Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 16 (1925)
Heft: 4

Artikel: Huiles minérales pour transformateurs et interrupteurs
Autor: Stäger, H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057281

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: 22.08.2025

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

Projets de normalisations et normalisations définitivement adoptées.

Huiles minérales pour transformateurs et interrupteurs.

Conditions de livraison et spécifications techniques exigées en Suisse, introduites par une étude de

M. le Dr. H. Stäger, Baden (Suisse)

sur la provenance et la nature des huiles et les méthodes d'essais dans différents pays.

Introduction.

L'écorce terrestre est composée en majeure partie de matières minérales et réfractaires et de plus elle contient des substances organiques connues sous les noms de organoïdes, organolithes ou caustobiolithes qui sont combustibles et se présentent à l'état gazeux, liquide ou solide. A ce groupe de corps organiques se trouvant dans la nature appartiennent les bitumes, qui eux-mêmes englobent le naphte, le pétrole brut ou huiles minérales. Ces dernières sont employées en grande quantité pour les transformateurs et interrupteurs comme huiles isolantes et dans la technique en général, comme huiles de graissage.

Afin de donner un aperçu de l'origine de ces importants matériaux techniques, quelques considérations sur leur connexité génétique, leur provenance et leur traitement sont nécessaires. D'après Engler[1]) les bitumes sont des corps organogènes fossiles à l'état solide, liquides ou gazeux, composés en majeure partie de carbures d'hydrogène et contenant encore le plus souvent de l'oxygène, de l'azote et du soufre.

Le tableau ci-après[2]) donne une idée du classement des huiles minérales qui nous intéressent avant tout dans ce groupe important de corps.

Bitumes bruts						
Saponifiables	Insaponifiables					
Cire de Sapropel Bitumes de houille brune	Gaz naturel	Pétrole brut			Cire de terre	Asphalte naturel
	Composant principal méthane	Distillats		Résidu	Ozokérite (par distillation paraffine et cire de câble)	Carbures d'hydrogène solides visqueux contenant souvent du soufre
		Benzine de pétrole Huiles de graissage **Huiles isolantes**	Paraffine	Huiles de graissage (Huile à cylindres, goudron de pétrole coke de pétrole)		

Les huiles minérales proprement dites sont obtenues par distillation du pétrole brut et donnent, après traitements spéciaux, les *huiles isolantes.* Ainsi que nous l'avons fait plus haut pour les bitumes, nous voulons encore donner ici une définition exacte du terme „huiles minérales" (Frank[3]) vu qu'il existe aujourd'hui plusieurs définitions fausses et pouvant prêter à confusion.

Les huiles minérales sont un groupe de corps qui: ou bien se trouvent dans la nature, essentiellement à l'état liquide sous le nom de „pétrole brut" ou „naphte", ou bien sont obtenues par pyrogénation de minéraux ou de matières premières fossiles.

Comme complément à cette définition, on peut encore y ajouter la définition encore plus précise adoptée en 1922 par l'Association des Chimistes Allemands[4]).

On entend par „huiles minérales", aussi bien dans le commerce que dans la littérature scientifique et technique, des corps liquides qui, à l'opposé des corps gras végétaux et animaux, sont insaponifiables. Les carbures d'hydrogène formant la base des huiles minérales sont au point de vue chimique de nature aliphatique ou naphténique. Les huiles minérales dérivent du règne minéral et se présentent à nous soit comme composants de produits naturels, „le pétrole brut", ou parfois aussi comme produits synthétiques obtenus par distillation destructive des corps bitumineux contenus dans le pétrole brut.

Les huiles et graisses animales et végétales sont des produits d'assimilation et de transformation; ils sont saponifiables, tandis que les huiles minérales sont des carbures d'hydrogène insaponifiables formés au cours des différentes périodes géologiques. Pendant longtemps il a existé deux théories sur la formation du pétrole brut: la théorie inorganique et la théorie organique.

La théorie inorganique de Mendelejeff, Sabatier et Sendenrens admet la formation dans la nature de carbures de métaux dûs à l'action du carbone sur les métaux, et la décomposition de ces carbures par l'eau en carbures d'hydrogène, qui, par condensation et polymérisation, se seraient transformés en pétrole brut. Moissan a réussi effectivement à reproduire ces réactions et à faire grâce à des conditions expérimentales appropriées la synthèse d'un produit semblable au pétrole brut.

[1]) Engler-Höfer, das Erdöl. vol. I, 5.

[2]) Holde, Kohlenwasserstofföle und Fette. Ed. 6. Berlin 1924.

[3]) Isolierstoffe der Elektrotechnik, Springer 1924, 337.

[4]) Zeitschrift für angewandte Chemie, 35 et 306 (1922).

Mais cette théorie ne pouvant pas expliquer plusieurs faits et propriétés observées, le monde scientifique se rattache de nos jours presque exclusivement à la seconde théorie, *la théorie organique* qui a été tout spécialement étudiée par Engler et Höfer et qui fait dériver le pétrole brut d'organismes d'origine végétale et animale. Au cours de la putréfaction de ces organismes, les matières albuminoïdes azotées se décomposent en premier lieu en ammoniaque et en corps solubles, tandis que les matières grasses et cireuses, plus stables, restent encore intactes et forment les premiers éléments du pétrole brut.

La preuve pratique de cette assertion a été fournie par Engler[5]) qui a pu transformer, sans formation de carbone, des corps gras et cireux en carbures d'hydrogène. (L'expérience fut faite au moyen d'un tube complètement fermé et coudé. Une des branches contenant les matières premières fut chauffée à 400° C et Engler put constater dans l'autre branche la présence de benzine, pétrole, huiles de graissage et de produits goudronneux.) Il est évident que l'on ne peut pas admettre dans la nature une température aussi élevée, mais par contre un temps beaucoup plus étendu et une pression plus haute.

L'explication de l'activité optique de certaines huiles (rotation du plan de la lumière polarisée) qui ne pouvait pas être donnée par la théorie inorganique a pu être fournie, grâce à la théorie organique, par Marcusson qui explique cette activité par la présence de cholestérine (la cholestérine est un alcool de constitution très compliquée qui se trouve toujours dans les graisses animales et forme, lors de sa décomposition, des produits optiquement actifs). Les graisses végétales contiennent également un produit semblable, la phytostérine. Cette théorie purement chimique de la formation du pétrole brut a été complétée dernièrement encore, grâce aux recherches de Potonié. Il a démontré que ce que l'on peut appeler les matières en pourriture dans les eaux stagnantes (Sapropel) dans lesquelles les matières organiques mortes d'origine animale et végétale[6]) ne se putréfient qu'en partie à cause du manque d'oxygène, forment la matière première du pétrole brut. Au cours de cette putréfaction partielle, les corps non gras (albumine et cellulose) se décomposent, il se forme un dépôt gris-vert très riche en corps gras qui, par la formation subséquente de couches géologiques, subit une forte pression et se transforme lentement en un corps solide ardoisin (saprocol) et bitumineux. Cette transformation n'est donc pas due, comme on l'a souvent soutenu, à des phénomènes extraordinaires et catastrophaux, mais simplement à l'action lente des conditions naturelles et journalières.

a) Transformation des produits résineux et cireux gras en bitumes. (Il existe naturellement plusieurs produits intermédiaires).

b) Dégradation de ces complexes à poids moléculaires élevés, par l'action de fortes pressions et de la chaleur.

[5]) Berichte der Deutschen chemischen Gesellschaft, 21, 22, 26 et 30.

[6]) Nous devons considérer ici avant tout des plantes telles que les algues, etc., qui contiennent d'avantage de corps gras que les plantes ordinaires telles que les arbres, etc.

Engler donne la classification suivante des bitumes en se basant sur tous les faits observés jusqu'à ce jour.

1° *Anabitumes.* Bitumes se trouvant encore en formation (cire de sapropel, pyropisite, cires cadavériques) étant solubles et se composant d'éther-sels, d'acides et d'hydrocarbures en plus ou moins grande quantité.

2 *a) Polybitumes.* Produits de condensation et de polymérisation insolubles. (Minéraux bitumineux, charbons de Boghead) contenant des hydrocarbures polymérisés à poids moléculaires élevés et en partie oxydés.

2 *b) Catabitumes.* Produits de dégradation partielle des bitumes mentionnés sous 2 *a.* Ils sont solubles à chaud.

3° *Ekgonobitumes, Pétrole brut* contenant des carbures d'hydrogène ainsi que des restes des espèces mentionnées sous 1 et 2.

4° *Oxybitumes ou asphaltes.* Produits d'oxydation et de polymérisation des elgonobitumes 3.

La métamorphose générale n'est pas exclusivement conforme à cette théorie. Il existe des produits intermédiaires qui ne suivent pas absolument les mêmes règles de formation et ainsi s'explique facilement, comme nous le verrons après, la grande diversité des pétroles bruts que l'on trouve dans la nature.

A la suite de ces quelques considérations, il est facile de comprendre que les pétroles bruts ne sont pas liés à une période géologique déterminée et se trouvent dans les couches les plus différentes. Le pétrole brut, étant liquide, ne peut pas former de couches, mais s'infiltre dans les roches et terrains perméables[7]).

Il est absolument impossible de trouver du pétrole brut dans des couches complètement imperméables. Il se trouve essentiellement dans les couches sablonneuses ou molassiques, c'est-à-dire sédimentaires. Une autre condition pour le rassemblement de grandes quantités de pétrole est que ces terrains perméables soient pour ainsi dire enfermés dans des couches imperméables ou tout au moins repose sur une couche imperméable, par exemple de schiste argileux.

La fig. 1 donne une idée d'un profil géologique, dit anticlinal, où le pétrole brut se trouve en

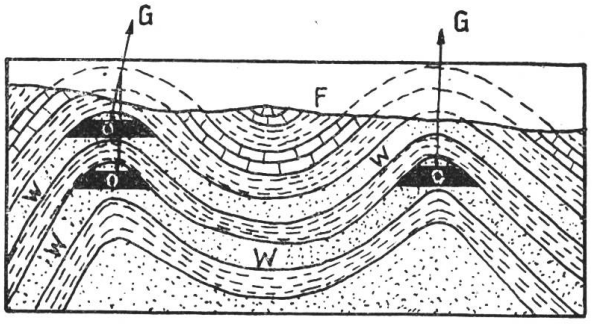


Fig. 1.
O = huile. W = eau. G = gaz. F = surface.

présence d'eau. L'eau, le pétrole et les gaz naturels (produits de décomposition du pétrole) se

[7]) Pour plus de détails voir: Höfer, das Erdöl, vol. II ou Blumer, Erdöllagerstätten, Enke 1923.

superposent suivant leur densité. Si par contre il y a absence d'eau, nous aurons une formation synclinale (fig. 2).

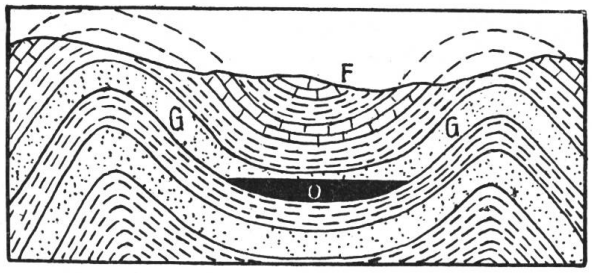


Fig. 2.
O = huile. G = gaz. F = surface.

Sur les gisements pétrolifères, nous pouvons faire les remarques suivantes:

1° Le pétrole brut se trouve dans toutes les formations géologiques subséquentes au silurien.
2° Le pétrole brut n'a aucun rapport avec les phénomènes volcaniques, mais par contre il semble que, dans certains charbonnages, une parenté existerait entre le charbon et le pétrole brut.
3° Les plus grands gisements de pétrole brut se trouvent là où la stratification est la plus régulière.
4° Dans les couches plissées, le pétrole brut se trouve surtout en formation anticlinale.
5° Une condition essentielle pour le bon rendement de gisements pétrolifères est la présence de couches imperméables.
6° Le pétrole brut se trouve habituellement avec de l'eau salée dans la même couche.

L'extraction se fait de la manière suivante: on perce un puits jusqu'aux couches contenant le pétrole, puis on amène celui-ci à la surface au moyen de pompes. Souvent la pression des gaz naturels est assez forte pour que l'huile monte d'elle-même jusqu'à la surface ou forme même une sorte de puits artésien de très fort débit.

La constitution du pétrole brut change de gisement en gisement, tant au point de vue physique que chimique. On a constaté des diversités dans la même région et parfois aussi dans le même puits. Les pétroles bruts peuvent contenir différents carbures d'hydrogène et se laissent classer suivant leur constitution. La meilleure classification, celle de Höfer[8]), est la suivante:

1° *Pétroles à base aliphatique.* Ils contiennent plus de 66 % de carbures d'hydrogène aliphatiques (formation en chaîne).
2° *Pétroles à base naphténique.* Ils contiennent plus de 66 % de naphtènes (carbures d'hydrogène cycliques et saturés).
3° *Pétroles à base naphto-aliphatique.* Ils contiennent moins de 66 % de carbures d'hydrogène aliphatiques ou de carbures d'hydrogène naphténiques.
4° *Pétroles de constitution anormale.*

En suivant le processus de formation des pétroles au point de vue géologique on trouve que les pétroles à base naphténique sont les plus récents; viennent ensuite les pétroles naphto-aliphatiques et les pétroles à base aliphatique qui sont les plus anciens. Il est par contre très probable, comme le démontrent d'ailleurs les pétroles à base naphto-aliphatique, que les matières premières sont les mêmes pour tous les pétroles.

Nous pouvons classer les différentes régions pétrolifères de la manière suivante: les contrées où l'on trouve des pétroles du

type 1 sont: la Pensylvanie, la Virginie;
type 2 sont: le Texas, la Louisiane, la Californie, la Russie;
type 3 sont: l'Ohio, l'Illinois, l'Indiana et certaines contrées roumaines;
type 4 est: Bornéo (Constitution aromatique).

Les pétroles bruts extraits ne peuvent pas être directement transformés en huiles de graissage. Ils ne sont pas seulement différents quant à leur constitution chimique mais sont aussi très variables quant à leur constitution physique. Ils contiennent des fractions de distillation très différentes. Certains pétroles contiennent beaucoup de matières volatiles et conviennent pour la fabrication d'essence de benzine: d'autres contiennent par contre davantage de constituants à point d'ébullition élevé et servent de point de départ à la fabrication des huiles de graissage.

Quelques exemples d'analyses suffiront à éclaircir cette question.

Analyse d'un pétrole brut de Pensylvanie (Analyse de Redwood[9]):

Densité	= 0,789
Benzine	= 32 %
Kérosine (Pétrole) .	= 64,4 %
Résidu de distillation	= 3,6 %

Autre pétrole brut de Pensylvanie:

Densité	= 0,810
Benzine	= 20 %
Kérosine	= 50 %
Huile de graissage .	= 25,5 %
Coke	= 1,2 %

Pétrole brut russe de la contrée de Tiflis (Analyse de Schädler):

Densité	= 0,90
Benzine	= 5,9 %
Kérosine	= 23,5 %
Huile de graissage .	= 60,1 %
Résidu	= 10,5 %

Pétrole brut du Gouvernement Elisavetpol:

Densité	= 0,95 à 0,96
Huile de chauffage .	= 40 %
Huile à cylindres .	= 40 %
Goudron	= 15 %
Pertes de distillation	= 5 %

Afin d'obtenir de l'huile appropriée à l'usage que l'on veut en faire, il faut être très soigneux dans le choix des matières premières, c'est-à-dire du pétrole brut. Cette question qui a une très grande importance pour la fabrication des huiles pour transformateurs et interrupteurs, fera encore plus loin l'objet d'une étude spéciale.

Le procédé de fabrication des huiles est en résumé le suivant: le pétrole brut est fractionné dans des alambics. Aujourd'hui afin d'éviter la

[8]) Chemiker-Zeitung *46*, 42 (1922).

[9]) Petroleum, vol. I, 196 (1904).

décomposition du pétrole brut, la distillation est faite dans le vide ou au moyen de vapeur d'eau surchauffée. La vapeur doit être aussi surchauffée que possible de manière à pouvoir continuellement former une couche protectrice entre les parois de l'alambic directement exposées à la flamme, et le pétrole brut.

Les procédés de distillation par vapeur surchauffée et dans le vide peuvent être réunis et l'on peut employer dans plusieurs cas cette distillation combinée. Par la distillation, on obtient plusieurs fractions qui sont alors raffinées spécialement, suivant le but qu'elles doivent remplir.

Nous avons déjà pu nous rendre compte plus haut par la classification des bitumes dans quelle catégorie se trouvent les huiles qui nous intéressent. Ce tableau peut encore être complété, car nous sommes à même de classer les différents produits obtenus par la distillation du pétrole brut.

Fraction	Emploi
1° Benzine et distillats volatils . . .	Solvant pour vernis, graisses, caoutchouc (laboratoire).
a) éther de pétrole	
b) rigoline	
c) benzine légère (Solvant) . . .	
d) essence de benzine	Moteur à explosion.
2° Kérosine et huiles d'éclairage . .	Eclairage et chauffage (lampes et fourneaux). Pour moteurs à explosion fixe. Pour le procédé du „Craking". (Décomposition en benzine au moyen de la chaleur et de forte pression.)
a) huiles d'éclairage	
b) huiles combustibles	
c) kérosine blanche.	
3° Huiles lourdes non visqueuses . .	Gaz „Pintsch" gaz bleu.
a) gazoline	(Pour „Craking", chauffage) coupage des huiles de graissage, nettoyage des machines, absorption du benzène et de la benzine contenus dans les gaz naturels. Moteur Diesel.
b) huiles pour absorption . . .	
c) huiles pour moteur Diesel . .	
4° Distillats lourds et visqueux . . .	
a) huiles médicales	Pour crêmes, pommades, médicaments.
b) huiles émulsives	
c) huiles de graissage	Graissage des machines.
d) *huiles isolantes*	Isolation électrique.
e) vaseline	Pour masses isolantes, compound.
f) paraffine	
5° Résidus liquides	Combustibles pour centrales électriques et autres. Goudronnage des routes (Macadam).
a) huiles à chauffage	Calfatage, etc.
b) résidu visqueux	
c) huile à cylindres	Graissage des cylindres (vapeur surchauffée).
6° Résidus demi-solides et solides . .	Goudronnage des routes, calfatage, balais en charbon électrodes en carbone, matériel de construction.
a) asphalte	
b) goudron	
c) coke	

De tous les distillats que nous avons mentionnés ci-dessus, ceux du paragraphe 4 nous intéressent le plus particulièrement. Ce sont ces derniers qui forment la matière première pour la fabrication des huiles isolantes.

La distillation ne fournit pas des huiles que l'on peut employer directement. Chaque distillat contient encore plus ou moins de corps asphaltiques et résineux qui renferment des combinaisons sulfureuses, oxygénées et azotées; en outre, malgré tous les soins que l'on apporte à la distillation, il se forme quand même des produits de décomposition. Tous ces sous-produits ont une grande influence sur l'huile et peuvent facilement l'altérer. Leur élimination est nécessaire et, à cet effet, l'huile doit encore subir un traitement spécial, „le raffinage".

De toutes les méthodes de raffinage préconisées, celle de l'action combinée de l'acide sulfurique et de la soude caustique est employée avec le plus de succès. Elle est très répandue de nos jours. Comme nous l'avons déjà constaté plus haut, le pétrole brut se compose de carbures d'hydrogène aliphatiques et naphténiques. Ces carbures sont très résistants à l'action de l'acide sulfurique, tandis que les composants secondaires mentionnés et les carbures non saturés sont très facilement attaqués par ce réactif; ils se transforment en corps solubles dans l'eau et peuvent être ainsi éloignés par épuisement. L'acide employé pendant cette première phase du raffinage est ensuite neutralisé dans une seconde phase avec de la soude caustique et le tout est séparé de l'huile. Afin de purifier complètement les huiles, il faut encore les filtrer au travers de silicates naturels absorbants. (Terre à foulon, filtrol.) Cette filtration peut se faire de deux manières différentes.

On peut soit mélanger la substance filtrante à l'huile et de nouveau séparer le mélange au moyen d'un filtre-presse, ou alors par percolation c'est-à-dire par filtration directe de l'huile à travers plusieurs couches épaisses du corps absorbant.

Avant de quitter les problèmes de l'extraction et de la fabrication des huiles isolantes et de passer à ceux de leur emploi et de leur analyse, il est bon de consacrer encore quelques lignes aux huiles de résine quoique les normes présentes ne se rapportent qu'aux huiles minérales. Nous aurons d'ailleurs par la suite l'occasion de faire encore quelques comparaisons entre les huiles de résine et les huiles minérales.

Les huiles de résine ne sont pas comme les huiles minérales des carbures d'hydrogène obtenus par distillation et raffinage du pétrole brut, elles sont obtenues par distillation de la colophane. Au cours de cette opération, il se forme à côté de produits volatils (essences de résine ou pinoline) un distillat visqueux nommé huile de résine ne distillant qu'à une température supérieure à 300° C.

Cette huile brute contient, tout au contraire, des huiles minérales, à peu près 30 % de corps résineux acides (distillés par entraînement), et 70 % de carbures d'hydrogène *cycliques*. Elle doit encore être raffinée au moyen d'acides, de soude caustique et de chaux, avant de pouvoir être employée comme huile isolante.

Propriétés des huiles isolantes dans les transformateurs.

Les huiles employées comme *huiles de transformateurs* doivent satisfaire aux exigences les plus variées; elles ne doivent pas seulement avoir certaines propriétés physiques, une viscosité basse (meilleur pouvoir réfrigérant possible) ou une rigidité diélectrique élevée, mais aussi être très stables au point de vue chimique.

L'oxygène de l'air ou celui que l'huile tient en dissolution, attaque l'huile, l'oxyde c'est-à-dire la décompose. Certains produits de réaction diminuent surtout le pouvoir réfrigérant, d'autres influencent les propriétés diélectriques (l'eau par exemple) ou bien encore attaquent les isolants. Les différentes conditions auxquelles doivent suffire les huiles pour transformateurs sont les suivantes:

I. Les huiles doivent être absolument neutres et ne pas attaquer les matières isolantes.
II. Afin d'éviter tout danger d'explosion et d'incendie, les points d'éclair (inflammabilité des vapeurs) et de combustion ne doivent pas être inférieurs à une certaine température.
III. La viscosité doit être faible et le point de congélation aussi bas que possible.
IV. Les huiles ne doivent pas former d'acides ou de dépôts après un échauffement prolongé.
V. Les huiles doivent être de bons isolants.

Toutes ces conditions n'ont pas la même importance. Les points I, II, III par exemple peuvent être observés directement par le fournisseur, il lui suffit de bien choisir les pétroles bruts. En conséquence, nous ne nous attarderons pas sur ces trois points par la suite et nous nous contenterons de relever les principales questions qui s'y rapportent. Pour les conditions de livraison, il s'agit avant tout de trouver et de fixer les conditions les mieux appropriées pour le fournisseur et pour le constructeur.

Remarques sur I. Les données contenues dans les normes présentes sont suffisantes et n'ont pas besoin d'être l'objet d'une étude spéciale. La question de l'influence de l'huile sur le coton sera traitée parallèlement avec celle des propriétés des huiles à chaud.

Remarques sur II. Le point d'éclair de l'huile est la température à laquelle l'huile dégage assez de vapeurs pour former avec l'air un mélange explosif s'enflammant au contact d'une veilleuse. Mais il ne faut pas perdre de vue que cette température n'est pas celle à laquelle l'huile continue à brûler après l'éloignement de la flamme de la veilleuse et qu'on appelle point de combustion.

Le point d'éclair ne donne donc qu'une idée de la température minimum nécessaire à développer la quantité de vapeurs indispensable pour atteindre la limite inférieure d'explosion. Théoriquement, nous pouvons définir exactement le point d'éclair de la façon suivante:

Le véritable point d'éclair est la température à laquelle une quantité infiniment grande d'huile donne au contact avec une quantité d'air un mélange explosif au cas d'une élévation infiniment petite de la température.[10]) Mais le point d'éclair tel que nous le mesurons avec les appareils à notre disposition est d'habitude plus haut et varie souvent beaucoup suivant l'appareil employé. L'appareil de Marcusson pour la détermination du point d'éclair est très employé de nos jours, il est très exactement décrit dans les normes présentes.

Le point d'éclair a son importance, mais l'idée que des incendies de transformateur sont dûs à des points d'éclair trop bas, est fausse. Nous avons déjà constaté plus haut que le point d'éclair ne donne que la limite inférieure d'explosion et que l'huile ne continue à brûler après l'éloignement de la flamme de la veilleuse qu'à la température dite „Point de combustion". Or le point de combustion est, pour les huiles qui nous intéressent, au moins de 20 à 30° C plus élevé que le point d'éclair. Il n'y a donc pas de raisons techniques importantes pour exiger un point d'éclair très élevé, d'autant plus que l'on rejetterait ainsi tout un groupe d'huiles minérales de très bonne qualité qui dans ce cas ne satisfairaient plus aux conditions prescrites pour les huiles de transformateurs. Stern[11]) dit très justement, dans ses remarques sur les conditions de livraisons allemandes pour la fourniture des huiles de transformateurs et d'interrupteurs, qu'à sa connaissance, aucun incendie de transformateur n'a été occasionné par un point d'éclair de 140° C, et que tous les incendies dont il a eu connaissance ont été occasionnés par la formation d'un arc électrique. Il donne comme exemple le cas d'un transformateur incendié qui était rempli d'une huile ayant un point d'éclair de 170° C et ajoute que la température de l'arc électrique est telle que l'huile se serait aussi enflammée même au cas où son point d'éclair aurait été de 50° C ou même de 100° C plus élevé.

---

[10]) Ubbelohde, Festschrift des III. Petroleumkongresses 1907.

[11]) ETZ *43*, 141 (1922).

La température d'un transformateur en service ne doit pas dépasser 95° C. Pour la cuisson des huiles, on emploie une température maximale de 110° C, de sorte que le point d'éclair de 145° fixé par les normes suisses est absolument suffisant et motivé.

Un essai en rapport avec le point d'éclair[12]) et qui n'est presque plus fait de nos jours consiste à déterminer la perte par évaporation. Cette perte ne devait pas être supérieure à 0,4 % après cuisson de l'huile pendant 5 heures à 100° C. Les raisons pour lesquelles cet essai n'est plus pris en considération sont nombreuses.

La perte par évaporation devient de plus en plus faible et s'annule avec le temps, car les composants volatils qui en sont la cause s'évaporent graduellement. De plus, on peut obtenir des résultats très différents suivant les conditions dans lesquelles on opère et d'autre part, ces conditions d'expérience ne sont pas conformes aux conditions sous lesquelles se trouve un transformateur en service.

Dans certaines constructions de transformateurs l'huile n'a que de très petites surfaces de contact avec l'air extérieur; la plus grande partie des vapeurs d'huile se développant en vase clos, se condense de nouveau sous le couvercle de la cuve. Stern qui s'est spécialement occupé de cette question a publié une courbe des pertes par évaporation en fonction du temps (température: 100° C) et constate qu'après 30 heures d'échauffement déjà, la perte par évaporation n'est plus que 1/3 de ce qu'elle est après 5 heures.

On peut compter, pour un transformateur, dont l'huile n'est pas en relation directe avec l'air ambiant, qui contient 5 tonnes d'huile et dont la température de service est de 100° C, une perte annuelle par évaporation de 30 cm³. Il a été constaté, au cours de nombreuses expériences faites en Angleterre[13]), que la quantité d'huile employée pour de telles expériences a une grande influence sur le résultat final; les mêmes expériences ont en outre montré que les pertes par évaporation ne dépendent nullement du degré d'humidité de l'huile ainsi qu'on l'a souvent supposé. La conséquence inévitable et juste de toute ces constatations est l'abolition de la détermination des pertes par évaporation. Les arguments que Mathis[14]) fait valoir pour la détermination de cette perte perdent leur valeur en face de cet état de chose. En considération de ces faits, les normes de l'A. S. E. ne font pas mention de cet essai.

Remarques sur III. Le pouvoir réfrigérant de l'huile dépendant de la facilité avec laquelle elle peut circuler, sa viscosité devra être aussi basse que possible. Cette condition a surtout une grande importance pour les transformateurs fonctionnant à l'extérieur, leur construction spéciale offrant une très grande résistance à la circulation de l'huile. La détermination de la viscosité est décrite très exactement dans les normes présentes qui fixe comme limite supérieure de la viscosité 8° E, à 20° C. Ainsi qu'on peut le voir d'après la fig. 3, les huiles peuvent avoir une viscosité très différente suivant leur origine. La courbe 1 donne une idée de la viscosité en fonction de la température d'une huile à base aliphatique, la courbe

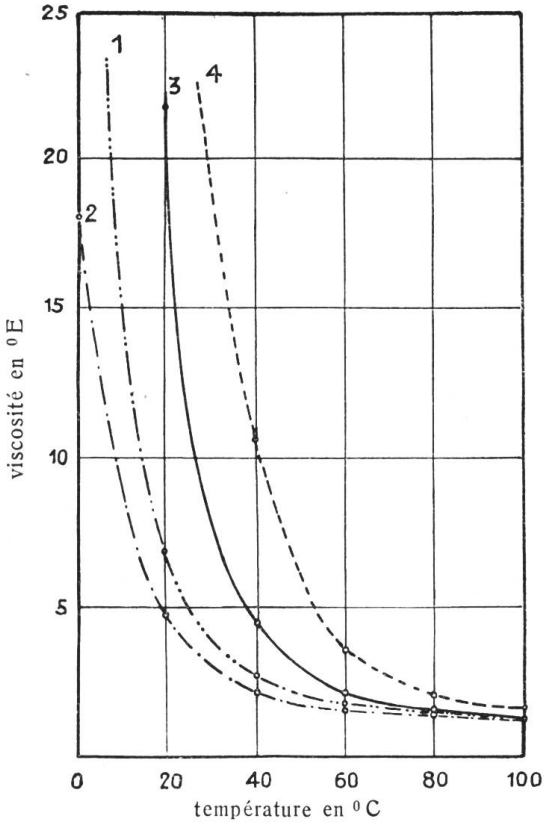


Fig. 3.

2 d'une huile à base naphténique et la courbe 3 d'une huile de résine[15]). Il ressort très clairement de ces diagrammes que les huiles naphténiques possèdent la courbe la moins cintrée, c'est-à-dire la plus favorable. La courbe 4 est celle d'une huile de résine après quelque temps de service; le changement dû à l'épaississement relativement rapide de ces huiles est très frappant. Les huiles minérales par contre n'accusent, après le même temps de service aucun changement important quant à la viscosité.

Il est à remarquer en outre que la viscosité d'huiles différentes devient sensiblement égale à de hautes températures; à 100°, par exemple, nous obtenons pour les 3 huiles mentionnées plus haut la même valeur à peu de chose près. Aux basses températures par contre, les courbes divergent très fortement (voir, par exemple, les courbes de la fig. 4) pour une huile aliphatique et une huile naphténique. Cette même figure illustre aussi très clairement la différence capitale existant entre les huiles aliphatiques et les huiles naphténiques, quant à leurs propriétés aux basses températures. La courbe de fluidité de l'huile à base aliphatique accuse au point de congélation un fléchissement très marqué. A cette température l'huile devient trouble, différents composants (paraffine, carbures d'hydrogène encore fluides à la température ordinaire) précipitent et forment une sorte de tissu empêchant la circulation des composants encore liquides. Les huiles naphté-

[12]) Die Transformatoren- und Schalteröle, Berlin 1923. Mineraloljer for Electroteknisk Bruk, Kristiania 1923.
[13]) Journal of the Institute of E. E., Vol. *61*, 661 (1923).
[14]) Revue générale de l'électricité 582 (1923).
[15]) Brauen ETZ *35*, 145 (1914).

niques, par contre, ne possèdent pas un point de congélation aussi marqué, elles deviennent simplement de plus en plus épaisses mais restent

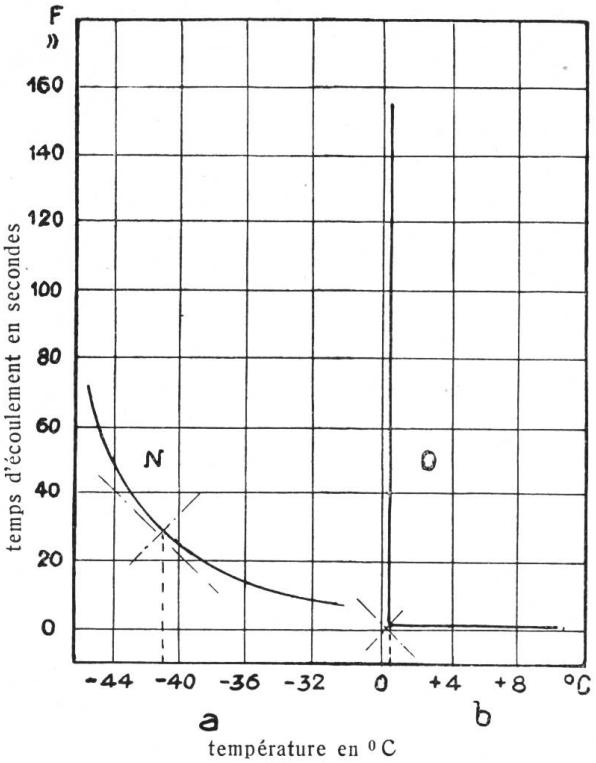


Fig. 4.

N = huile naphténique. O = huile à base aliphatique.

claires et ne se solidifient qu'à de très basses températures.

Les huiles de résine ont aussi un point de congélation assez bas. Afin d'éclaircir cette question au point de vue pratique, la société Brown Boveri & Cie a fait dans ses locaux d'essais une série d'expériences avec des huiles congelées à moins 11° C et des résistances de chauffage[16]) et a fixé en outre graphiquement (fig. 5), en fonction du temps, les fluctuations de la température d'une huile préalablement congelée puis chauffée par place. Il a été constaté (fig. 5) que l'on arrive, dans un laps de temps relativement court, à une température constante. Ces conditions sont encore plus favorables dans un transformateur ordinaire où la surface et la capacité calorifique des sources d'échauffement sont beaucoup plus grandes. Les transformateurs à radiateurs extérieurs sont beaucoup plus sensibles sous ce rapport. La tuyauterie oppose à l'huile congelée une très grande résistance et la pompe à circulation d'huile devient insuffisante, ce qui occasionne naturellement un arrêt complet de la réfrigération. Les normes de l'A. S. E. tiennent tout particulièrement compte de cet état de choses et le point de congélation de l'huile a été fixé de telle sorte que toutes les huiles pouvant occasionner de telles perturbations ne remplissent pas les conditions de livraison. La détermination de la courbe de viscosité des huiles à des températures basses étant relativement compliquée et, en plus, le but à atteindre étant seulement de savoir si l'huile est encore suffisamment fluide à une température fixée, les normes de l'A. S. E. ne prévoient qu'un simple essai dans une éprouvette. Au cas où une détermination plus exacte serait nécessaire on peut la faire d'après les données contenues dans le mémoire cité plus haut, et l'on obtient ainsi des courbes telles que celles de la fig. 4.

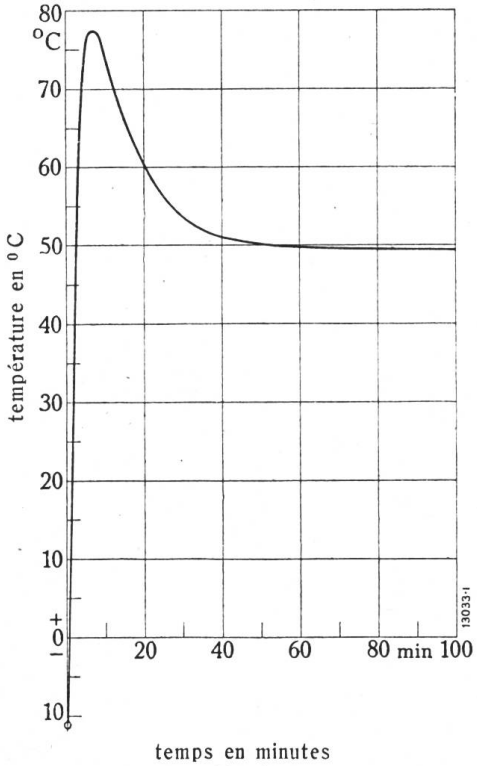


Fig. 5.

Remarques sur IV. La condition la plus difficile à remplir à laquelle doivent suffire les huiles pour transformateurs est celle d'être stables à des températures élevées, c'est-à-dire de ne pas s'oxyder, ni se décomposer, ni former des dépôts ou des corps pouvant nuire à l'isolant. Cette question qui a une grande importance est très complexe et nous voulons la traiter quelque peu en détails afin d'en donner une idée aussi exacte que possible, et de combattre plusieurs affirmations erronées, que l'on rencontre dans la littérature technique et scientifique.

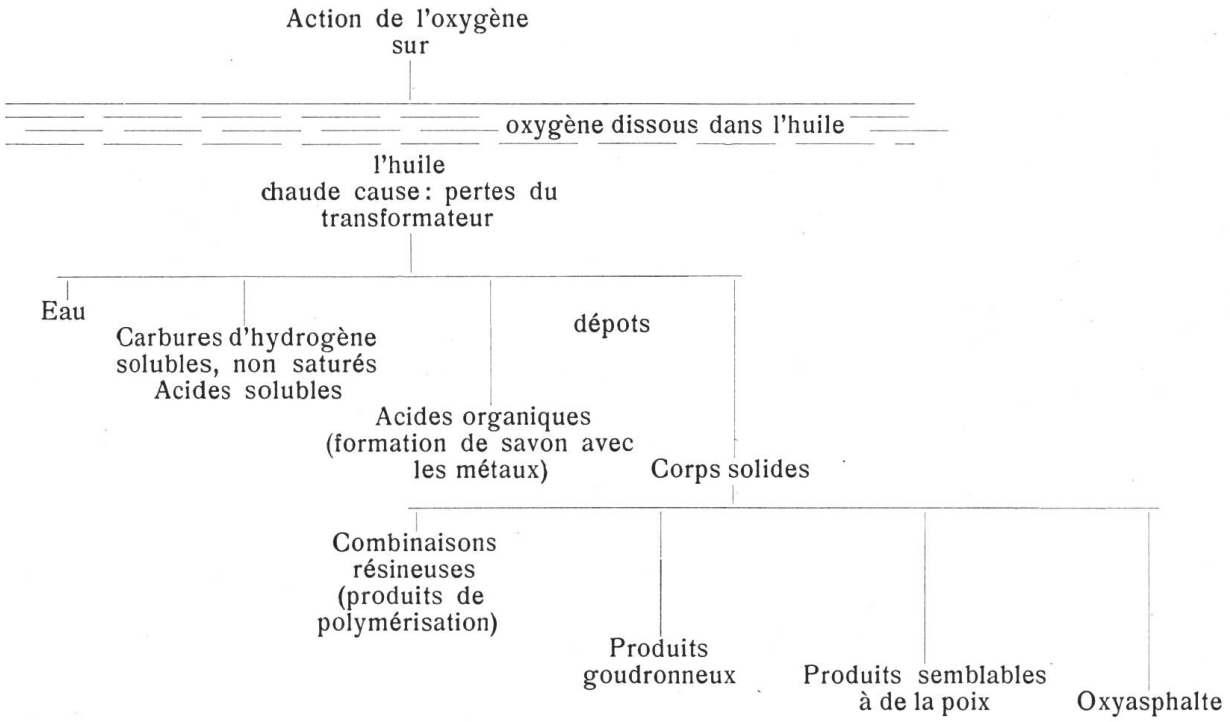
Nous avons déjà pu nous rendre compte, dans l'introduction, de la diversité des huiles suivant leur origine et leurs procédés de fabrication. Il est donc évident que leurs produits de décomposition et d'oxydation seront aussi très variés. Nous avons en effet des transformations différentes dans les mêmes classes de corps et, de plus, des réactions multiples entre ces différentes classes.

La température d'un transformateur en service ne doit pas être supérieure à 90° C. L'huile chaude est en contact avec l'oxygène de l'air qui fonctionne comme oxydant. L'huile possède aussi la propriété de dissoudre 16 à 18 % en volume d'oxygène de sorte que même sans présence d'air, nous avons la possibilité d'une oxydation. Les produits de réaction pouvant se former sont les suivants: de l'eau, des acides solubles et des acides insolubles dans l'huile, qui eux-mêmes peuvent se polymériser, se condenser et former ainsi des combinaisons neutres;

[16]) Revue BBC *9*, 14 (1922).

ces acides à poids moléculaires élevés se nomment acides asphaltogènes. Les composants neutres des dépôts peuvent avoir un caractère résineux ou être des produits d'oxydation; ils sont dénommés asphaltènes ou carbènes. Pour éviter toute confusion nous donnons encore un schéma de Rodmann[17]) sur les produits de décomposition des huiles.

que des produits volatils. Ces derniers, qui s'attaquent plus spécialement à l'isolant, ne peuvent pas être recueillis et analysés exactement; nous sommes obligés de constater simplement leur présence à leurs effets. Une méthode d'analyse devra donc pouvoir représenter par des valeurs numériques l'attaque de l'huile sur le coton; nous reviendrons encore sur cette question.



Rodman distingue plusieurs sortes de dépôts.[18]) Les dépôts saponifiables qui se déposent de préférence sur les corps de réfrigération, donnent facilement lieu à la formation d'oxydes et de sels métalliques, et sont un très bon moyen de transport pour l'humidité. Les dépôts insaponifiables, semblables à de l'asphalte, sont plus fréquents; ce sont des produits neutres d'oxydation et de polymérisation se déposant tout spécialement sur les enroulements. Ils ont un très mauvais coefficient de conductibilité calorifique, empêchent donc le refroidissement et occasionnent ainsi la formation de centres d'échauffement exagéré et toutes sortes de perturbations. La troisième catégorie enfin est représentée par les dépôts charbonneux qui ne peuvent se former que sous l'action de l'arc électrique.

L'auteur de ce travail a déjà publié plusieurs mémoires sur les huiles pour transformateurs[19]) dans lesquelles il classe les dépôts en: *dépôts solubles* dans l'huile chaude, qui sont composés surtout de combinaisons saponifiables et en *dépôts insolubles* dans l'huile chaude qui eux contiennent en majorité des combinaisons insaponifiables.

En outre il se forme encore des acides solubles, des carbures d'hydrogène non saturés ainsi

Ces quelques considérations suffisent à montrer la complexité du problème et les difficultés que présente l'analyse des huiles. Cette analyse doit quand même pouvoir saisir tous les produits de réaction et en déterminer l'influence respective.

Toute cette question se complique encore du fait que la décomposition ne suit pas invariablement les mêmes phases. Elle varie suivant l'origine, le procédé de fabrication des huiles et le mode opératoire de l'analyse même. Il est très important d'insister sur ce point que des huiles de même origine, analysées d'après la même méthode, peuvent donner des résultats très différents suivant le procédé de fabrication employé. La distillation n'est pas le seul facteur important, il faut aussi considérer le raffinage proprement dit. Les produits de décomposition de pareilles huiles sont aussi la plupart du temps complètement différents, tant au point de vue qualitatif que quantitatif.

Afin de protéger les acquéreurs d'huile et de leur donner un moyen de contrôle, diverses associations d'électrotechniciens ont rédigé des conditions de livraison, des cahiers des charges, etc., dans lesquelles sont données les méthodes les plus variées pour l'analyse des huiles et particulièrement des méthodes tendant à contrôler l'attitude des huiles sous l'action de la chaleur et de l'oxygène (tendance à former des dépôts).

Pour motiver la méthode préconisée par les normes présentes (propriétés de l'huile à haute température), nous passerons encore brièvement

[17]) Electric Journal 51 (1923).
[18]) Transaction of the American Electrochimical Society *40*, 99 (1922).
[19]) Revue BBC '*9*, 159 (1922).
Helvetica Chimica acta *6*, 62, 386, 893 (1923).

en revue les différentes méthodes d'essai de ce genre employées de nos jours.

1° *Méthode française*[20]) (tendance à former des dépôts). L'huile est soumise à un chauffage de 135 heures à 150° C dans une petite éprouvette de verre, puis la teneur en dépôts est déterminée gravimétriquement. Comme nous le démontrerons plus loin, la température de 150° C est beaucoup trop élevée, car il existe une certaine température critique au-dessus de laquelle les produits d'oxydation et de décomposition de l'huile ont d'autres propriétés que dans les transformateurs. De plus, cette méthode ne tient aucun compte des acides formés au cours de l'essai. Ces acides, ainsi que nous l'avons vu plus haut, sont solubles dans l'huile et peuvent être très nuisibles. La spécification des huiles est donc incertaine et l'on risquerait facilement de conseiller l'emploi d'une huile qui est en réalité absolument inutilisable. Nous reviendrons d'ailleurs sur ce point.

La méthode française prévoit encore un essai de décoloration. L'huile cuite de couleur foncée, est étendue avec de l'alcool amylique jusqu'à ce que la décoloration provoquée par ce réactif ait amené l'huile à sa couleur primitive. Le rapport entre le volume d'alcool amylique employé et le volume d'huile prélevé donne l'indice de décoloration. Cet essai est complètement inutile et de plus inexact. Les corps colorant l'huile ne sont pas les mêmes à l'état initial et après cuisson. Donc nous ne pouvons plus avoir de base de comparaison directe. En outre, il n'existe aucun rapport entre la coloration de l'huile et sa tendance à former des dépôts; l'auteur de ce mémoire a déjà eu l'occasion d'analyser des huiles ne formant aucun dépôt, même après un essai de longue durée, mais devenant par contre noire (brun très foncé) déjà après un temps très court (les corps colorants étaient en solution et ne précipitaient même pas à froid).

2° *Méthode belge*[21]). Cette méthode prévoit la cuisson de l'huile dans un récipient de forme donnée pendant 10 heures à 200° C, et la détermination quantitative des dépôts se formant au cours de ce traitement. Nous avons déjà vu que la température de 150° C est trop haute, donc celle de 200° C présentera encore beaucoup plus de désavantages. A cette température, nous entrons déjà dans le domaine de la pyrogénation, donc l'huile formera des produits de décomposition n'ayant aucun rapport avec les dépôts que l'on peut récolter dans les transformateurs; les résultats obtenus seront donc faux et ne donneront aucune idée des propriétés de l'huile en service. Les dépôts se formant éventuellement au cours de cet essai, contiendront dans le cas le plus favorable des carbènes et surtout des composants de nature charbonneuse, substances que l'on n'a jamais rencontrées dans un transformateur. Une autre méthode également absolument inutilisable est celle qui a été proposée par Waters[22]). Il détermine ce que l'on pourrait appeler l'indice de „cokéfication" (carbonisation test), l'huile est cuite en présence d'air pendant $2^1/_2$ heures à 250° C. Après refroidissement, elle est étendue avec de l'essence de pétrole légère et le précipité qui en résulte filtré et pesé. Cette méthode a des désavantages encore bien plus conséquents que les précédents.

3° *Méthode anglaise*[23]) (Sludge Test du Dr. Michie). Nous voulons nous arrêter un peu plus longuement sur cette méthode qui contient plusieurs conditions spéciales. L'huile contenue dans un matras est cuite pendant 45 heures à 145° C, avec barbotage d'oxygène et en présence de cuivre comme catalyseur (on appelle catalyseur un corps ayant la propriété d'accélérer une réaction sans y prendre directement part). Le matras est chauffé dans un bain d'huile. Le dépôt qui se forme au cours de l'essai est filtré et pesé. Le barbotage de l'huile se fait avec de l'oxygène purifié au moyen de flacons laveurs (fig. 6). Cette méthode diffère principalement des deux méthodes que nous avons déjà mentionnées plus haut

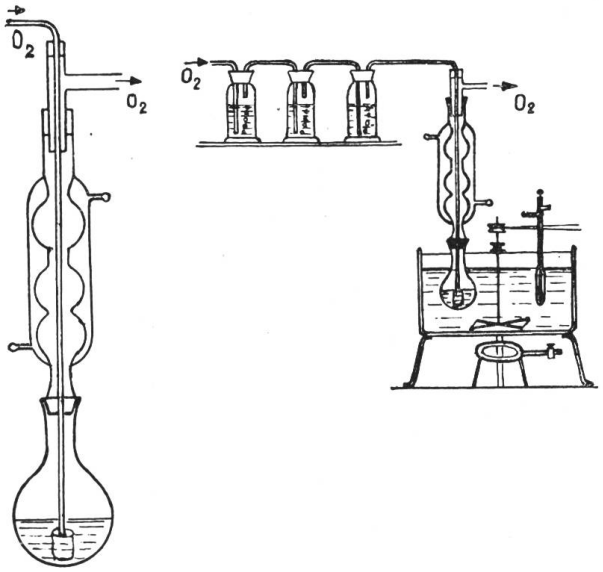


Fig. 6.

en deux points: elle emploie un catalyseur (le cuivre) et un procédé d'oxydation forcée (soufflage d'oxygène).

En ce qui concerne la température de 145° C, nous ne pouvons que répéter la critique déjà faite pour les méthodes française et belge. La British Electrical and Allied Research Association[24]) a fait toute une série d'expériences et a aussi pu prouver que la température de 150° C est effectivement trop haute; elle a proposé de l'abaisser à 120° C. A la suite d'expériences faites dans les laboratoires de la Société Brown Boveri & Cie, il a en outre déjà été démontré qu'il existe une température critique lors de la décomposition des huiles. Elle varie à peu près entre 115 et 120° C. A des températures inférieures à 115 – 120° C, l'huile forme, sous l'influence de l'oxygène de l'air, des produits d'oxy-

[20]) Cahier des charges pour la fourniture des huiles pour transformateurs. Union des Syndicats de l'Electricité Paris.

[21]) Conditions auxquelles doivent satisfaire les huiles pour transformateurs et interrupteurs. Comité Electrotechnique belge.

[22]) Circular Bureau of Standards No. 99 (1920).

[23]) Journal of the Institute of E. E., 1923.

[24]) loc. cit.

dation polymérisés à poids moléculaires élevés et de nature acide ou neutre; à des températures supérieures à 115 – 120° C, se forment, par contre, en majorité des combinaisons à poids moléculaires bas qui, pour la plus part, sont très volatils. En outre, on peut aussi constater la formation d'une grande quantité d'acides solubles dans l'huile, dont on peut immédiatement déceler la présence, si l'on a soin de déterminer l'indice d'acidité de l'huile cuite. Cette décomposition, que l'on peut nommer distillation destructive, est complètement différente de celle ayant lieu dans les transformateurs. Les raffineurs peuvent profiter de l'imperfection de cette méthode en livrant des huiles ayant subi un raffinage spécial, ne formant aucun dépôt mais par contre de grandes quantités d'acides. Les huiles, dite blanches, par exemple, que cette méthode qualifie d'excellentes, sont absolument inutilisables comme huiles pour transformateurs. Comme elles ont subi un raffinage très prononcé, elles sont très sensibles aux agents oxydants. A notre avis, il se produit au cours de ce raffinage forcé un certain „Craking" c'est-à-dire une dégradation des carbures d'hydrogène à poids moléculaires élevés ou du moins un changement quelconque rendant les molécules instables et du même coup l'huile beaucoup plus sensible aux agents destructeurs. Lorsque nous soufflons une huile semblable avec de l'oxygène, il se forme exclusivement des produits de réaction acides ainsi que Brauen[25]) l'a démontré. Ce sont des peracides qui, comme tels, se décomposent facilement en abandonnant de l'oxygène à l'état naissant (Statu nascendi). Cet oxygène a, comme on le sait, un pouvoir oxydant beaucoup plus prononcé que l'oxygène moléculaire, il détruit complètement les isolants et favorise l'oxydation de l'huile. Il est dès lors très compléhensible que ces huiles soient inutilisables (nous désirons ici non pas seulement rendre le lecteur attentif à ces faits, mais directement lui déconseiller l'emploi de telles huiles; nous ajouterons que les huiles incolores, semblables à de l'eau, appartiennent à cette catégorie). Nous donnerons encore plus loin des valeurs numériques relatives à l'attaque des huiles sur le coton. Toutes ces réactions sont d'ailleurs connues depuis longtemps et ont déjà été le but de maintes expériences et recherches;[26]) il existe même plusieurs brevets qui avaient une très grande importance pendant la guerre et qui décrivent différents procédés rendant possible la transformation des huiles minérales en acide gras et cela au moyen de conditions semblables à celles décrites ci-dessus. Actuellement les spécialistes anglais proposent pour le soufflage de remplacer l'oxygène par de l'air, afin d'obtenir des produits réactionnels plus conformes à la réalité.

4° *Méthode allemande* (indice de goudronnification). L'huile est soufflée avec de l'oxygène pendant 70 heures à 120° C puis, après refroidissement, traitée avec la liqueur de Kissling (solution alcoolique de soude caustique). Les produits de réaction séparés par ce traitement sont précipités avec de l'acide, extrait de la liqueur et pesés. A l'opposé des méthodes étudiées jusqu'à présent, qui ne considèrent que la formation des dépôts, l'indice de goudronnification n'a trait qu'aux produits de décomposition acides. L'influence catalytique du cuivre n'est pas prise en considération.

A coté de cette méthode officielle existent plusieurs variantes par exemple le remplacement du soufflage par la simple cuisson à l'air libre ou encore par l'oxydation au moyen de peroxyde de sodium. Ces trois méthodes ne donnent pas toujours les mêmes résultats, spécialement lorsqu'elles sont employées sur des huiles très raffinées. Lors de la critique de la méthode anglaise, nous avons vu qu'il était complètement erroné de ne considérer que la formation des dépôts, mais il est tout aussi faux de ne se baser, comme le fait l'indice de goudronnification, que sur les produits acides. Les huiles blanches qui satisfont aux conditions anglaises possèdent de très hauts indices de goudronnification, et ainsi ne remplissent pas les conditions allemandes; mais par contre d'autres huiles, comme nous avons déjà pu le constater à plusieurs reprises, donnent des indices de goudronnification égaux, tout en étant de qualité très différente. Les recherches de l'auteur de ces lignes à ce sujet ont d'ailleurs tout dernièrement été confirmées de plusieurs côtés. (Mémoires anglais et américains et surtout une série d'expériences faites au Laboratoire fédéral d'essais de combustibles de l'Ecole polytechnique, Professeur Dr. Schläpfer.)

5° *Méthode américaine* (Life Test). Cette nouvelle méthode proposée par Snyder[27]) ne considère de nouveau que la formation de dépôts. Les échantillons d'huile sont chauffés dans un appareil fermé à travers lequel on peut faire passer un courant d'air. L'huile est cuite à 120° C, jusqu'à ce qu'on puisse constater la présence d'un dépôt. Snyder fait très justement remarquer, comme il l'a constaté au cours d'essais antérieurs, que l'indice de goudronnification ne permet pas de qualifier sûrement une huile, vu que, pour les transformateurs la plupart des dépôts analysés se composaient en majeure partie de corps neutres et non pas d'acides. En outre, il attache aussi une grande importance à ce fait: l'huile ne doit pas subir, au cours de la méthode d'essai, une oxydation forcée (température élevée, soufflage d'oxygène), vu qu'il se forme sous de telles conditions des produits de décomposition différents de ceux que l'on trouve dans les transformateurs. La méthode anglaise qui emploie une température élevée et le soufflage d'oxygène donne, d'après Snyder, des résultats complètement faux. Ces quelques considérations ont une grande importance pour nous. Elles confirment absolument notre propre point de vue.

La méthode américaine a pourtant aussi un grand désavantage; le même que nous avons déjà rencontré, lors de la critique des méthodes 1, 2, 3. Elle ne considère que la formation des dépôts, ce qui peut éventuellement fausser ses résultats. Les huiles blanches par exemple, qui ne donnent aucune trace de dépôts et forment

[25]) loc. cit.

[26]) Grün und Wirth, Zeitschrift für angewandte Chemie *33*, 291 (1920) *36*, 125 (1923).
Tütünikoff, Zeitschrift für angewandte Chemie *37*, 300 (1924).
Siebeneck, Petroleum *18*, 1193 (1923).

[27]) American Society for Testing Materials 1923.

de grandes quantités d'acides, de peracides attaquant l'isolant, se comportent très bien au cours de l'essai américain et de l'essai anglais. D'après ces deux méthodes, elles pourront être considérées comme huiles de première qualité, cette appréciation étant, ainsi que nous l'avons déjà vu, complètement fausse.

Les principaux points auxquels nous devions consacrer toute notre attention lors de la rédaction des normes présentes étaient donc les suivants:

a) La température au cours de l'essai ne doit pas être supérieure à 115–120° C.

b) Les huiles donnant des produits réactionnels très différents suivant leur origine et leur degré de raffinage, nous ne sommes pas autorisés à qualifier l'huile par la simple considération d'un des groupes de produits de décomposition, soit les dépôts ou les acides. Nous devons pouvoir déterminer d'une part

les acides solubles
les acides insolubles
le dépôt proprement dit

et d'autre part pouvoir contrôler, s'il y a lieu, la présence et l'influence de corps peroxydables.

c) Tout raccourcissement de la durée de l'essai, par utilisation, par exemple, de barbotage avec de l'oxygène doit être évité. Pour obtenir des produits de décomposition semblables à ceux qui se forment dans un transformateur et ainsi des résultats sûrs, nous devons absolument avoir recours à un essai de longue durée.

La méthode d'essai de la société Brown Boveri respecte tous ces différents points. Elle est employée avec succès depuis de nombreuses années déjà, elle a été adoptée, avec quelques modifications par la commission des normes pour huiles de transformateurs de l'A. S. E.

6° *Méthode suisse.* Le mode opératoire de cette méthode étant décrit en détails dans les conditions de livraison ci-inclues, nous nous bornerons ici à passer en revue les principales conditions expérimentales de cet essai. L'huile (1 litre) est cuite pendant 2 semaines dans un récipient en cuivre à la température de 115° C (température de service maximum plus 20° C). Le premier échantillon est sorti après une semaine. Dans l'huile est immergé en outre du fil de coton enroulé sur un cadre de verre. La résistance du fil de coton est mesurée avant et après l'essai de manière que l'on puisse se rendre compte de l'action de l'huile sur l'isolant (peroxydation).

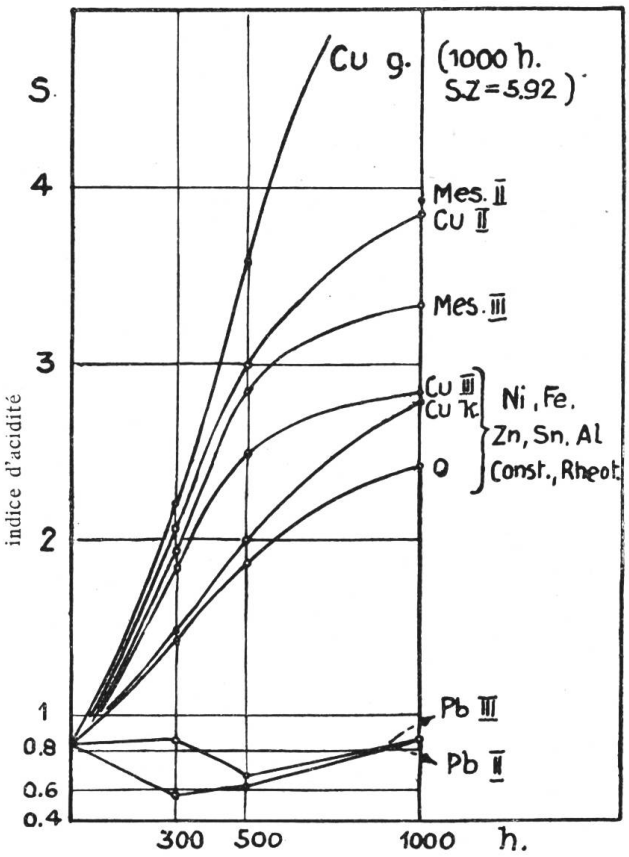
Par traitement approprié, on détermine la teneur en dépôt et l'indice d'acidité des échantillons d'huile cuite prélevés au cours de l'essai.

Cette méthode qui tient compte de tous les points cités sous *a, b* et *c,* ne possède qu'un seul catalyseur: le cuivre.

Stäger et Bohnenblust[28]) ont démontré que les produits réactionnels obtenus en présence de métaux comme catalyseurs sont absolument de même nature que ceux qui se forment dans les transformateurs. Seul le plomb fait exception à cette règle; il entraîne la formation de produits très spéciaux. Hill[29]) a obtenu les mêmes résultats. *L'emploi du cuivre n'offre donc aucun danger.*

Avant de donner un aperçu numérique sur les résultats que l'on obtient d'après les différentes méthodes que nous avons étudiées plus haut et la méthode suisse, nous voulons tout d'abord essayer de donner une idée exacte de la décomposition des huiles (formation d'acides et de dépôts). Les expériences ont été faites avec des huiles différentes qui ont été soumises à des essais de longue durée (1000 heures).

La formation des acides n'est pas une réaction continue, elle subit des fluctuations périodiques, comme il a pu être constaté par la détermination journalière de l'indice d'acidité. La représentation graphique de l'indice d'acidité, en fonction du temps, donnera donc une courbe ascendante et irrégulière, présentant des fluctuations périodiques. Pour plus de simplicité, nous ne considérerons à l'avenir que l'allure ascendante de la formation d'acides. La fig. 7 nous donne une idée de la formation des acides. Ces courbes sont la représentation graphique des indices d'acidité en fonction du temps pour une huile donnée cuite en présence de différents métaux. La fig. 8, par contre, illustre, sous les mêmes conditions, la formation des dépôts en fonction du temps. Si nous étudions ces deux figures, nous voyons immédiatement que la formation des dépôts et



temps en heures
Fig. 7.

[28]) Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens *15,* 93 (1924).

[29]) Electrical World *81,* 747 (1923).

celle des acides ne marchent pas de pair. Le moment où la formation des dépôts devient plus intense coïncide assez exactement avec une

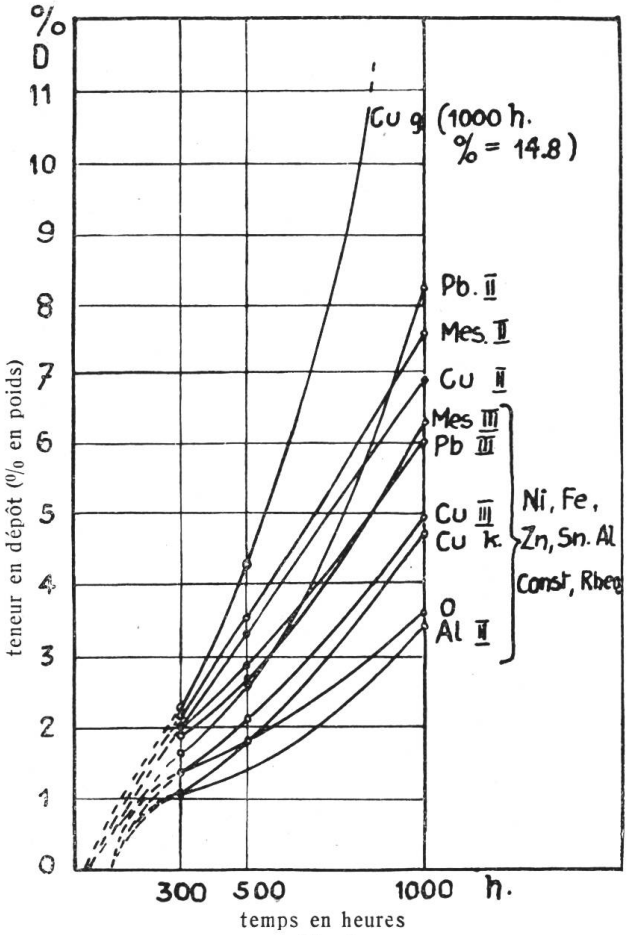


Fig. 8.

diminution de l'intensité de la formation des acides. Dès lors, il est très compréhensible que l'indice de goudronnification donne des résultats ne correspondant aucunement à la tendance qu'ont les huiles à former des dépôts. La figure hors texte ci-jointe donne une idée de cet état de choses; elle représente deux huiles différentes ayant le même indice de goudronnification et ayant subi exactement le même traitement. (Méthode d'essai BBC).

Un autre exemple montrant les désavantages de la méthode française, par exemple, est le suivant: deux huiles A et B soumises à l'essai français (tendance à former des dépôts) donnèrent comme résultats:

% en dépôts	A = 0,13 %	B = 0,17 %
indice d'acidité après traitement	A = 0,28	B = 1,18

La méthode française, ne considérant que le pourcentage en dépôts, taxe donc ces deux huiles d'équivalentes, ce que fait d'ailleurs aussi la méthode allemande, les indices de goudronnification étant de:

A = 0,09 % B = 0,12 %

Si nous comparons par contre l'indice d'acidité après traitement, nous voyons immédiatement que ces deux huiles sont de qualités très différentes.

Après 300 heures de cuisson à 115° C dans des récipients en cuivre, ces deux mêmes huiles donnent des résultats différents, qui eux sont en rapport avec leur décomposition en service:

% en dépôts . . .	A = 0	B = 0
indice d'acidité après 300 heures . . .	A = 0,4	B = 0,26
diminution de la résistance du fil de coton	A = 42 %	B = 15 %

Nous voyons donc que ces deux huiles sont équivalentes quant à leur tendance à former des dépôts mais par ailleurs très différentes, surtout en ce qui concerne leur action sur le fil de coton.

Nous voulons ici encore étudier d'une façon plus approfondie le problème de l'influence de l'huile sur le coton. Il se forme dans l'huile, comme nous l'avons déjà vu, des combinaisons semblables aux peroxydes qui attaquent la cellulose (coton). Sous l'action de ces agents, la cellulose est oxydée et se transforme en oxycellulose, qui se présente à l'état pur sous forme de poudre blanche. La formation progressive de ce corps se fait au détriment du coton ce qui occasionne tout naturellement une diminution toujours plus grande de la résistance du fil de coton. Le dosage quantitatif de l'oxycellulose, ainsi formée, est obtenu au moyen de l'indice de cuivre[30]) qui est très employé dans l'industrie

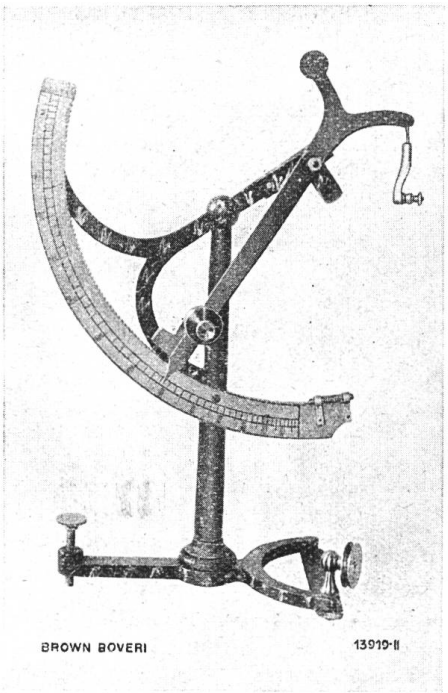


Fig. 9.

textile. Cet indice croît avec la contenance en oxycellulose et par conséquent, plus l'indice de cuivre devient grand, plus le coton perd de sa

[30]) L'indice de cuivre est le nombre de grammes de cuivre qui peut être précipité de la liqueur de Fehling par 100 grammes de cellulose.

résistance. Il est bon de remarquer que cet indice ne peut être déterminé avec succès que par des personnes déjà initiées.

Nous donnons ci-après un tableau comparatif de quelques valeurs obtenues au cours de l'analyse de deux huiles différentes. La résistance du fil de coton a été mesurée au moyen d'un petit dynamomètre représenté par la fig. 9.

Les critiques que nous avons faites plus haut sur les différentes méthodes sont donc certainement exactes. Nous aimerions encore tout spécialement attirer l'attention sur ce fait qu'un grand nombre d'expériences semblables ont été exécutées et que les résultats ainsi récoltés, correspondent avec les observations faites dans la pratique. Nous avons déjà mentionné plus haut

	Résistance à la traction du fil de coton 90/2		Indice de cuivre	Indice de goudronnification	Sludge	Indice d'acidité	Teneur en dépôts
	Etat initial	Après 100 heures	Après 1000 heures			Après 1000 heures	Après 1000 heures
Huile 1							
Barbotage d'oxygène à 120°	240 g	0	9	0,18	0	36	0
Cuite à l'air		56 g	7,9			12,2	0
Huile 2							
Barbotage d'oxygène à 120°	240 g	190 g	2,2	0,15	0,1		0
Cuite à l'air		235 g	1,2			0,38	0

Le fil de coton avait, après 1000 heures de traitement dans l'huile No. 2, encore une résistance de: 120 g dans l'huile soufflée avec de l'oxygène,
145 g dans l'huile cuite à l'air.

Ce tableau donne une idée très exacte de l'insuffisance de l'indice de goudronnification, qui est à peu près le même pour ces deux huiles si différentes quant à leur influence sur le coton. La méthode anglaise également (Sludge) donne dans ce cas des valeurs erronées. D'après cette méthode l'huile No. 1 est de très bonne qualité, vu qu'elle ne forme aucun dépôt même après 1000 heures de traitement. Mais cette même huile a par contre de très mauvaises qualités, si nous considérons sa tendance à se décomposer par peroxydation et à former ainsi une grande quantité d'acides. Son influence sur le coton est de même très néfaste; déjà après 100 heures de traitement les résultats obtenus sont très mauvais et après 1000 heures le fil de coton avait perdu toute résistance, de telle sorte que toute mesure devenait impossible malgré tous les soins imaginables. L'huile No. 2, qui a à peu près le même indice de goudronnification que l'huile No. 1, se comporte, traitée par la méthode anglaise, moins bien qu'elle. Après 1000 heures de traitement l'huile No. 2 forme relativement peu de dépôts et a surtout le grand avantage de ne pas attaquer aussi fortement le coton que l'huile 1. L'huile No. 1, qui a aussi été soumise à la méthode américaine, a donné au cours de cet essai les résultats suivants: après 42 jours, on ne pouvait encore constater aucune trace de dépôt, tandis que l'indice d'acidité était 46 et la résistance du fil de coton complètement nulle. (La destruction du fil de coton était déjà complète après 4 jours.) Cette huile serait donc aussi de bonne qualité d'après l'essai américain quoiqu'elle soit en réalité complètement inutilisable comme huile pour transformateurs.

la grande différence qu'entraîne l'emploi du soufflage d'oxygène, ou du soufflage d'air, ou de la cuisson à l'air libre, sur la décomposition des huiles.

Ce phénomène a aussi été observé et étudié au cours des expériences faites à ce sujet en Angleterre (loc. cit).

Les dépôts obtenus par barbotage d'oxygène sont visqueux et colloïdaux, tandis que ceux que donne le traitement à l'air sont de couleur foncée et de nature sablonneuse. Tout spécialement les produits de décomposition se formant par simple cuisson à l'air libre sont identiques aux boues que l'on trouve dans les transformateurs.

Afin de donner une idée de la composition des huiles et de leurs dépôts, nous donnons ci-après quelques analyses élémentaires de ces corps. Une huile quelconque accusait la composition suivante:

Carbone (C) = 86,24 %, Hydrogène (H) = 13,32 %
Oxygène (O) = 0,23 %, Soufre (S) = 0,21 %

L'huile contenait après 1000 heures de cuisson (dans des récipients de cuivre à 112° C en présence d'air) 7 % de dépôts, dont la composition était:

C = 62,4 % H = 9,54 %
O = 25,93 % S = 1,66 %

L'huile filtrée avait subi aussi certaines modifications qualitatives et donnait à l'analyse:

C = 83,9 % H = 13,19 %
O = 1,8 % S = 0,12 %

soit une augmentation sensible de la teneur en oxygène.

Annexe

à l'introduction aux normes relatives à l'essai des huiles minérales.

Huile de bonne qualité (Indice de goudronnification 0,12%)
1 = A l'état de livraison; 2, 3, 4 = Après 100, 200, 300 h de cuisson à 112° C.

Huile de mauvaise qualité (Indice de goudronnification 0,12%).
5 = A l'état de livraison; 6, 7, 8 = Après 100, 200, 300 h de cuisson à 112° C.

Le dépôt contenait en outre 12 % de composants saponifiables (acides), le reste étant des produits d'oxydation polymérisés neutres.

A titre de comparaison, nous pouvons par exemple citer la composition d'un dépôt provenant d'un transformateur et analysé en son temps; il contenait 14 % d'acides, 1,5 % de cendres, le reste se composant de nouveau exclusivement de corps insaponifiables. Cet exemple démontre clairement l'identité des produits de décomposition obtenus au cours des essais de laboratoires ou dans les transformateurs. Ainsi que Brauen l'a démontré, le plomb est le métal se combinant le plus facilement avec les acides (produits d'oxydation de l'huile), formant ainsi des savons, qui eux-mêmes accélèrent la formation des dépôts.

Frank[31]) a publié une vue d'un transformateur complètement recouvert de boue et admet comme cause de la formation de cette grande quantité de dépôts le plombage de la cuve du transformateur. Cet exemple ne doit cependant pas nous induire en erreur et faire naître l'idée que seuls les transformateurs plombés peuvent contenir des dépôts. Des clichés semblables, provenant de transformateurs ne contenant aucune trace de plomb ont été également publiés dans différents journaux (journal A. S. E. A. Mineraloljer, Electrical World). La fig. 10 donne une idée de formation de tels dépôts, comme elle se produit normalement lors de l'emploi d'huile de mauvaise qualité ou d'un mélange d'huiles de bonne et de mauvaise qualité, ou encore d'un mélange de deux huiles de bonne qualité mais de composition différente.

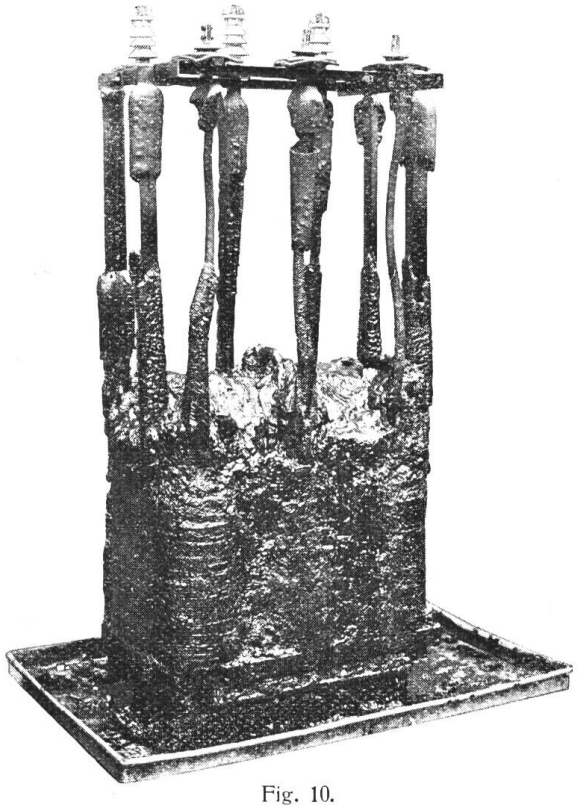


Fig. 10.

[31]) Voir article „Das Mineralöl" dans la collection „Die Isolierstoffe der Elektrotechnik", Springer, Berlin 1924.

Comme l'ont démontré les recherches de Stäger et Bohnenblust, le cuivre et le zinc sont aussi aptes à fournir des savons avec les acides formés par décomposition de l'huile. D'autre part, on trouve souvent lors de l'analyse de dépôts de grandes quantités de sels de fer, parfois même aussi de la rouille. Les cendres du dépôt mentionné plus haut contenaient à peu près 80 % d'oxyde de fer. Dans ce cas spécial, le fer existait dans le dépôt (avant calcination) sous forme de savons. La teneur des dépôts en fer, que ce soit sous forme de savons ou de rouille, est souvent due par exemple à l'oxydation de certaines huiles au contact direct et constant avec du fer.

Un cas qui mérite aussi notre attention est le suivant: un dépôt récolté sur les résistances d'un démarreur rempli d'huile accusait un point de fusion de 105° C, il était très dur et contenait 35 % de rouille et 65 % de produits normaux de décomposition de l'huile (ceux-ci contenaient 48 % d'acides asphaltogènes). L'huile filtrée par contre avait un indice d'acidité de 1,74. La quantité d'acides solubles était donc relativement faible pour l'état de décomposition déjà très prononcée de l'huile.

Une autre question qui, ces derniers temps, a été l'objet d'études spéciales est celle de l'influence du champ électrique sur la formation de dépôts. Andersen[32]) a cru pouvoir constater une telle influence mais Rodman[33]) est arrivé à prouver le contraire. Il a démontré que même de hautes fréquences (1 000 000 de périodes) et de hautes tensions (100 000 volts) n'avaient aucune influence sur la formation proprement dite des dépôts. Les expériences faites par l'auteur de ces lignes ont donné les mêmes résultats. Il a été par contre prouvé que le champ électrique exerce une certaine influence sur la précipitation des dépôts; il a été constaté que sous certaines conditions les boues se séparaient plus facilement de l'huile et qu'ainsi le processus de précipitation était accéléré. Mais cela ne modifie en rien le résultat final.

Les additions d'huile dans les transformateurs en service jouent aussi un très grand rôle. C'est un fait connu que les pertes par évaporation et autres doivent être remplacées par de l'huile fraîche, *de bonne qualité et de même origine que l'huile se trouvant encore dans le transformateur;* il ne faut en aucun cas employer une huile médiocre ou de composition différente, car son emploi pourrait avoir les conséquences les plus fâcheuses comme l'ont montré plusieurs cas observés dans la pratique. Nous nous bornerons à donner quelques valeurs comparatives. Deux huiles 1 et 2 de qualités différentes ont été mélangées dans des proportions différentes et soumises à des essais. L'huile No. 1, après cuisson pendant 1000 heures à 110° C, ne donnait aucune trace de dépôts, tandis que l'huile No. 2, après le même traitement, contenait 35 % de boue.

Les mélanges suivants donnèrent en outre comme résultats:

3/4 vol.	No. 1	+	1/4 vol.	No. 2	19 %	de dépôts
1/2 „	No. 1	+	1/2 „	No. 2	27 %	„ „
1/4 „	No. 1	+	3/4 „	No. 2	34 %	„ „

[32]) A.S.E.A. Tidning *16*, 92 (1924).
[33]) Electric Journal (1923).

Ces quelques chiffres suffisent à démontrer le danger qu'il y a d'employer des huiles de mauvaise qualité pour parfaire le volume d'huile manquant dans un transformateur.

Les huiles minérales, étant plus ou moins hygroscopiques, doivent tout d'abord être séchées.

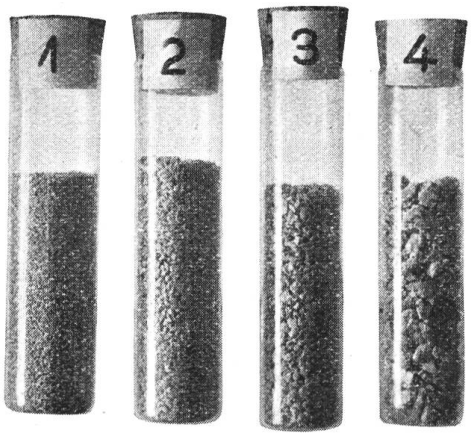


Fig. 11.

A cet effet on chauffe l'huile du transformateur pendant un certain temps. Cette opération, qui est souvent la cause d'une détérioration prématurée de l'huile ou même d'accidents encore plus graves, doit donc être faite avec beaucoup de soins[34]) et nous passerons brièvement en revue les différentes méthodes employées à cet effet.

La méthode la plus simple est la cuisson de l'huile en présence d'air dans le transformateur même. Le chauffage peut se faire de deux manières différentes, soit au moyen d'un feu ordinaire, que l'on allume sous la cuve du transformateur, soit au moyen de résistances de chauffage que l'on plonge dans l'huile. La température nécessaire à une dessiccation convenable est de 110° C. Les désavantages de cette méthode sont nombreux et faciles à reconnaître. L'huile subit une oxydation prématurée nuisible qui la rend beaucoup moins stable et ainsi augmente sa tendance à la décomposition. En outre, si l'huile employée a une tendance à la peroxydation, nous pouvons également constater une détérioration de l'isolant.

Une autre méthode présentant moins de désavantages est la cuisson à l'abri de l'air. A cet effet on peut employer avec succès du coke en menus morceaux. La surface de l'huile est recouverte tout d'abord d'une toile de coton qui ne laisse pas de fils (toutes les bulles d'air doivent être chassées) puis d'une couche de 10 à 15 cm d'épaisseur de coke granulé. Celui-ci doit être absolument sec, pur et subir une préparation spéciale. La fig. 11 représente quelques échantillons de cette matière, la grandeur de grain No. 3 est employée de préférence.

La meilleure méthode est la dessiccation dans le vide. Cette méthode présente plusieurs avantages. L'élimination de l'humidité et de l'air contenus dans l'huile et les enroulements peut se faire à de basses températures et est beaucoup plus complète, en outre l'oxygène dissous dans l'huile étant éliminé, toute oxydation de l'huile devient impossible. La fig. 12 donne un schéma de la dessiccation dans le vide. L'huile est dans ce cas chauffée à l'extérieur de l'étuve. On de-

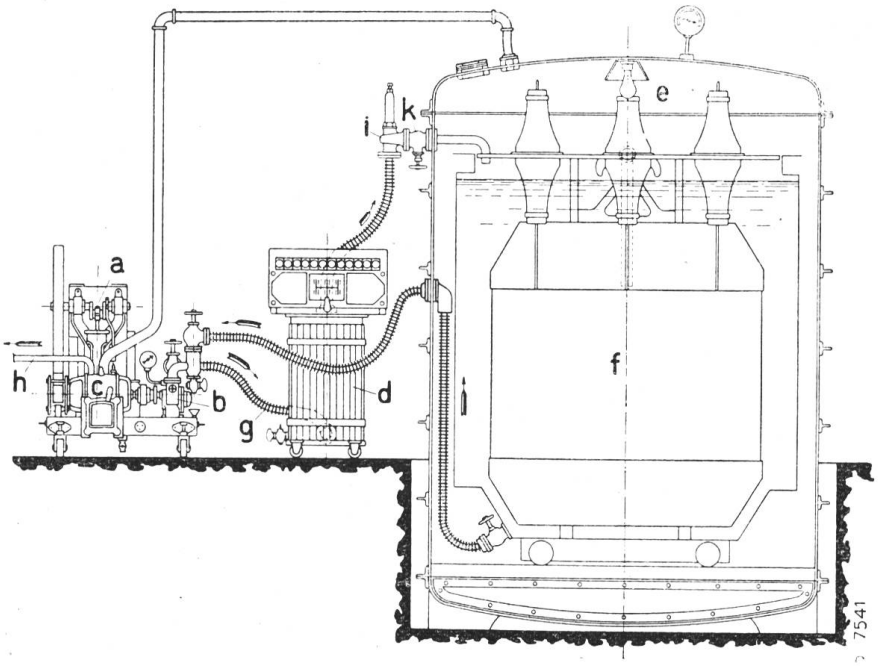


Fig. 12.

Schéma d'une installation pour le chauffage de l'huile.

a = pompe à air.
b = pompe pour l'huile.
c = moteur.
d = étuve.
e = cuve à vide.
f = transformateur à l'intérieur de la cuve.
g = tuyauterie.
h = échappement de l'air.
i = soupape de réglage.
k = soupape de fermeture.

[34]) Voir Revue BBC *8*, 116 (1921).

vrait autant que possible toujours employer cette dernière méthode, qui permet la dessiccation de l'huile à des températures plus basses et exclut tout danger d'oxydation. Si, en vue d'un contrôle ou pour n'importe quelle autre raison, un transformateur a été sorti du bain d'huile et a dû rester à l'air pendant plus de 12 heures, il faudra lui faire subir une nouvelle dessiccation. Cette opération doit se faire avec beaucoup de soins, car l'huile subsistant sur le transformateur sorti, peut avoir absorbé beaucoup d'oxygène capable d'entraîner, lors d'une élévation trop brusque de la température, des détériorations locales de l'isolant.

Sous ce rapport, les huiles très raffinées sont les plus sensibles. Comme nous l'avons déjà vu à plusieurs reprises, ces huiles contiennent des produits de décomposition riches en oxygène; elles sont à la suite de leur constitution et du traitement qu'elles ont subi très peu stables et peuvent être ainsi la cause de toutes sortes de désagréments.

Un problème très compliqué et très important, dont on n'a pas encore trouvé la solution et qui par conséquent n'a pas pu être pris en considération dans les normes présentes, est celui de la spécification des huiles déjà usagées. Par la critique des différentes méthodes employées de nos jours, nous avons pu nous rendre compte de la complexité du problème de la décomposition des huiles encore inutilisées et de la difficulté de se faire une idée exacte sur leur valeur. Pour les huiles déjà employées, le problème se complique encore du fait que de nouveaux facteurs sont mis en jeu. Nous devons prendre en considération de nouveaux agents, qui éventuellement peuvent accélérer la décomposition de l'huile, et comme nous ne savons pas encore quel groupe de corps occasionne la formation de dépôts et quel groupe accélère la décomposition d'une huile déjà oxydée, il est pour le moins très difficile, pour ne pas dire impossible, de fixer exactement le moment à partir duquel l'huile ne doit plus être employée. A titre d'exemple nous citerons une huile qui, après quelques années de service, contenait 10 % de dépôts, avait un indice d'acidité de 5,2 et une tension d'éclatement de 42 kV/5 mm. Une deuxième huile ayant servi le même temps ne présentait aucune trace de dépôt mais par contre avait un indice d'acidité de 18,5 et une tension d'éclatement de 22 kV/5 mm et enfin une troisième huile, après le même temps, contenait 22 % de dépôts, avait un indice d'acidité de 2,1 et une tension d'éclatement de 23 kV/5 mm. Cette dernière huile constitue un cas très spécial. Le dépôt était très hygroscopique et ainsi augmentait la teneur de l'huile en eau et nous pouvons admettre que la faible rigidité diélectrique de l'huile était due à l'humidité contenue dans celle-ci et non pas à sa détérioration. Von der Heyden et Typke[35]), dans un article sur les huiles usagées, font part de certaines de leurs observations à ce sujet. Ils constatent qu'au cours de ces dernières années aucune huile n'a donné après filtration et dessiccation une tension d'éclatement inférieure à 35 kV/5 mm. Ils conseillent de ne plus employer une huile dont l'indice d'acidité est supérieur à 1,4 et de contrôler aussi son action sur le coton.

[35]) E.T.Z. *45*, 1059 (1924).

A notre avis, et d'après les observations que nous avons faites, nous pouvons, encore bien moins pour une huile usagée que pour une huile fraîche, nous baser sur un seul critérium pour leur spécification. De nos jours nous ne possédons encore aucun moyen sûr pour spécifier les huiles déjà utilisées. Des expériences sont en cours en vue d'éclaircir cette question. Un fait certain est que l'on devra dans tous les cas compléter les normes présentes dans ce sens et introduire de nouvelles méthodes permettant de saisir les produits se formant lors de la décomposition de l'huile, par exemple les carbures d'hydrogène non saturés.

La décomposition des huiles de résine est de nature complètement différente. Il ne se forme aucun dépôt, mais l'huile devient de plus en plus épaisse. Il se forme des produits de polymérisation très visqueux mais solubles dans l'huile et des acides également solubles. La viscosité de l'huile augmente rapidement et l'huile finit par se solidifier complètement, comme on peut le voir sur le cliché ci-inclus (fig. 13). Une de ces huiles solidifiées avait par exemple un point de fusion

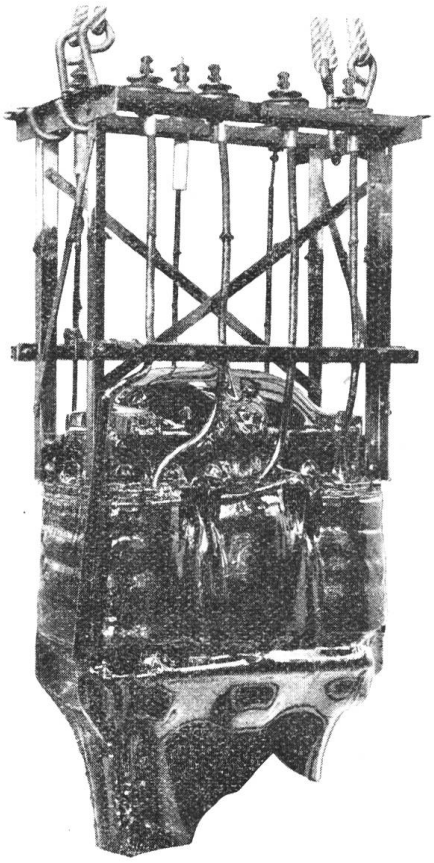


Fig. 13.

de 83° C. Le pouvoir réfrigérant devient naturellement nul dans de tels cas. La formation des acides est souvent précédée de la formation de peroxydes qui, au cours de leur décomposition, attaquent le coton. La dilution d'huile de résine devenue épaisse n'a qu'une influence passagère. L'hygroscopicité des huiles de résine est à peu près la même que celle des huiles minérales. Les huiles de résine ne sont pour ainsi dire plus employées de nos jours, surtout à cause des désavantages que nous venons d'énumérer.

En résumé, nous pouvons conclure que les normes de l'A.S.E. décrites en détail dans ce fascicule et basées sur des expériences comparatives entre les laboratoires et la pratique remplissent aussi bien que possible les conditions dictées plus haut (a, b, c) et permettent ainsi une spécification exacte des huiles pour transformateurs.

Remarques sur V:

La rigidité diélectrique.[36])

Des essais approfondis et soigneusement exécutés dans différents laboratoires et par divers auteurs ont montré que la rigidité diélectrique ne dépend que dans une faible mesure de la constitution chimique des huiles minérales; la teneur en eau et en impuretés solides, comme la poussière et les fibrilles, joue en revanche un rôle prépondérant. Friese[37]) et Schröter[38]) ont montré par des essais que des huiles minérales absolument pures et exemptes d'eau présentent une rigidité diélectrique de 230, resp. 300 kV/cm. Mais de telles valeurs ne peuvent être obtenues qu'à l'abri de l'air atmosphérique.

Les huiles minérales sont hygroscopiques dans une certaine mesure et absorbent par conséquent, surtout à des températures élevées, l'humidité de l'atmosphère, laquelle abaisse considérablement la résistance au percement. Pour une teneur en eau de 0,5 $^0/_{00}$ la résistance disruptive tombe au $^1/_5$ ou au $^1/_6$ de la valeur correspondant à l'huile absolument sèche et, pour une teneur croissante en humidité, diminue asymptotiquement jusqu'à $^1/_{10}$ environ de la valeur maximum indiquée ci-dessus. Une teneur en eau plus grande encore ne produit par contre pas d'autre diminution de la rigidité diélectrique.

Les essais déjà cités de Friese ont montré que l'influence de l'humidité sur les propriétés diélectriques de l'huile dépend de la forme sous laquelle se présente l'eau contenue dans l'huile. Depuis la solution proprement dite de l'eau dans l'huile jusqu'à l'émulsion visible à l'œil nu sous forme de nébulosité, en passant par les états ultra-microscopique et microscopique, tous les stades intermédiaires sont possibles. L'eau à l'état très divisé, telle qu'elle se présente notamment lorsque l'humidité pénètre dans l'huile sous forme de vapeur, est tout spécialement à craindre pour l'abaissement de la rigidité diélectrique. L'eau dissoute dans l'huile, ou à l'état d'émulsion, est en revanche moins préjudiciable. Pour cette raison, la condensation éventuelle d'humidité sous le couvercle d'un transformateur n'est pas très dangereuse pour le pouvoir isolant de l'huile, parce que les gouttes d'eau tombent à travers l'huile sans que cette dernière absorbe à basse température une grande quantité d'humidité, par suite de la tension superficielle relativement grande des gouttelettes.

Il ressort de ce qui précède que les huiles minérales contiennent pratiquement toujours un peu d'humidité. En outre intervient le fait, aggravant pour l'essai de l'huile, que certaines impuretés solides, poussières et fibrilles, ne serait-ce qu'à l'état microscopique, ne peuvent être évitées. Aussi l'expérience montre-t-elle que les essais de percement électrique, exécutés sur un seul et même échantillon d'huile, donnent pour la tension disruptive des valeurs sensiblement différentes les unes des autres. Les résultats de ces essais de percement sont donc loins d'être entièrement satisfaisants et ne permettent guère de porter un jugement sur les huiles.

Pour cette raison, et en relation avec les autres prescriptions de l'A. S. E. concernant les essais d'isolation, les présentes normes font abstraction de la détermination usuelle de la tension disruptive, et la remplacent par un essai d'endurance d'une demi-heure, dans le spintéromètre à sphères; pendant cette épreuve, un percement suivi d'arc ne doit pas se produire. On a fixé la tension d'essai prévue dans les normes de l'A. S. E., en se basant sur la contrainte diélectrique à laquelle sont soumises couramment les huiles de transformateurs et d'interrupteurs.

Il résulte d'une longue série d'essais de ce genre, que de faibles décharges intermittentes, sous forme d'étincelles, se produisent en général pendant les premières minutes de l'épreuve, même pour des huiles pratiquement pures et exemptes d'eau. Il faut rechercher sans aucun doute la cause de ces décharges dans les faibles traces d'eau ou dans les impuretés solides microscopiques. Si la teneur en humidité et en impuretés solides ne dépasse pas la mesure admissible, les décharges par étincelles deviennent de plus en plus rares à mesure que se prolonge la durée de l'épreuve, et finissent par cesser tout-à-fait. Les étincelles électriques ont pour effet de vaporiser l'humidité et de brûler les impuretés solides; c'est-à-dire qu'il se produit en quelque sorte une purification de l'huile dans le champ électrique. Si par contre la teneur de l'huile en humidité et en impuretés grossières dépasse les limites admissibles, des décharges continuent à se produire jusqu'à la fin de la durée d'essai prescrite, ou bien un arc s'établit entre les électrodes, ayant pour effet une carbonisation importante de la couche d'huile percée, et un déclenchement du disjoncteur automatique monté dans le circuit primaire du transformateur d'essai.

Puisque les huiles soumises à l'épreuve indiquée semblent acquérir des propriétés plus homogènes dans le champ électrique, on peut s'attendre à ce que les valeurs de la tension disruptive, déterminées sur l'échantillon immédiatement après ce traitement, seront plus régulières; c'est pourquoi l'on prévoit une élévation de la tension jusqu'au percement, à partir de la valeur de 30 kV à laquelle l'huile vient d'être soumise pendant une demi-heure, sans attribuer toutefois pour le moment à la tension disruptive ainsi obtenue, la valeur d'un critérium en ce qui concerne les propriétés requises d'une bonne huile industrielle.

En résumé, nous répétons qu'on ne peut attribuer à l'essai de rigidité diélectrique d'autre importance que celle de donner une certaine indication sur la teneur des huiles en eau et en impuretés solides, mais qu'on ne saurait se baser

[36]) Ce chapitre a été rédigé par la station d'essai des matériaux de l'A. S. E.

[37]) Friese, Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemenskonzern, volume 1, page 45, 1921.

[38]) Schröter, Archiv für Elektrotechnik, volume XII, page 67, 1923.

sur ces résultats pour juger de la qualité des huiles minérales, parce que des huiles tout-à-fait impropres au service des interrupteurs et des transformateurs présentent, purifiées et à l'état sec, une rigidité diélectrique tout aussi élevée que les huiles les meilleures. Il y a donc lieu d'accueillir avec circonspection les valeurs très élevées de la tension de percement, que l'on cite parfois dans un but de propagande, et de ne pas leur attribuer, à la lumière de ce qui vient d'être dit, plus d'importance qu'il ne convient.

Propriétés des huiles isolantes dans les interrupteurs.

Une opinion encore très répandue de nos jours est que l'on peut employer pour les interrupteurs n'importe quelles huiles minérales, que l'on n'a pas besoin d'accorder une attention spéciale à la qualité des huiles comme c'est le cas pour un transformateur. Cette idée est fausse et il faut absolument la combattre car le bon fonctionnement d'un interrupteur dépend avant tout de la qualité du matériel choisi. La commission spéciale de l'A. S. E. s'est aussi rangée à cette dernière manière de voir et, en conséquence, n'a fait aucune différence dans les normes présentes entre les huiles pour transformateurs et les huiles pour interrupteurs. Les conditions de livraison sont donc les mêmes pour toutes les huiles isolantes.

Nous avons déjà vu plus haut, combien il est important qu'une huile pour transformateurs offre une très grande résistance à l'action de la température et à l'action de l'oxygène. Cette propriété perd naturellement de son importance pour les interrupteurs. Cependant elle donne une indication sur le genre et le dégré de raffinage de huile et montre par là même si cette huile est d'une qualité satisfaisante. Cette propriété est, par exemple, en relation avec la formation de carbone dans les huiles.

Un autre groupe de produits de décomposition est constitué par des gaz, pour la plupart inflammables, qui forment avec l'air des mélanges explosifs, souvent dangereux.

Afin de permettre l'extinction rapide de l'arc électrique, il faut que l'huile soit aussi fluide que possible, et conserve cette propriété aux basses températures; elle ne doit en aucun cas se solidifier. Il est particulièrement important pour les installations extérieures d'avoir des huiles ayant un point de congélation très bas. En outre l'huile doit naturellement posséder une bonne rigidité diélectrique.

D'après ces quelques considérations, nous devons exiger d'une huile pour interrupteurs les qualités suivantes:

I. Les huiles pour interrupteurs doivent être assez bien raffinées pour qu'il ne se forme aucun produit goudronneux indésirable sur les contacts.
II. L'huile doit être aussi fluide que possible.
III. L'huile doit posséder un point de congélation très bas.
IV. La rigidité diélectrique de l'huile doit être élevée.

Remarques sur I. Nous avons déjà vu dans l'introduction que les huiles minérales ne se composent pas exclusivement de carbures d'hydrogène. mais qu'elles contiennent aussi des produits résineux et asphaltiques, non saturés ou oxydés et des carbures d'hydrogène non saturés. Le raffinage doit éliminer tous ces sous-produits et ne laisser dans l'huile, autant que possible, que des carbures d'hydrogène saturés aliphatiques ou naphténiques. Les produits très complexes qui se forment par oxydation dans les transformateurs sous l'action de la chaleur ne se forment pas dans les interrupteurs et n'auraient d'ailleurs pas la même influence.

La décomposition des huiles pour interrupteurs est complètement différente. L'arc électrique de rupture détériore très fortement l'huile en développant des gaz, des carbures d'hydrogène légers et du carbone.

Lors de la pyrogénation des huiles minérales dans des tubes portés au rouge, il se forme des carbures d'hydrogène légers et des gaz. L'arc électrique détermine une transformation semblable; il se forme surtout des gaz qui sont riches en hydrogène, ainsi que l'ont démontré diverses analyses[39]). Des analyses faites au Laboratoire fédéral d'essais de combustibles de l'Ecole polytechnique ont donné les valeurs suivantes:

No. de l'échantillon	1	2	3	4	5
Hydrogène . .	64,7	63,1	62,4	65,7	53,0
Méthane . . .	3,2	4,0	4,5	3,7	4,9
Hydrocarbures lourds (Ethylène)	23,3	26,3	25,6	25,0	34,4
Acide carbonique	1,5	0,3	0,6	0,6	0,6
Oxygène . . .	2,4	1,2	1,2	1,0	1,2
Azote	4,9	5,1	5,7	4,0	5,9
Volume total .	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Deux autres analyses de Rodman[40]) ont donné

Hydrogène	65,6	68,25
Méthane	2,36	2,81
Carbures d'hydrogène non saturés	22,38	19,05
Acide carbonique	1,85	0,42
Oxygène	2,11	2,38
Azote	5,6	6,18
Oxyde de carbone	0,8	0,24

Dans aucun de ces mémoires il n'est fait mention de la sorte d'huile utilisée pour ces essais, nous ne possédons donc aucun indice nous permettant de nous rendre compte si les huiles à base aliphatique et les huiles à base naphténique se comportent de la même manière. Il est par contre certain qu'une même huile dégage, sous des conditions semblables, toujours les mêmes gaz et que ceux-ci se composent toujours en majeure partie d'hydrogène. Les recherches faites par Bauer et d'autres ont démontré que la quantité de gaz dégagé était directement proportionnelle au travail fourni par l'interrupteur. En outre, suivant ce même auteur, il existerait une relation entre ce travail et la teneur des gaz en hydrogène, mais de telles lois ne peuvent pas être admises sans que l'on prenne en considération la constitution des huiles employées.

[39]) Voir Bauer, Untersuchungen an Oelschaltern, II, Zürich 1917.
[40]) Electrical World Vol. 79, 1272 (1922).

La formation de l'hydrogène est dépendante de la constitution de l'huile, c'est-à-dire du rapport carbone: hydrogène. Les carbures d'hydrogène non saturés forment plus de carbone et moins d'hydrogène que les hydrocarbures saturés.

Le mélange de ces gaz avec l'air devient sous certaines conditions explosible, ce qui explique les explosions d'interrupteurs. De pareils accidents ont fait naître l'idée que les huiles à point d'éclair bas étaient très dangereuses. Cela est faux, la cause des explosions n'étant pas à chercher dans le point d'éclair de l'huile mais dans ses produits de décomposition. Les vapeurs d'huile, en elle-mêmes, ne sont aucunement dangereuses, puisque leur tension est très basse. Elle atteint aux conditions de service normal, par exemple pour une huile dont le point d'éclair est de 140° C, 0,2 mm.

La production de gouttelettes d'huile restant suspendues dans l'air sous forme de brouillard ne peut pas non plus être la cause d'une explosion. Haber et Wolff[41]) ont prouvé que la combustion totale d'un bouillard hétérogène n'est possible qu'au cas où le mélange contient de l'oxygène en excès et cet excès doit être d'autant plus fort que les gouttelettes sont plus grandes. Rodmann a aussi démontré qu'une telle explosion est complètement exclue, car il lui fut impossible, au cours des nombreuses recherches faites sur cette question, de fixer n'importe quelles limites d'explosion avec l'air (par exemple directement à la surface de l'huile d'un transformateur travaillant sous des conditions normales).

Il faut que certaines conditions soient remplies afin qu'un mélange fasse explosion. Si l'on élève rapidement la température *d'un seul point* d'un mélange de matières inflammables (gaz ou liquides) avec de l'oxygène ou de l'air, il arrive un moment où le mélange de ce point s'allume et brûle (les corps inflammables se combinent brusquement avec l'oxygène). La température nécessaire pour provoquer ce phénomène est la température d'allumage. Cette réaction développe une certaine quantité de chaleur, dite chaleur de combustion, qui porte les produits de combustion à une haute température, la température de combustion. Si la chaleur ainsi développée suffit à porter la température des particules voisines à leur température d'allumage, celles-ci entrent aussi en réaction et la combustion se propage très rapidement; il se produit une explosion. L'échange de chaleur entre la zone gazeuse en combustion et la zone voisine demande un certain temps. La combustion s'étend plus ou moins rapidement. Une explosion possède donc une certaine vitesse de propagation. Les produits de combustion occasionnent une certaine pression si l'explosion se produit en vase clos.

Pour la production d'une explosion, il faut que toutes les conditions précitées atteignent certaines valeurs différant d'un mélange à l'autre. Une explosion n'est possible qu'entre des limites (composition du mélange, etc) bien d'éterminées. La limite d'explosion est une fonction de la température d'allumage et de la température primaire du mélange gazeux, de la température de combustion, de la capacité calorifique des produits de combustion et des pertes thermiques. Cette fonction est représentée par l'équation suivante:

$$E = 100 \frac{c(T_e - t) + W_v}{V}$$

E = Limite d'explosion
c = Capacité calorifique moyenne des produits de combustion
T_e = Température d'allumage
t = Température du milieu ambiant (température primaire du mélange gazeux)
V = Chaleur de combustion de l'unité de volume des gaz
W_v = Pertes thermiques par unité de volume.

Si toutes ces grandeurs étaient connues, on pourrait déterminer la limite d'explosion de tous

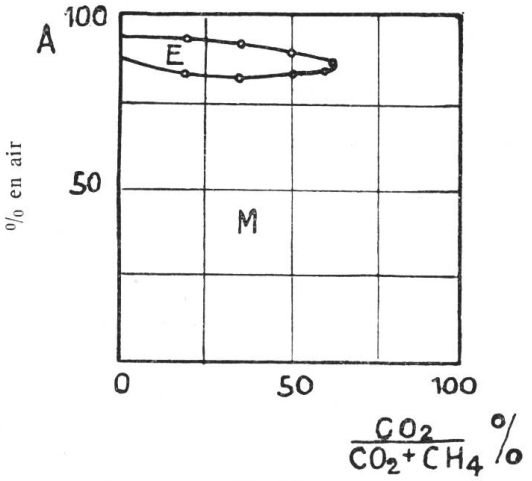


Fig. 14.
M = méthane.
E = limites d'explosion.

les mélanges gazeux, mais cela n'est pas le cas, nous sommes obligés d'avoir recours à des expériences.

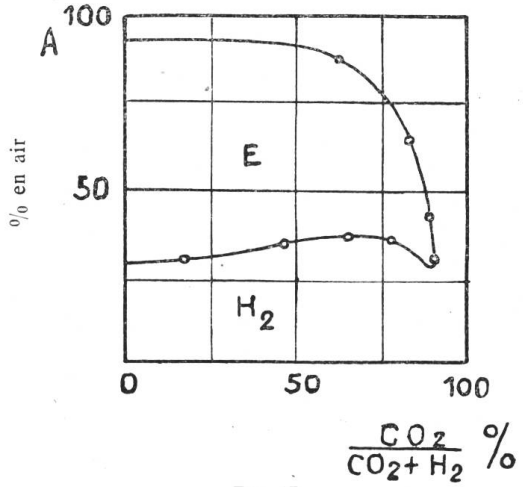


Fig. 15.
H_2 = hydrogène.
E = limites d'explosion.

Asch[42]) propose une méthode qui lui a permis de déterminer par exemple la limite d'explosion des deux gaz qui nous intéressent le plus, le méthane et l'hydrogène en présence d'air. Les

[41]) Zeitschrift für angewandte Chemie *36*, 375 (1923).

[42]) Zeitschrift für technische Physik *4*, 468 (1923).

limites d'explosion de ces deux gaz sont représentées par les courbes ci-jointes (fig. 14 et 15). Nous voyons immédiatement que l'hydrogène forme avec l'air un mélange explosible dans des limites beaucoup plus étendues que le méthane, donc les gaz se dégageant de l'interrupteur sont surtout dangereux à cause de leur teneur en hydrogène; les carbures d'hydrogène légers jouent un bien moins grand rôle.

La formation d'hydrogène dépend, comme nous l'avons déjà vu plus haut, de la constitution de l'huile, mais n'est, par contre, nullement en rapport avec le point d'éclair. Des huiles à point d'éclair élevé peuvent également dégager de l'hydrogène et ainsi donner lieu à des explosions. Le point d'éclair de 145° C prescrit par les normes présentes est donc suffisant.

Afin de donner un aperçu sur les mélanges explosifs, nous donnons ici les limites d'explosion de certains mélanges intéressant tout spécialement l'électrotechnicien:

	Limite inférieure	Limite supérieure
Méthane + air	5,4	13,17
Hydrogène + air	7,9	69,4
Hydrogène + oxygène	8,3	93,5
Ethylène + air	4,0	22,0
Acétylène + air	2,8	65,9
Vapeur d'huile de transformateurs + air	2,5	8,0
Vapeur d'huile pour interrupteurs + air	2,5	72,0
Air immédiatement à la surface de l'huile d'un transformateur en service normal	pas de limites d'explosion	

A côté de gaz, il se forme aussi dans les interrupteurs des carbures d'hydrogène légers mais encore liquides. Les deux analyses suivantes suffiront à démontrer ce fait. L'une d'elles a été entreprise au Laboratoire fédéral d'essais des combustibles à Zurich et l'autre dans les Laboratoires de la Société Anonyme Brown Boveri & Cie.

	Propriétés à l'état initial	après 500 déclenchements	après 1000 déclenchements
Densité . . .	1) 0,887	0,890	
	2) 0,892		0,886
Point d'éclair .	1) 156°	110°	
	2) 148°		112°
Distillation			
0 – 300° . .	1) 1,6% en poids	31,5	
300 – 350° . .	28,0% „		
350 – 370° . .	27,4% „	21,1	
Résidu . . .	43,0% „	47,4	
Distillation			
0 – 300° . .	2) 2,3% „		12,0%
300 – 350° . .	31,0% „		32 %
350 – 370° . .	29,0% „		31 %
Résidu . . .	37,7% „		25,0%

Le point d'éclair de l'huile prélevée dans le voisinage des contacts est donc très fortement descendu. L'arc électrique a dégradé l'huile composée de corps à poids moléculaires élevés en carbures d'hydrogène plus légers. Cette réaction est encore facilitée, lorsque l'huile contient des carbures d'hydrogène non saturés, comme c'est le cas après un raffinage défectueux. En outre il peut aussi se former des produits goudronneux se cokéfiant facilement, qui se déposent sur les contacts, les encrassent et occasionnent ainsi des perturbations indésirables.

Sous l'influence de l'arc électrique se forme aussi du carbone dans les interrupteurs. Les recherches faites à ce sujet jusqu'à ce jour n'ayant pas tenu compte de l'origine et du degré de raffinage des huiles ayant servi aux essais, il est impossible de dire quelles sont les huiles qui se comportent le mieux sous ce rapport. L'effet de couronne et l'arc électrique décomposent l'huile, il se forme du carbone amorphe dont la structure varie suivant la constitution de l'huile. Suivant le degré de dispersion du carbone celui-ci reste plus ou moins longtemps en suspension dans l'huile. Un courant à haute tension et de faible intensité favorise la formation de carbone à structure fine tandis qu'un courant à basse tension mais de grande intensité occasionne tout au contraire la formation de grosses particules de carbone qui contiennent encore des carbures d'hydrogène non saturés dont la résistance spécifique est minime; ces carbures sont retenus par adsorption à la surface des particules de carbone. Il peut aussi se former du charbon „graphitique" lorsque l'arc électrique se produit près de la surface de l'huile, dans une région où l'oxygène atmosphérique peut déjà exercer une certaine influence. Ce carbone graphitique est meilleur conducteur de l'électricité que le carbone amorphe; au point de vue chimique, on peut le placer entre le carbone amorphe et le graphite proprement dit.

Remarques sur II. Afin que les produits mentionnés ci-dessus ne se forment pas en trop grande quantité, il faut écourter la durée de l'action de l'arc électrique. A cet effet, l'huile doit être aussi fluide que possible de manière quelle puisse immédiatement imprégner les contacts et éteindre l'arc électrique. La viscosité maximum de 8° E, à 20° C, prescrite dans les normes présentes, assure une fluidité suffisante de l'huile.

Remarques sur III. Nous avons eu l'occasion de voir, au cours de l'étude des conditions de service des transformateurs, que les courbes de viscosité des huiles aliphatiques d'une part et des huiles naphténiques d'autre part divergent toujours davantage à mesure que la température descend. Les huiles à base aliphatique possèdent un point de congélation (de solidification) très marqué, tandis que les huiles naphténiques ne se solidifient pas même à des températures très basses mais deviennent simplement de plus en plus visqueuses. Cette propriété est de la plus haute importance pour le fonctionnement impeccable d'un interrupteur. Les normes présentes ont donc prescrit un point de congélation tel que, même sous des conditions de service défavorables, l'huile reste fluide. Les huiles solidifiées ou très visqueuses diminuent la vitesse de déclenchement

et ainsi prolongent l'action néfaste de l'arc électrique de rupture. La fig. 16 nous donne une idée de l'influence de la consistance de l'huile sur le

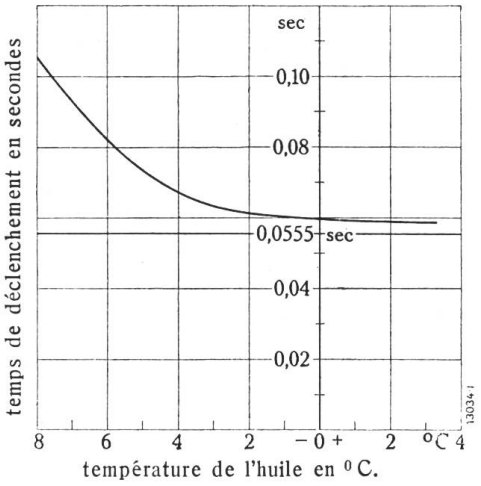


Fig. 16.

temps de déclenchement. Les expériences faites avec une huile dont le point de congélation était de moins 3° C ont montré que, pour un travail de déclenchement déterminé à moins 8° C, le temps de déclenchement dépassait d'environ 80 % celui que l'on obtenait avec de l'huile encore fluide à la même température. Tous ces dangers sont écartés par l'emploi d'huiles possédant un point de congélation conforme aux conditions de livraison présentes.

Remarques sur IV. Voir au chapitre „Propriétés des huiles isolantes dans les transformateurs", Remarques sur V, où cette question est déjà traitée (page 17).

Les huiles de résine ne sont jamais employées pour les interrupteurs à cause:

1° de leur viscosité qui est beaucoup trop haute pour peu que la température baisse et
2° de la grande quantité de carbone qu'elles dégagent sous l'action de l'arc électrique.

En résumé nous pouvons tirer de ces quelques considérations sur les huiles isolantes et leur emploi les enseignements suivants:

Afin d'éviter tout mélange, il est très avantageux de n'employer qu'une seule huile isolante, la même pour les transformateurs et les interrupteurs. Les propriétés exigées d'une huile pour transformateurs sont à peu près identiques à celles d'une huile pour interrupteurs. Dans tous les cas, il faut employer des huiles bien raffinées et purifiées, possédant un point de congélation bas et une viscosité convenable. (Réfrigération suffisante des transformateurs, extinction rapide de l'arc électrique dans les interrupteurs.) Pour les transformateurs, l'emploi d'une huile bien raffinée est nécessaire, si l'on veut avoir une huile résistant à l'action de la température et de l'oxygène et capable d'assurer un bon fonctionnement du transformateur. L'huile pour interrupteurs doit aussi avoir subi un bon raffinage, elle ne doit plus contenir de carbures d'hydrogène non saturés, de peur qu'il ne se dépose une grande quantité de carbone et de produits goudronneux sur les contacts (les carbures d'hydrogène non saturés forment plus de carbone que les hydrocarbures saturés).

Comme les huiles pour transformateurs et les huiles pour interrupteurs possèdent beaucoup de points communs, les normes présentes de l'A. S. E. ne font aucune différence entre elles. Les conditions de livraison et les méthodes d'essai ont été déterminées de telle manière que toute garantie soit assurée dans le choix des huiles isolantes et que l'on puisse être sûr de leur bonne qualité ainsi que du bon fonctionnement des transformateurs et interrupteurs.

Traduction.

Normes relatives à l'essai des huiles minérales pour transformateurs et interrupteurs [1]).

Etablies par la commission des normes de l'A. S. E. et de l'U. C. S. [2])

L'Association Suisse des Electriciens met en vigueur les normes suivantes, à partir du 1er juillet 1925. Si un premier essai, fait d'après ces normes, donne lieu à des contestations, la station d'essai des matériaux de l'A. S. E. procède, sur la demande de l'un des intéressés, à une seconde épreuve, dont le résultat demeure sans appel. Pour permettre à la station d'essai des matériaux cette contre-épreuve éventuelle, on prélèvera simultanément deux échantillons d'huile, dont l'un, plombé et muni de la date du prélèvement, restera à sa disposition.

I. Dispositions générales.

1° L'échantillon d'essai (au minimum 2 litres) doit être prélevé du fût ayant servi au transport, après un repos de 24 heures au moins au lieu de livraison. Le prélèvement sera fait par l'acheteur ou une personne désignée par lui. Sur sa demande et à ses frais, le fournisseur a le droit d'assister à cette opération.

Si l'huile est livrée par le fournisseur du transformateur ou de l'interrupteur, et qu'il soit procédé à sa cuisson, dans l'appareil même et par les soins du fournisseur, on peut exiger que l'échantillon soit prélevé de l'appareil prêt à fonctionner, mais avant sa mise en service.

2° L'huile n'est déclarée conforme aux normes qu'après avoir subi avec succès, et dans l'ordre indiqué, toutes les épreuves énumérées ci-dessous.

[1]) Ces normes, adoptées par la commission d'administration de l'A. S. E. et de l'U. C. S., seront soumises à l'approbation de la XLe assemblée générale de l'A. S. E. On est prié de communiquer par écrit toute remarque concernant ces normes au secrétariat général de l'A. S. E. et de l'U. C. S., Seefeldstrasse 301, Zurich, avant le 25 mai 1925.

[2]) Cette commission se compose de M. *K. Sulzberger*-Zurich, président; de MM. *G. A. Borel*-Cortaillod, *L. Dénéréaz*-Territet, *H. Egli*-Zurich, *A. Schaetz*-Berne et *P. Weingart*-Klosters, membres de la commission; collaborateurs-MM. *A. Mosser*-Zurich, *P. Schlaepfer*-Zürich, *E. Schwank*: Baden, *H. Stäger*-Baden.