble de ces problèmes paraît utopique.

2. Conséquences de l'utilisation des PCB dans l'appareillage électrique

Trois aspects, au moins, peuvent être considérés pour essayer de comprendre ces conséquences: la situation actuelle de l'écotoxicité des PCB, un essai de synthèse des exigences légales et les conséquences pratiques.

2.1 Situation actuelle de l'écotoxicité des PCB

Malgré les nombreuses recherches entreprises depuis la découverte des traces de PCB dans l'environnement [1], l'unanimité est loin d'être réunie au sujet de l'écotoxicité effective des PCB [6]. La remarquable stabilité des PCB est sans doute liée à leur persistance dans l'environnement et, par conséquent, à leur très faible *biodégradabilité*. Des chercheurs japonais ont pourtant confirmé récemment l'existence de micro-organismes capables de détruire les PCB dans l'environnement avec une période de demi-valeur d'environ 2 mois [7]. Les composés faiblement chlorés des PCB, généralement les plus utilisés dans l'appareillage électrique, ne semblent pas avoir été identifiés d'une manière caractérisée dans l'environnement, sauf probablement dans les pays où les précautions les plus élémentaires de rétention des déchets industriels n'auraient pas été respectées. Enfin, des chercheurs américains [8] ont démontré que le DDT pouvait être transformé, directement ou non, en PCB sous l'action du rayonnement ultraviolet dans l'air, expliquant ainsi la présence de PCB dans des régions fort éloignées des zones industrielles ou habitées. Si les composés plus difficilement biodégradables se sont avérés relativement toxiques, il n'est pas encore définitivement démontré si cette toxicité est imputable à la présence de chlorodibenzofuranes, pouvant être éliminés des PCB, ou aux PCB eux-mêmes.

La *toxicité* des PCB est donc également controversée. En Suisse, les PCB sont considérés comme extrêmement toxiques et répertoriés en classe 1 [9]. Cette classification repose d'une part sur la toxicité aiguë DL_{50} qui est comparable [2] à celle de la plupart des solvants chlorés correspondant aux classes 4 et 5; mais elle tient surtout aux définitions du 5e alinéa, lettres a et b de l'article 13 de l'ordonnance d'exécution de la loi fédérale sur le commerce des toxiques [10]:

«a. Toxicité subaiguë et chronique ou autres effets, cancérigènes ou tératogènes par exemple, lorsqu'ils laissent prévoir un danger beaucoup plus important ou particulier;

b. Danger que présente un toxique en cas d'absorption par voie parentérale, notamment par la peau ou par inhalation.»

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

Selon la réglementation américaine [3], les teneurs maximales en vapeurs de PCB dans l'air, pour une durée d'exposition de 8 h, ne doivent pas dépasser 1 mg/m³ d'air pour les trichlorobiphényles et 0,5 mg/m³ d'air pour les pentachlorobiphényles. Il est intéressant de relever que ces limites sont en bonne concordance avec les valeurs prescrites en URSS.

2.2 Essai de synthèse des exigences légales

La plupart des pays industrialisés ont élaboré ou sont en train de le faire, des lois, des prescriptions, des directives ou des recommandations concernant:

- la production, la vente, le transport, le stockage et l'utilisation des PCB;
- la destruction des résidus liquides et des déchets solides provenant des procédés de fabrication utilisant des PCB;
- le transport, la mise en service, la maintenance des appareils contenant des PCB;
- l'identification des récipients et des appareils contenant des PCB;
- la mise hors service, la récupération et la destruction des appareils contenant des PCB.

Dans le cadre de l'OCDE et de la CEE, une harmonisation a heureusement pu être réalisée [5]. A cette occasion, il s'est avéré nécessaire d'interdire l'emploi des PCB dans les systèmes dits ouverts (p.ex. pesticides, plastifiants pour peintures, encres, etc.) et de l'autoriser dans les systèmes dits fermés et contrôlables dans les cas où les exigences d'ininflammabilité étaient primordiales. Les condensateurs de puissance et les transformateurs de distribution ont été assimilés à cette dernière catégorie. Les applications correspondant aux systèmes fermés non contrôlables (p.ex. les petits condensateurs) devraient être abandonnées dès que des produits ou des technologies de remplacement auront été mis au point.

En Suisse, l'ordonnance sur l'interdiction des substances toxiques [10], article 9 et 13 bis alinéa 1, interdit la fourniture et l'emploi des PCB dans les produits destinés au public ou à l'artisanat. L'article 9 a été l'objet de plusieurs révisions depuis 1971 tenant compte des directives et recommandations de l'OCDE et de la CEE.

Une limitation extrêmement sévère a été introduite au Japon par le MITI, le 21 mars 1972. Elle correspondait pratiquement à une interdiction totale des PCB, à l'exception de quelques applications particulières. Après une période de tolérance, les Etats-Unis ont suivi, pour diverses raisons, l'exemple japonais et envisagent l'interdiction complète des PCB en 1977. La Suède a instauré dès 1973 une stricte limitation légale aux systèmes fermés et contrôlables. La réglementation française est conforme aux directives et recommandations de la CEE, respectivement de l'OCDE. Tous les autres pays se réfèrent plus ou moins directement aux directives et recommandations de la CEE, respectivement de l'OCDE.

2.3 Conséquences pratiques

Elles ont actuellement autant d'importance que les exigences légales. Il n'est pas exclu qu'elle prévalent à court terme pour aboutir à la disparition pratique des PCB.

Les producteurs de PCB ont tout d'abord réduit leur production puisque les applications aux systèmes ouverts étaient interdites [13]. Dès le 1er juillet 1974, ils se sont engagés, en conformité avec les dispositions légales et les recommandations internationales [2], à ne livrer aux fabricants de petits condensateurs – en fait, également aux fabricants de condensateurs de puissance – que des Askarels faiblement chlorés avec une teneur totale en isomères peu biodégradables inférieure à 3,5 %.

Plus récemment, l'un des trois principaux producteurs mondiaux de PCB a annoncé l'arrêt total de sa production en juillet 1977 et de ses ventes à fin octobre 1977. Si cet exemple fait école, il est probable qu'à plus ou moins brève échéance une partie importante du problème des PCB pourrait être résolu. En effet, la disponibilité des PCB devenant incertaine, les utilisateurs seront contraints de rechercher d'autres solutions, voire d'abandonner leur production.

Les utilisateurs d'appareils électriques seront, s'ils ne le sont pas déjà, inquiétés par la disponibilité d'appareils caractérisés par une fiabilité et une durée de vie au moins équivalentes à celles des appareils actuels construits selon une technologie reposant sur l'emploi des PCB. A court terme, les utilisateurs attendent la mise en vigueur de réglementations précises couvrant les conditions d'installation des appareils contenant encore des PCB, la récupération et la destruction sûre et intégrale des appareils défectueux ou parvenus au terme de leur service. Des propositions et des données suffisantes ont déjà pu être accumulées. La concertation des milieux intéressés et surtout l'officialisation des décisions devraient permettre de résoudre ces problèmes. Il faut finalement être conscient que l'application de l'ensemble de ces mesures sera coûteuse. Il ne faudrait cependant pas que la question délicate de l'imputation des coûts soit un obstacle à l'introduction de mesures prises exclusivement dans l'intérêt de la communauté.

3. Recherche de produits de remplacement des PCB

Les fabricants de condensateurs et de transformateurs sont préoccupés depuis plusieurs années par la recherche de solutions au problème des PCB. L'exemple des condensateurs s'avérant plus critique, il a paru judicieux de le retenir comme unique élément de démonstration dans ce chapitre. Avant de donner un aperçu des produits de remplacement des PCB, il est opportun d'établir un inventaire des principales caractéristiques d'un produit de remplacement.

3.1 Caractéristiques d'un produit de remplacement

Dans les conditions actuelles, un diélectrique liquide de remplacement doit nécessairement présenter un ensemble compatible de propriétés.

Propriétés physiques

Viscosité cinématique	inférieure à 10 cSt entre 30 et 70 °C
Point d'écoulement	inférieur à −15 °C
Point de feu (vase ouvert)	supérieur à 200 °C
Résistance au feu	requise
Point d'ébullition	supérieur à 250 °C à 100 kN/m² supérieur à 70 °C à environ 13 N/m²
Mouillage du film de polypropylène	angle de contact proche de 0°
Absorption par le film de polypropylène	5 à 10 % en volume après équilibre; en outre, exigence sur la répétabilité du processus de gonflement du film
Compatibilité avec les matériaux de construction	requise (sur la base de tests comparables à ceux effectués avec les PCB)
Produits de décomposition dans l'arc électrique et lors de décharges partielles	inoffensifs ou susceptibles d'être fixés d'une manière stable

Absorption des gaz	capacité d'absorber l'hydrogène et les hydrocarbures aliphatiques primaires lors de décharges partielles
Domaine thermique d'utilisation	− 65 °C à + 155 °C
Stabilité aux basses températures	aucune chute non-linéaire du seuil de démarrage des décharges partielles

Propriétés chimiques

Indice de neutralisation	inférieur à 0,01 mg KOH/g
Teneur en eau	inférieure à 50 ppm
Chlore ionisable	inférieur à 0,1 ppm
Chlore hydrolysable	inférieure à 1 ppm
Stabilité à l'oxydation	requise, présence de catalyseurs tolérée
Stabilité à l'hydrolyse	requise, présence de catalyseurs tolérée
Réactions d'autocatalyse	à exclure
Aptitude à la purification	requise à l'aide des procédés industriels conventionnels
Stabilité à température élevée et dans le temps	requise; en cas de présence de catalyseurs, connaissance de la période d'induction, des mécanismes de dégradation après cette période

Propriétés électriques

Permittivité	située entre 4,0 et 6,0 (de 50 Hz à 10 kHz); stabilité suffisante, linéaire, reproductible en fonction de la température, de la fréquence, du champ électrique et dans le temps
Pertes diélectriques	inférieures à 0,02 à 90 °C de 50 Hz à 10 kHz; mêmes exigences de stabilité que pour la permittivité
Résistivité volumique	supérieure à 20 GΩm à 90 °C
Rigidité diélectrique	équivalente à celle des fluides diélectriques actuellement disponibles

Propriétés d'écotoxicité

Toxicité	le produit et ses résidus de décomposition doivent être pratiquement non-toxiques. Les tests doivent être agréés par une instance officielle et porter sur: – la toxicité aiguë par voie orale: détermination de la DL_{50} – la toxicité subaiguë et chronique – la toxicité en cas d'absorption par voie parentérale, notamment par la peau ou par inhalation – les éventuels effets cancérigènes ou tératogènes
Biodégradabilité	innocuité des effluents liquides et gazeux et contrôle de: – l'affinité relative du produit avec l'air, l'eau et différents types de sol (cultures) – la solubilité dans l'eau – la stabilité relative du produit sous l'action d'une dégradation par voie microbienne, chimique et photochimique – la bioconcentration relative du produit en déterminant sa solubilité relative dans les graisses et les huiles animales par rapport à sa solubilité dans l'eau

Aspects technologiques

Equipements	utilisation possible dans les installations existantes; spécifications sur les conditions de transfert de la technologie PCB à la nouvelle technologie
Application	condensateurs de puissance, petits condensateurs, transformateurs de distribution et appareillage électrique similaire
Structure diélectrique (spécialement pour les condensateurs)	compatibilité avec les structures actuelles

Aspects commerciaux

Coûts	comparables à ceux des produits utilisés actuellement sur le marché; le prix de la structure diélectrique par unité de volume ou de puissance est plus important que le prix du produit de remplacement.
Disponibilité	produit facilement disponible sur le marché
Destruction des déchets liquides et solides	facile et à coûts réduits
Autres précautions	aucune précaution exceptionnelle pour le transport, l'installation, l'entretien et la destruction des appareils usés

3.2 Aperçu des principaux produits de remplacement des PCB

Les nombreux articles publiés [12...19] et de nombreux brevets déposés [20...29] au cours de ces dernières années, sans compter les études et documents confidentiels non diffusés, reflètent à la fois la complexité et la multiplicité des solutions possibles au problème du remplacement des PCB. Ces solutions ont été considérées à plusieurs reprises [12; 13; 14] si bien qu'après quelques années de recherches et d'expérimentation, une première sélection a pu s'opérer. L'aperçu suivant constitue une synthèse abrégée des principales catégories de produits pouvant entrer en ligne de compte. Il est complété par un tableau comparant quelques caractéristiques intéressantes de l'un ou l'autre représentants de ces catégories de produits (tableau I).

Hydrocarbures naturels: Ils sont représentés par les huiles minérales dont les caractéristiques et, actuellement, la disponibilité ne sont pas satisfaisantes pour l'application spécifique aux condensateurs, sauf dans quelques exceptions remarquables.

Hydrocarbures de synthèse: Ils remplacent avantageusement les hydrocarbures naturels mais requièrent, en raison de leur faible permittivité et de leur médiocre résistance au feu, des adaptations si ce n'est des modifications fondamentales de la construction (structure du diélectrique, disposition des armatures, déconnecteurs à surpression) et de la technique de fabrication des condensateurs. Les principaux représentants sont les polybutylènes, les alkylats du benzène, les diarylalkanes et l'isopropyldiphényle.

Esters naturels: Le principal ester naturel est l'huile de ricin utilisée, sous forme purifiée et sélectionnée, dans les condensateurs haute tension d'accumulation d'énergie. Les caractéristiques très particulières de cet imprégnant rendent difficile son application à d'autres types de condensateurs.

Esters de synthèse: Il existe au moins 4 catégories d'esters de synthèse [14] qui se distinguent par leur permittivité élevée. Par contre, leur faible résistance au feu et, surtout, leur relative instabilité chimique et thermique exigent également certaines adaptations de construction des condensateurs, le recours à des catalyseurs et des précautions suffisantes en fabrication. Les représentants les plus connus des esters sont le dioctylphthalate ou le di(2-ethylhexyl)phthalate (DOP), le dinonylphthalate (DNP), le di-isononylphthalate (DiNP), le dibutylphthalate (DBP) et le di-n-butylphthalate (DnBP). Plusieurs d'entre eux remplacent déjà les PCB dans les petits condensateurs qui peuvent être soumis à des conditions d'utilisation relativement peu sévères. En vue d'améliorer les performances de ces esters et de permettre leur emploi dans les condensateurs de puissance, leur mélange avec des liquides non polaires (hydrocarbures naturels ou de synthèse) et polaires [16] a été expérimenté avec plus ou moins de succès.

Composés aromatiques substitués: Ces liquides jouissent d'avantages incontestables et pourraient se substituer aux PCB si les études d'écotoxicité jusqu'ici favorables peuvent être confirmées officiellement et si certains doutes peuvent être écartés [17]. Les principaux représentants sont le 1,2,4-trichlorobenzène, le dibromoethylbenzène pouvant être très avantageusement utilisé dans les transformateurs [14] et, enfin, les dérivés alkylés du diphényl-éther contenant au maximum un atome d'halogène.

Fluides silicones: Les diméthylsiloxanes et les phénylméthylesiloxanes sont connus depuis de nombreuses années. Leur permittivité relativement faible, leur prix élevé, leur inaptitude à gonfler le film de polypropylène en dépit d'un pouvoir mouillant excellent n'en font pas des candidats immédiatement valables pour le remplacement des PCB. Toutefois, les possibilités de transformation de la molécule de base des polysiloxanes [18] associées à leurs remarquables propriétés chimiques, physiques, à leur écotoxicité relativement favorable, méritent la plus grande considération.

Plusieurs solutions de remplacement des PCB vont donc se trouver confrontées au cours des prochaines années. Le succès de l'une ou de l'autre d'entre elles dépend autant de facteurs techniques et commerciaux que de contraintes légales ou même politiques.

4. Conclusions

La limitation et, éventuellement, la disparition à plus ou moins court terme, des Askarels dans l'appareillage électrique, en particulier dans les condensateurs de puissance et les transformateurs de distribution, sont la conséquence d'une association complexe de facteurs émotionnels, écologiques, légaux et politico-économiques.

Les constructeurs et utilisateurs d'appareillage électrique contenant des PCB désirent, d'autre part, pouvoir disposer rapidement d'une législation ou, au moins, d'une réglementation pertinente et harmonisée concernant les conditions d'utilisation des PCB et de l'appareillage en contenant, les méthodes de récupération et de destruction des différentes catégories de déchets.

Le remplacement des PCB ne s'opérera ni facilement, ni sans risques pour les fabricants et les utilisateurs d'appareillage électrique. Les exigences des spécifications européennes concernant les performances, la fiabilité et la durée de vie du matériel installé constituent un frein puissant à des changements parfois opportunistes mais aussi générateurs de progrès. Dans ces conditions, il n'est pas étonnant que les principales solutions de remplacement des PCB soient expérimentées aux Etats-Unis et au Japon.

Le proche avenir verra sans doute la confrontation de la technologie déclinante des PCB avec d'autres technologies nouvelles. Les marchés potentiels gigantesques d'Afrique,

Comparaison de quelques caractéristiques d'éventuels produits de remplacement des PCB

Légende: +: favorable −: défavorable ±: douteux

Tableau I

Produit de remplacement	Permittivité	Pertes diélectriques	Stabilité		Résistance au feu	Ecotoxicité	Prix+ Disponibilité
			chimique	thermique			
Référence: PCB	+	+	+	+	+	−	+
1. Polybutylènes	−	+	+	+	−	+	+
2. Alkylats du benzène	−	+	+	+	−	+	+
3. Diarylalkanes	−	+	+	+	−	+	+
4. Isopropyldiphényle	−	+	+	+	−	+	+
5. Huile de ricin	+	+	±	±	−	+	±
6. DOP (dioctylphth.)	+	±	±	±	−	±	+
7. DNP (dinonylphth.)	+	±	±	±	−	±	+
8. DBP (dibutylphth.)	+	±	±	±	−	+	+
9. DOP + Polybutylènes	+	±	±	+	−	+	+
10. DBP + alkylats du benzène	+	±	±	+	−	±	+
11. DOP + 1, 2, 4-trichlorobenzène	±	±	±	+	±	±	+
12. 1, 2, 4-trichlorobenzène	+	±	+	+	+	±	+
13. Dibromoéthylbenzène	+	±	+	+	+	±	+
14. Dérivés du diphényléther (alkylés et halogénés)	+	+	+	+	±	±	±
15. Polydiméthylsiloxanes modifiés	−	+	+	+	±	+	−

d'Amérique et d'Asie pourraient alors servir de terrain d'expérimentation aux plus audacieux mais, simultanément, assurer la préparation d'une nouvelle distribution des parts du marché mondial dans le domaine de l'appareillage électrique.

Bibliographie

[1] Report of a new chemical hazard. New Scientist 32(1966)525, p. 612.
[2] Propriété des askarels et recommandations pour leur emploi dans les appareillages électriques. Electra –(1974)33, p. 11...31.
[3] Polychlorinated biphenyls and the environment. Washington DC, US Interdepartmental Task Force on PCBs, May 1972. COM-72-10419.
[4] *E.H. Reynolds:* Askarels – a call for objectivity. Electrical Times –(1976)4400, p. 12...13.
[5] Directives du conseil de la CEE du 27 juillet 1976. Journal Officiel des Communautés Européennes No. L 263 du 27. 09. 1976, p. 201...203.
[6] Report of the proceedings and papers of the US national conference on polychlorinated biphenyls, november 19...21, 1975, Chicago.
[7] Biological decomposition of PCB. Technocrat 9(1976)4, p. 84.
[8] *T.H. Maugh II:* DDT: an unrecognized source of polychlorinated biphenyls. Science 180(1973)4086, p. 578...579.
[9] Liste des substances de base (liste des toxique 1). Edité par le service fédéral de l'hygiène publique. Berne, Centrale Fédérale des Imprimés et du Matériel, 1972.
[10] Loi fédérale sur le commerce des toxiques du 21 mars 1969. Ordonnance d'exécution de la loi fédérale sur le commerce des toxiques du 23 décembre 1971. Ordonnance sur l'interdiction de substance toxiques du 23 décembre 1971 et son complément du 10 mai 1972. Berne, Centrale Fédérale des Imprimés et du Matériel, 1973.
[11] Inscriptions aux tableaux des substances vénéneuses (section I). Conditions d'emploi des polychlorophenyles. Journal Officiel de la République Francaise –(1975)No. du 26 juillet, p. 7600.
[12] *E.H. Reynolds* and *R.M. Black:* Natural and synthetic dielectric liquids. Part 1 and 2. Insulation Engineer –(1972)7, 8+9.
[13] *M.G. Broadhurst:* Use and replaceability of polychlorinated biphenyls. Environmental Health Perspectives –(1972)October, p. 81...102.
[14] *L.L. Jackson:* Industrial organic chemicals as alternative dielectric fluids. IEEE Conference Paper No. C74 265–5, Power Engineering Society, 1974.
[15] *A.J. Rutkowski* and *E.O. Forster:* Development of a new electrical capacitor fluid. IEE conference on dielectric materials, measurements and applications 21...25 july 1975. IEE Conference Publication No. 129, p. 229...233.
[16] *R. Tobazéon* and *E. Gartner:* Behaviour of some new polar impregnants for capacitors. IEE conference on dielectric materials, measurements and applications 21...25 july 1975. IEE Conference Publication No. 129, p. 225...228.
[17] *B. Rey-Coquais:* Some comments on alternatives to PCB's. US national conference on polychlorinated biphenyls, november 19...21, 1975, Chicago.
[18] *G.A. Vincent, T. Orbeck* and *W.T. Brooks:* Modification of partial discharge behavior of silicone insulating liquids. IEEE Conference Paper No. C*75 243–1, Power Engineering Society, 1975.
[19] *K.Takashima:* Polypropylene film slashes size and power losses of high-voltage, high-power condensers. JEE, Journal of Electronic Engineering –(1976)109, p. 40...42.
[20] *J.W. Eustance:* Stabilized ester impregnated capacitors. US Patent No. 3754173 (1973).
[21] *J.W. Eustance:* Stabilized ester impregnant. US Patent No. 3833978 (1974).
[22] *Y. Iijima:* Oil-impregnated capacitor. US Patent No. 3900774 (1975).
[23] *R.H. Munch:* Capacitor and dielectric impregnant composition therefore. US Patent No. 3948787 (1976).
[24] *W.T. Brooks:* Electrical devices containing improved dielectric fluids. US Patent 3948789 (1976).
[25] *J.F. Lapp* und *F.S. Sadler:* Elektrischer Kondensator und Verfahren zu seiner Herstellung. BRD Offenlegungsschrift Nr. 2503799 (1975).
[26] *D.G. Shaw:* Elektrischer Kondensator. BRD Offenlegungsschrift Nr. 2548339, (1974).
[27] *R.H. Munch:* Impregnated capacitor. US Patent No. 3745432 (1973).
[28] *S.D. Ross* and *M. Finkelstein:* Electrical capacitors having substituted ester impregnants. US Patent No. 3855508 (1974).
[29] *P. Jay:* Verwendung von Gemischen von Isopropyldichlordiphenylen als dielektrische Flüssigkeiten. BRD Auslegeschrift Nr. 2248716 (1971).

Adresse de l'auteur

Pierre-Louis Boyer, physicien dipl., Condensateurs Fribourg SA, 1700 Fribourg.

Gustav Theodor Fechner 1801–1887

Fr. Frommanns Verlag (Hauff), Stuttgart

Techniker dürfen sich nicht auf ihre Gefühle verlassen und sind gewohnt, alles zu messen. Bei menschlichen Empfindungen müssen sie aber die Beziehungen kennen, die zwischen dem physikalisch messbaren Reiz und dem, was wir mit unsern Sinnen empfinden, bestehen. Diese bilden den Inhalt des *Weber-Fechnerschen Gesetzes.*

Professor E. H.Weber, in Leipzig, fand zwischen 1830 und 1834, dass mit dem Tastsinn eine Gewichtsänderung feststellbar ist, wenn sie mehr als $^1/_{50}$ bis $^1/_{40}$ des Gewichtes beträgt. Von 1850 bis 1860 baute dann Fechner das Webersche Gesetz auf Grund zahlloser Versuche und Messungen zum allgemeingültigen Weber-Fechnerschen Gesetz aus. Darnach ist die Empfindung proportional dem Logarithmus des Reizes. Das gilt für das Gehör, die Augen, den Tastsinn und wahrscheinlich auch für Geruch und Geschmack.

Gustav Theodor Fechner wurde am 19. April 1801 in Gross-Särchen (Sachsen) als Sohn eines Pfarrers geboren. Früh verlor er seinen Vater. Von 1817 bis 1822 studierte er in Leipzig Medizin und schloss mit dem Doktorexamen ab. Er hatte jedoch keine Freude an diesem Beruf und übte ihn nie aus. Wie schon während des Studiums verdiente er seinen Lebensunterhalt mit literarischen Arbeiten; er übersetzte u.a. die Lehrbücher von Biot und machte selber viele Versuche. 1824 übernahm er vertretungsweise und ohne Bezahlung Physikvorlesungen. 1834, ein Jahr nach seiner Verheiratung, wurde er ordentlicher Professor für Physik. Total überarbeitet erkrankte er 1840 schwer und erholte sich erst nach drei Jahren allmählich wieder. Doch die Physikprofessur war unterdessen anderweitig vergeben worden.

Durch die Krankheit verändert, wandte sich Fechner der Philosophie zu. An der Universität Leipzig las er nacheinander über Naturphilosophie, Psychophysik und schliesslich über Ästhetik. Goldene Hochzeit, 50-Jahr-Jubiläum als ordentlicher Professor und die Ernennung zum Ehrenbürger der Stadt Leipzig bildeten die letzten Höhepunkte im Leben des bis ins hohe Alter unermüdlich Schaffenden. Am 18. November 1887 starb er an den Folgen eines Schlaganfalles. Fechner hinterliess ein sehr umfangreiches und vielseitiges literarisches Werk. Von humoristisch-satirischen Schriften, die er unter dem Pseudonym «Dr. Mises» herausgab, reichte es über reine Physik, Psychophysik (experimentelle Sinnesphysiologie, subjektive Farberscheinungen, das W.F.-Gesetz), Kunstkritik und Ästhetik bis zur Lehre, dass nicht nur die Menschen, sondern alles, Pflanzen, Tiere, ja sogar die Himmelskörper beseelt seien. Während das Weber-Fechnersche Gesetz seinen Wert bis auf den heutigen Tag behalten hat, sind seine Lehren, schon damals kritisiert, fast in Vergessenheit geraten.

H. Wüger