

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la A Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D' INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etude de MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et Technologies

Filière :Génie Electrique

Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Présenté par
Prénom NOM
Prénom NOM

Mémoire dirigée par **Prénom NOM** et co-dirigée par **Prénoms NOM**

Thème

**Ecrire le thème sans modifier ni la police
ni la taille des caractères. Eviter de
modifier l'ensemble de cette page.
N'ajouter ni logo ni rubrique ni couleurs**

Mémoire soutenu publiquement le mois 2014 devant le jury composé de :

M Prénom NOM

Grade, Lieu d'exercice, Président

M Prénom NOM

Grade, Lieu d'exercice, Rapporteur

M Prénom NOM

Grade, Lieu d'exercice, Examineur

M Prénom NOM

Grade, Lieu d'exercice, Examineur

Laboratoire et/ou entreprise où le travail a été réalisé

Dédicaces

*Pour que ma réussite soit complète, je la partage avec toutes
les personnes que j'aime.*

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très chers parents pour leur amour et pour le courage et
la volonté qu'ils m'ont inculqués ;*

*A la mémoire de ma grand-mère que dieu l'acceuille dans ses vaste
paradis ;*

*A mes adorables frère et sœurs: Mohemmed, Sonia et son fiancé
chafik, Fatiha et son mari Said et leur deux enfants Malak et le petit
Omar ;*

A toute ma famille de prés ou de loin ;

A tous mes amis(es) et collègues sans exception ;

A tous ceux qui m'aiment ; et tous ceux que j'aime.

Bibliographie

Bibliographie :

[1] Chau TRAN DUY « Propriétés diélectriques de liquides isolants d'origine végétale pour application en haute tension », thèse doctorat, Université JOSEPH FOURIER-GRENOBLE 1 -8 janvier 2009.

[2] A.BOUBAKEUR « Vieillissement de l'huile de transformateur », conférence sur le vieillissement des huiles de transformateur, Ecole national polytechnique ARELEC-23 novembre 2011.

[3] SEFLEC « Etude des facteurs d'influence sur les essais de rigidité », Notes d'information technique, Parc d'Activités du Mandinet- édition 2002.

[4] Un document de l'office de la santé public et programme des nations unies sur l'environnement.

[5] M&L Matériaux « Comparaison des trois types d'huile », consulter le 21 novembre 2012.

[6] Norme Internationale CEI-IEC, Deuxième édition -7/1995.

[7] S.OSMANI « Etude du comportement sous contrainte électrique de l'huile d'isolation BORAK22 », thèse de magister, UMMTO.

[8] Michel LANOZ et Michel AUGET « Traité d'électricité haute tension », Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, volume 22.

[9] Michel MURPHY « L'histoire des analyses d'huile et des buvards aux capteurs », VP de Condition Monitoring International, STLE Section Montréal-2002.

[10] Guide de la mesure d'isolement, CHAUVIN ARNOUX, Mégohmmètre (50 V à 5000 V).

[11] MEGGER « Tests des huiles isolantes ».

[12] Hung DANG « Etude des phénomènes de préclaquage et de claquage des huiles végétales, minérales et synthétiques – caractérisation des décharges aux interfaces », thèse doctorat, L'ÉCOLE CENTRALE DE LYON-5/2011.

[13] N.AIT ALIOUA et D.CHIKHI « Comportement électrique de deux isolateurs parallèles contaminés et soumis à une tension alternative 50Hz », mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, UMMTO-2008/2009.

[14] Electro-Industrie « isolants liquides détermination de la tension de claquage à fréquence industrielle méthode d'essai » 1995

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I: Généralités sur les huiles

I. Introduction	3
II. Isolants liquides	4
III. Présentation générale des huiles.....	6
1. Huile de silicone.....	7
2. Huile ester synthétique	7
3. Les huiles végétales	8
4. L'huile minérale	10
a. Caractéristiques électriques des huiles minérales	12
b. Composition chimique de l'huile minérale	15
c. Les hétéroatomes.....	16
d. Caractéristiques de service.....	17
5. Les additifs.....	19
6. Humidité	19
7. Impureté.....	19
8. Huile à base de gaz liquéfiés.....	19
9. Autres propriétés.....	19
a. Viscosité.....	19
b. Acidité et stabilité à l'oxydation.....	19
c. Coût	20
d. Désignation	20
e. Pollution	20
IV. Tests de la qualité de l'huile.....	20
1. Tension de claquage	20
2. Mesure de l'humidité	20
3. Normes applicables	21
4. Mesure de l'acidité	22
5. Tableau récapitulatif.....	22
6. Autres	22
V. Vieillessement des huiles.....	23
1. Etude bibliographique	23
2. Oxydation.....	24
a. Oxydation de l'huile minérale.....	24
b. Oxydation des esters naturels	24
3. Hydrolyse	25

Sommaire

4. Influence du vieillissement sur les propriétés des isolants liquides	25
VI. Conclusion	26
I. Introduction	27
1. Facteur d'influence sur les tests diélectriques	27
2. Facteurs déterminants en tests diélectriques	28
a. La température.....	28
b. La pression.....	28
c. L'hygrométrie.....	28
3. Les essais de rigidité diélectrique.....	28
4. Facteurs d'influence-généralités	28
a. La rupture diélectrique.....	29
b. Le claquage électrique	29
c. Le critère de claquage par avalanche.....	29
d. Claquage thermique.....	30
5. Influence du milieu sur la tension de rupture.....	30
a. Cas d'un isolant gazeux	30
b. Cas d'un isolant solide	30
c. Cas de l'isolant liquide.....	31
II. Etude bibliographique sur les huiles.....	31
1. Solubilité de l'eau dans les isolants liquides :	31
a. Rigidité diélectrique : influence de la teneur en eau et des particules.....	33
b. Facteurs influant sur les pertes diélectriques	34
2. Mesure de la tension de claquage en tension alternative	36
3. Mesure des propriétés diélectriques	37
a. Principe de mesure.....	37
b. Calcul du facteur de pertes diélectrique.....	38
c. Schéma équivalent série d'un isolant	38
d. Schéma équivalent parallèle d'un isolant.....	38
4. Le pont de Schering	39
5. Schéma du pont de Schering	39
III. Appareils pour la mesure de la rigidité diélectrique des huiles	40
1. Les spintermètres de laboratoire de Megger	40
a. Description.....	40
b. Spintermètre de laboratoires 60, 80 ou 100 kV	40
VII. Conclusion	40
I. Introduction	42

Sommaire

1. Le dispositif expérimental	42
2. Résultats expérimentaux	44
a. Résultats avec l'huile contaminée	44
b. Résultats avec l'huile indemne	44
II. Caractéristiques du spintermètre industriel Electro Industries	46
1. Détermination de la tension de claquage à fréquence industrielle	46
a. Méthode d'essai (CEI 156 :1995)	46
b. Domaine d'application.....	47
c. Référence normatives.....	47
2. Appareillage électrique.....	47
3. Régulateur de tension	48
4. Transformateur élévateur	48
5. Résistances de limitation de courant	48
6. Disjoncteur.....	49
a. Exigences minimales requises	49
b. Exigences particulières requises pour les liquides silicones	49
c. Dispositif de mesurage	49
7. Dispositif d'essai.....	50
a. Cellule d'essai	50
b. Electrodes.....	50
c. Agitateur	51
d. Préparation des électrodes	52
e. Préparation du dispositif d'essai.....	52
f. Echantillonnage.....	53
g. Etat de l'échantillon	53
h. Mode opératoire	54
i. Rapport	54
j. Dispersion des résultats	55
III. Conclusion	56
Conclusion générale	

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Structure chimique d'une huile végétale, aussi appelé triester (triglycérides); R,.....	8
Figure 2: Viscosité cinématique des différents types d'huiles pour transformateur. [5].....	9
Figure 3: Structure des hydrocarbures de base dans une huile minérale [12]	12
Figure 4: Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension. [13].....	12
Figure 5: Circuit équivalent série.....	14
Figure 6: Circuit équivalent parallèle	14
Figure 7: Un titrateur Karl Fischer [5].....	21
Figure 8: Différentes phases de vieillissement d'une huile minérale et variation de l'acidité et de la quantité de dépôt [12].....	24
Figure 9: Acidité des huiles en fonction du temps de vieillissement.....	25
Figure 10: Teneur en eau dans l'huile minérale en fonction de l'humidité relative de l'air à différentes températures [1]	32
Figure 11: Rigidity diélectrique de l'huile minérale en fonction de la teneur en eau. 1) sans cellulose ; 2) avec cellulose [1].....	34
Figure 12: Facteur de dissipation et de la permittivité d'une huile minérale pour des fréquences élevées [1]	35
Figure 13: Influence de la température sur les pertes dans l'huile minérale pour les basses fréquences. [1]	36
Figure 14: Principe de mesure de la spectroscopie diélectrique [3]	37
Figure 15: Schéma du pont de Schering [6]	39
Figure 16 : Vue de la cellule expérimentale réalisée (avec l'échantillon d'huile BORAK 22).....	43
Figure 17: Vue de l'ensemble du système expérimental (la source de tension n'apparaît pas mais la sonde est visible).....	43
Figure 18: Caractéristique courant tension pour l'huile contaminée.....	45
Figure 19: Caractéristique courant tension pour l'huile indemne.....	45
Figure 20: Caractéristiques courant tension des huiles indemne et contaminée.....	46
Figure 21: Exemple d'une cellule et d'électrodes sphériques appropriées [14].	51
Figure 22: Exemple d'une cellule et d'électrodes hémisphériques appropriées [14].	51
Figure 23: Représentation graphiques de coefficient de variation (rapport de l'écart type à la valeur moyenne) en fonction de la moyenne de tension de claquage [14].	55

INTRODUCTION GENERALE :

L'ensemble des installations et équipements électriques doit respecter des caractéristiques d'isolement afin de permettre leur fonctionnement en toute sécurité. L'isolement est réalisé à l'aide de matériaux présentant une forte résistance électrique de façon à limiter au maximum la circulation de courants en dehors des conducteurs. La qualité de ces isolements s'altère au fil des ans de par les contraintes auxquelles sont soumis les équipements. Cette altération induit une réduction de la résistivité électrique des isolants ce qui par conséquent génère une augmentation des courants de fuite eux-mêmes source d'incidents dont la gravité peut être grave sur le plan de la sécurité des personnes et des biens mais également au niveau des coûts d'arrêt de production dans l'industrie. Au-delà des mesures réalisées lors de la mise en route des éléments neufs ou rénovés, le test périodique d'isolement des installations et des équipements permet de se prémunir contre de tels incidents en mettant en place une maintenance préventive [10]. A ce stade il convient de distinguer deux types de mesures souvent confondues : l'essai diélectrique et la mesure de résistance d'isolement. L'essai de tenue diélectrique communément appelé « essai de claquage » va renseigner sur la capacité d'un isolant à supporter une surtension de moyenne durée sans que se produise un amorçage. Dans la pratique cette surtension peut être due soit à une décharge de foudre, une surtension de manœuvre ou à l'induction engendrée par un défaut sur une ligne de transport d'énergie. L'objectif principal de l'essai de claquage est de s'assurer que les règles de construction relatives aux lignes de fuite et aux distances d'isolement ont été respectées. L'essai est souvent réalisé en appliquant une tension alternative mais il peut également être réalisé avec une tension continue. Le résultat obtenu est une valeur de tension le plus souvent exprimée en kilovolts (kV). [10] L'essai diélectrique présente un caractère plus ou moins destructif en cas de défaut, selon les niveaux de tests et l'énergie mise en jeu.

La mesure de la tension de claquage des isolants liquides, telle qu'elle est généralement pratiquée est une procédure d'essai empirique destinée à révéler la présence de produits contaminants comme l'eau ou des matières solides en suspension, et 'aider ainsi à la prise de décision quant à l'opportunité d'effectuer un traitement de séchage et de filtration [9]. La valeur de la tension de claquage des isolants liquides dépend beaucoup des conditions particulières employées dans sa détermination. En conséquence, des modes opératoires et un équipement normalisés sont essentiels pour définir sans ambiguïté les concepts dans les résultats des essais. La méthode décrite dans la norme internationale [6], s'applique soit aux essais de réception de nouvelles livraisons d'isolants liquides, soit aux essais sur liquides traités, avant ou pendant le remplissage de matériels électriques, soit au cours des opérations de surveillance et de maintenance des appareils en service.

Les huiles isolantes sont d'excellents liquides caloporteurs possédant une rigidité diélectrique élevée. Ceci les désigne comme d'excellents candidats pour l'isolation des équipements électriques HT comme les transformateurs, les disjoncteurs, et autres dispositifs de mesure. La garantie de la qualité de l'huile réside dans la condition de son maintien dans un état adéquat afin d'éviter un vieillissement prématuré des systèmes d'isolation [7].

Quelque soient les conditions de son utilisation l'huile minérale verra toujours ses caractéristiques évoluer avec le temps. L'évolution se manifeste presque toujours de façon négative, c'est la dégradation. Cette dégradation est provoquée par l'oxydation, la formation d'acides ou de gaz ou l'absorption d'eau. Ces modifications peuvent être révélées par les tests rigidité diélectrique de l'huile [5], et pourront, le cas échéant être identifiés par des essais complémentaires.

Si les isolants liquides se prêtent facilement à des tests en laboratoire dans les entreprises industrielles, ils demeurent loin d'une étude à la portée d'étudiants dans un cursus normal scolaire. C'est dans ce sens que le présent travail a été pensé. L'objet de ce mémoire consiste en la mise au point de façon rudimentaire un système à même d'aider l'étudiant à constater la rigidité diélectrique d'une huile, il pourra mesurer sa tension de claquage et avoir une idée générale sur les tests diélectriques et les facteurs pouvant les influencer. Dans notre partie expérimentale, nous avons essayé d'approcher au mieux les spécifications de diverses normes de telle sorte à rapprocher les préoccupations pédagogiques des impératifs industriels. Partant de cette volonté de ne point détacher le lecteur de ces préoccupations pédagogiques le présent mémoire a été agencé de la façon suivante :

Dans un premier chapitre, venant immédiatement à suite de cette introduction générale nous donnons certains rappels et généralités concernant les huiles isolantes. Un second chapitre est entièrement dédié à différents tests diélectriques et aux appareils pouvant être mis en œuvre. C'est dans le troisième chapitre que nous exposons la partie expérimentale de notre travail ainsi que l'exposé certains résultats qualitatifs. Nous terminons notre travail par une conclusion générale dans laquelle nous résumons l'essentiel de nos résultats.

I. Introduction

Les liquides isolants sont utilisés dans divers équipements électrotechniques tels les transformateurs (puissance, distribution), les condensateurs, les câbles, les disjoncteurs, etc... Les caractéristiques d'un isolant liquide dépendent du type d'application à laquelle on le destine, aussi la connaissance la plus complète possible des propriétés de tels matériaux s'avère être une exigence dans leur choix de leur destination. En général, la satisfaction totale des exigences n'est jamais atteinte, aussi le praticien devra-t-il se contenter du meilleur compromis dès lors que certaines exigences sont contradictoires. Les principales propriétés relatives aux liquides en électrotechnique concernent:

- leurs propriétés électriques et diélectriques (permittivité, résistivité, rigidité diélectrique, etc...);
- leur comportement durant le service caractérisé par leur vieillissement (stabilité vis-à-vis des contraintes thermiques, chimiques ou autres);
- leurs propriétés physico-chimiques et thermodynamiques (viscosité, capacité thermique, point éclair, etc.);
- le comportement du produit vis-à-vis du feu peut s'avérer un paramètre important dans certains cas ;
- les comportements toxicologiques (biodégradabilité, toxicité, etc.) revêtent, depuis quelques années une importance de plus en plus grande.

Parmi les isolants liquides en électrotechnique les huiles minérales occupent une place de choix. Ces huiles sont obtenues directement par raffinage de produits pétroliers. Leur composition chimique est extrêmement compliquée (plusieurs milliers de molécules différentes) et elle est généralement définie par teneur de divers éléments carbonés comme le carbone paraffinique (C_p), en carbone naphénique (C_n) et en carbone aromatique (C_a). Les paramètres C_p et C_n influent sur la densité, la viscosité et le comportement à basse température caractérisé par le point d'écoulement. La présence d'aromatiques améliore la résistance à des attaques oxydantes (limitation de formation de boues), les propriétés de « gassing » et la rigidité en impulsion (ou bien rigidité magnétique, elle est utilisée pour quantifier l'effet d'un champ magnétique sur le mouvement d'une particule chargée). Les caractéristiques des huiles ainsi que les méthodes permettant leur appréciation sont régies par des normes internationales. Ces normes provenant de la Commission Electrotechnique Internationale régissent l'utilisation des huiles minérales dans différents types dispositifs

(transformateurs, câbles de transport d'énergie, etc.). Dans le présent travail notre attention est portée sur l'huile de transformateurs BORAK 22. Cette huile produite en Algérie est utilisée par l'entreprise Electro-Industries pour ses transformateurs. L'huile pour transformateur est généralement définie comme une « huile isolante pour transformateurs et appareillages électriques semblables pour lesquels une stabilité à l'oxydation normale est requise » [2]. Cette huile est plus souvent utilisée avec du papier pour constituer une isolation composée au papier imprégné. En plus de ses qualités isolantes (de 20 à 30 kV/mm) [1], l'huile minérale présente des propriétés thermiques intéressantes, ce qui prédestine à jouer un rôle dans l'évacuation de la chaleur c'est-à-dire le refroidissement des transformateurs. Cette évacuation thermique concerne la chaleur produite par les bobines et le circuit magnétique et elle est obtenue par circulation au travers de radiateurs constitués par la forme de la cuve.

La fonction d'isolation de l'huile consiste à éviter tout contact galvanique entre les enroulements et entre ceux-ci et la cuve. De ce fait, elle doit posséder une grande rigidité diélectrique afin de réduire les enroulements et un point d'éclaire élevé pour permettre une exploitation en toute sécurité. Dans le souci d'augmenter la résistance au feu il a été fait appel à des produits dits PCB (Les polychlorobiphényles), aussi appelés biphényles polychlorés (BPC), ou encore parfois improprement dits « pyralènes » (du nom commercial d'un produit de Monsanto à base de PCB autrefois très utilisé en Europe dans les transformateurs), ces PCB largement utilisés entre 1930 et 1970, toutefois, du fait de leur toxicité et de la pollution qu'ils engendrent ces produits ont purement et simplement interdits par pratiquement tous les pays.

Pour lutter à la fois contre les problèmes d'inflammabilité et de pollution des huiles de substitution, ont été développées dans les dernières décennies, les huiles de silicone, les huiles ester synthétique et végétales. Toutefois, pour des raisons économiques, ces solutions sont surtout utilisées dans des applications particulières alors que dans les transformateurs de puissance l'huile minérale demeure encore le matériau auquel il est le plus fait appel.

II. Isolants liquides

➤ Rôle des isolants liquides

Les huiles isolantes sont utilisées en électrotechnique comme imprégnant d'isolations celluloses ou comme produit de remplissage de matériels électriques très divers. Leur rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer la tenue diélectrique de

l'isolation, la rigidité diélectrique des liquides étant nettement supérieure à celle des gaz. Cependant, dans beaucoup d'applications, elles servent à la fois à améliorer les propriétés diélectriques et à évacuer la chaleur d'un assemblage [12]. Les transformateurs remplis d'huile ont été développés depuis plus d'un siècle. Cette technologie est toujours très utilisée dans les transformateurs de puissance contrairement aux transformateurs de distribution, qui eux peuvent être "secs". Aussi, différentes raisons expliquent cette préférence:

- par rapport aux solides, les liquides refroidissent et isolent le transformateur. Ainsi, les transformateurs immergés sont plus compacts que les transformateurs secs de même puissance.
- les solides permettent d'obtenir des performances diélectriques équivalentes aux liquides, mais à des coûts beaucoup plus élevés.
- les isolants solides utilisés seuls présentent des risques énormes aux décharges partielles (inclusions gazeuses) pour les niveaux de tension des transformateurs de puissance.
- les analyses d'huile (teneur en eau, analyse de gaz ...) permettent de diagnostiquer l'état du transformateur à moindre coût.
- les transformateurs immergés sont moins bruyants que les secs et provoquent ainsi moins de nuisance sonore. [12]

Dans un transformateur, les huiles isolantes assurent plusieurs fonctions [12] :

a. Fonction isolation

Dans la partie active d'un transformateur, l'isolation entre les éléments portés à des potentiels électriques différents est assurée soit:

- par le diélectrique liquide seul, lorsqu'il s'agit d'une isolation entre deux pièces métalliques nues (plots de commutateur par exemple) ;
- par une couche solide (papier ou carton) imprégnée de diélectrique liquide, c'est le cas par exemple de l'isolation entre deux conducteurs voisins d'un même enroulement ;
- par une isolation mixte: combinaison de films de diélectrique liquide et de barrières d'isolants solides, c'est le cas d'une isolation entre deux enroulements concentriques de tensions différentes.

Les principales propriétés qui permettent de juger de l'aptitude d'une huile à remplir sa fonction isolante sont la rigidité diélectrique, le facteur de dissipation ou facteur de perte

($\tan\delta$), la permittivité diélectrique et la résistivité. Ces caractéristiques sont essentielles pour le dimensionnement d'un transformateur. [12]

b. Fonction transfert de chaleur

Bien que son rendement soit exceptionnellement élevé (99 à 99.9%), un transformateur ne peut échapper à la perte d'énergie qui accompagne toute conversion. L'énergie perdue se dissipe sous forme de chaleur nécessitant ainsi le refroidissement de l'appareil. En raison des pertes, les températures de chacun des éléments s'élèvent jusqu'à établissement d'un équilibre entre les vitesses de production et d'évacuation de la chaleur. La chaleur à évacuer est véhiculée par circulation naturelle ou forcée de l'huile, vers les radiateurs extérieurs. Un dispositif de refroidissement bien dimensionné permet d'éviter la formation de points chauds grâce à une circulation importante et bien régulée.

Le refroidissement se fait par convection et par conduction thermique, et les principales caractéristiques qui permettent de juger de l'aptitude d'une huile à évacuer la chaleur sont la viscosité, la conductivité thermique et la chaleur spécifique. [12]

c. Autres fonctions

Les huiles peuvent être aussi utilisées pour leur pouvoir extincteur d'arcs électriques (dans les chambres de coupure des commutateurs en charge et de certains disjoncteurs), en raison de leur pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement (sélecteurs de prises, pompes immergées) et dans certains cas pour améliorer la résistance au feu, comme c'est le cas dans les transformateurs de distribution proche de la population.

Enfin, elles servent à ralentir l'oxydation directe de l'isolation cellulosique. [12]

III. Présentation générale des huiles

D'une façon générale, il n'existe pas de liquides isolants pouvant remplir l'ensemble des propriétés requises pour une application donnée. Les caractéristiques électrique, chimique et physique d'un liquide diffèrent donc d'une application à une autre. Les huiles isolantes sont classées selon leurs origines. On distingue quatre types : les huiles végétales (produit naturels), les huiles minérales (à base de produits pétroliers raffinés) et les liquides de synthèse, et l'huile de silicone. Cette classification est liée à leur ordre d'apparition chronologique dans les applications électrotechniques. En effet, les huiles végétales furent les premières utilisées, ensuite les huiles minérales ont été développées, puis les liquides de synthèse et silicone ont été fabriqués par la suite pour pallier aux lacunes de l'huile minérale

dans certaines applications. Dans ce qui suit, nous présentons les quatre types d'isolants liquides utilisés dans les transformateurs et d'autres appareils électriques. [12]

1. Huile de silicone

L'huile de silicone est constituée de siloxane polymérisé à des chaînes organiques. On a donc des composants de la forme (...Si-O-Si-O-Si...), alors que l'huile minérale c'est des liaisons carboniques. Un exemple typique est le polydiméthylsiloxane (PDMS) de formule $(\text{H}_3\text{C}) [\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_n \text{Si}(\text{CH}_3)_3$. On peut faire un parallèle avec alcanes pour les hydrocarbures. Les huiles de silicone ont une très bonne stabilité chimique, ce qui dire une bonne résistance au vieillissement. De plus, les huiles de silicone ont un point de flamme presque deux fois plus élevé que les huiles minérales, de l'ordre de 300°C au lieu de 150°C, ce qui réduit le risque d'explosion des transformateurs de puissances. Leur viscosité est également faible à basse température. Au niveau des désavantages, les huiles de silicones n'assurent pas le même niveau d'isolation diélectrique que les huiles minérales pour de grands volumes. La viscosité à haute température est supérieure à celle des autres huiles. Le coût des huiles de silicone est également nettement supérieur à celle de l'huile minérale (d'un ordre de grandeur 8). [5]

2. Huile ester synthétique

Bien que les huiles minérales occupent une place très importante parmi les liquides pour les applications électrotechniques, les huiles de synthèse sont utilisées chaque fois que des propriétés particulières sont recherchées. C'est notamment le cas lorsqu'il s'agit d'améliorer la résistance au feu des transformateurs se trouvant à proximité de la population (transformateurs de distribution et de traction). Ces liquides de synthèse sont tous obtenus à selon différents procédés chimiques. Il en existe trois types principaux de produits destinés aux transformateurs :

- les huiles silicones;
- les hydrocarbures chlorés (halogénés), tel que les PCB ;
- les huiles esters de pentaérythritol encore appelées esters synthétiques ou esters organiques (par opposition aux esters naturels ou huiles végétales).

Les huiles esters synthétiques sont obtenues à partir d'un tétralcool (pétaérythriol) ou d'un mélange d'acides monocarboxyliques contenant de 7 à 9 carbones [12]. Un des principaux atouts de ce type d'huiles est la haute concentration d'eau qu'elles peuvent contenir comparées aux autres huiles isolantes [12]. L'autre avantage des huiles esters synthétiques est leur bonne biodégradabilité comparée à l'huile minérale ou à l'huile silicone.

Les huiles esters synthétiques sont utilisées dans les transformateurs de distribution pour leur résistance au feu. Leur point de feu élevé (>3000 °C) par rapport aux huiles minérales constitue l'une des caractéristiques principales de ces produits. C'est ainsi qu'on les retrouve dans les appareillages proches de la population, dans les immeubles, les tunnels, etc. L'un de leurs points faibles c'est leur viscosité un peu élevée et qui devient très importante aux basses températures. L'autre point faible concerne leur stabilité au gassing. Une étude faite par Dumke et al. [12] a mis en évidence leur mauvaise stabilité avec une forte production de gaz en comparaison avec d'autres types d'huile. [5]

3. Les huiles végétales

Les huiles végétales ont été les premières huiles isolantes utilisées pour l'appareillage électrique; la première des applications fût l'imprégnation des condensateurs avec l'huile de ricin. Ces huiles sont essentiellement constituées de triglycérides, c'est à dire un triester sachant que la formule d'un ester est R-COO-R. Les huiles végétales portent aussi le nom d'esters naturels ou d'huiles végétales (par opposition aux esters synthétiques ou organiques) car elles sont synthétisées naturellement par tout organisme vivant et peuvent provenir de différentes semences telles que le tournesol, le colza, le soya.... [12] Les huiles esters végétales sont obtenues par estérification d'un tri-alcool simple, avec trois acides gras. Ces acides sont mono carboxyliques (de formule R-COO-H), à chaîne linéaire non branchée comprenant un nombre pair d'atomes de carbone. Ils peuvent être saturés ou insaturés et parfois hydroxylés. Les triglycérides sont obtenus par trituration (broyage et pression) des graines. La réaction d'estérification d'une huile végétale suit le schéma donné sur la figure 1.

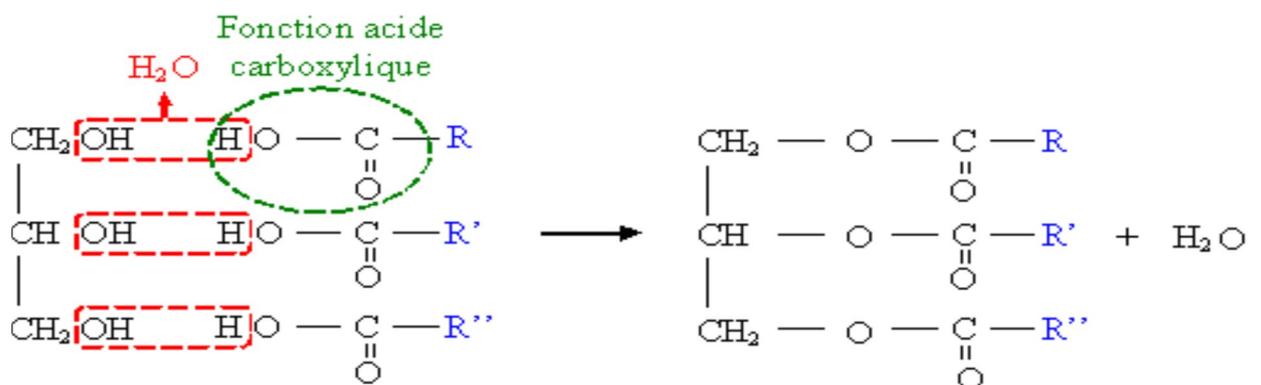


Figure 1 : Structure chimique d'une huile végétale, aussi appelé triester (triglycérides); R,

R' et R'' sont les chaînes acides gras du même ou de la différent types. [12]

La mise en œuvre des huiles fait apparaître plusieurs problèmes dont :

- le fait que les huiles végétales se solidifient vers -15°C . Une entreprise (Oléotek) a toutefois développé une huile végétale liquide jusqu'à -75°C .
- la stabilité physico-chimique : les huiles végétales sont généralement moins stables chimiquement (oxydation) et plus sensibles aux rayonnements ultraviolets que les huiles minérales (raison pour laquelle on met les huiles alimentaires dans des bouteilles opaques).
- les huiles végétales passent pour être plus chères que les huiles minérales mais cela reste à vérifier à l'avenir, selon l'évolution des prix du pétrole [4].

Un des grands atouts des huiles végétales est leur excellente biodégradabilité qui, en contrepartie leur confère malheureusement une plus grande sensibilité à l'oxydation [12]. De ce fait, leur usage est limité aux appareillages électriques scellés qui ne sont pas respirant, c'est à dire sans communication avec l'atmosphère. Leurs autres avantages que présentent ces huiles sont leur faible inflammabilité et leur grande capacité à absorber l'eau (grande solubilité de l'eau) en comparaison avec les huiles minérales. Outre ces deux avantages, ce type d'huile possède une viscosité plus élevée que celle des huiles minérales (Figure 2) et notamment un point d'écoulement assez haut (aux alentours de -20°C), ce qui limite le transfert de chaleur et restreint leur usage dans les pays où le climat n'est pas trop froid.

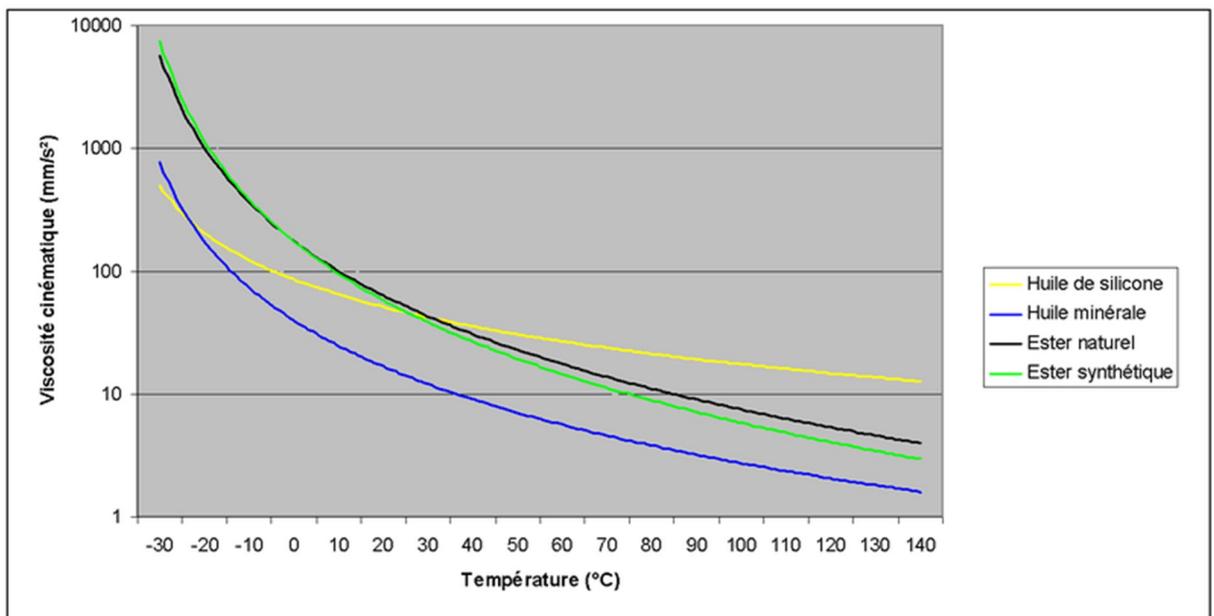


Figure 2: Viscosité cinématique des différents types d'huiles pour transformateur. [5]

Enfin, les huiles végétales neuves ont des propriétés électriques voisines de celles des huiles minérales, bien que leur résistivité soit moins élevée. [12]

4. L'huile minérale

Les huiles minérales, dont les molécules sont basées sur des composés de carbone et d'hydrogène, sont utilisées en haute tension dans les transformateurs (puissance, distribution, mesure), dans les condensateurs et dans les appareils de coupure (disjoncteurs, sectionneurs). Leur première qualité est de pouvoir supporter des champs électriques élevés (rigidité diélectrique). Par ailleurs, elles sont généralement très fluides, ce qui leur permet d'assurer, en plus de l'isolation électrique, le refroidissement par convection naturelle ou forcée. C'est le cas en particulier dans les transformateurs de puissance où la chaleur doit être efficacement évacuée. Les huiles voient leur viscosité augmenter avec la baisse de température, et il existe une température au dessous de laquelle l'huile ne coule plus, nous parlons alors de point d'écoulement. Les huiles minérales couramment utilisées présentent l'avantage d'être utilisables jusque vers -40°C . Si les basses températures augmentent la viscosité, à l'inverse, aux températures élevées le risque réside dans le fait de voir l'huile prendre feu, c'est ainsi que les grandes quantités d'huile présentes dans un transformateur de puissance, peuvent constituer des points névralgiques pour des incendies. Enfin, compte tenu de la longue durée de vie des équipements utilisés dans les réseaux d'énergie électrique, on attend de ces huiles qu'elles conservent des spécifications électriques acceptables durant plusieurs décennies. Ainsi, les principaux paramètres servant à caractériser les performances d'une huile destinée à l'isolation sont :

- sa rigidité diélectrique (de 20 à 30 kV/mm).
- sa viscosité cinématique (de 3 -16 mm²/s à 40 °C ; jusqu'à 1800 mm²/s à -30°C).
- son point d'écoulement (de -30 à -60°C). [4]
- son point d'éclair ou : point d'inflammabilité (de 95 à 140 °C).
- sa stabilité physico-chimique. [4]

Les huiles minérales destinées aux transformateurs proviennent principalement de quatre familles d'hydrocarbure : les paraffines, les naphthènes, les aromatiques et les alcènes. La paraffine a le défaut de geler rapidement et d'empêcher l'exploitation des transformateurs par grands froids. Si le taux de paraffine est en dessous de 50 % on parle d'huile naphthénique, s'il se trouve entre 50 et 56 % d'huile intermédiaire, au-delà d'huile paraffinique. Les aromatiques ont un effet sur le vieillissement de l'huile à double tranchant : à cause de l'effet qu'ils ont sur l'oxygène en présence de lumière ils dégradent l'huile, d'un autre côté leur production de phénols permet de détruire les radicaux libres sources de vieillissement. Ils stockent le dihydrogène émis par les décharges partielles. Ils sont donc peu

fréquents dans les huiles utilisées dans les transformateurs très sujets au vieillissement, ils sont par contre laissés dans les condensateurs et les traversées isolées. Les alcènes accélèrent également la dégradation de l'huile et sont donc éliminés. Par ailleurs le soufre qui peut être présent dans l'huile doit être enlevé. Il est en effet fortement corrosif. Les furanes, à savoir le 2-Furfural, doivent également être absents. Pour limiter le vieillissement des additifs antioxydants sont ajoutés à l'huile, on parle alors d'huile inhibée, dans le cas contraire d'huile non-inhibée. Ces additifs disparaissent avec le temps, il convient donc de les renouveler. [5]

- **Structure paraffinique (Cp):** les molécules de ce groupe sont aussi connues sous le nom d'hydrocarbures saturés en chaînes droites ou alcanes, qui peuvent être linéaires (n alcanes) ou ramifiées (iso-alcanes) et dont la formule générale est C_nH_{2n+2} . Les molécules paraffiniques ont une stabilité thermique plus faible que les molécules naphthéniques et aromatique. [12]

- **Structure naphthénique (CN):** les molécules de ce groupe sont également connues sous le nom d'hydrocarbures saturés cycliques ou cycloalcanes. Elles correspondent à des chaînes carbonées fermées de formule générale C_nH_{2n} . La structure paraffinique et naphthénique ont une influence prépondérante sur la densité, la viscosité et le comportement à basse température (point d'écoulement, point de trouble) [12].

- **Structure aromatique (CA):** ces molécules sont des composés cycliques, aussi appelées hydrocarbures insaturés, de formule générale C_nH_n . Elles sont totalement différentes des molécules paraffiniques et naphthéniques, mais jouent un rôle très important dans les propriétés d'une huile minérale. On les trouve sous deux formes : les monoaromatiques et les polyaromatiques dont certaines sont considérées comme cancérigènes. Ces composés aromatiques permettent à l'huile d'avoir une bonne résistance à l'oxydation (production de phénols qui détruisent les radicaux), de bonnes propriétés de gassing et une bonne rigidité en impulsion. [12]

Les agencements moléculaires de ces différentes structures sont représentés sur la figure 3.

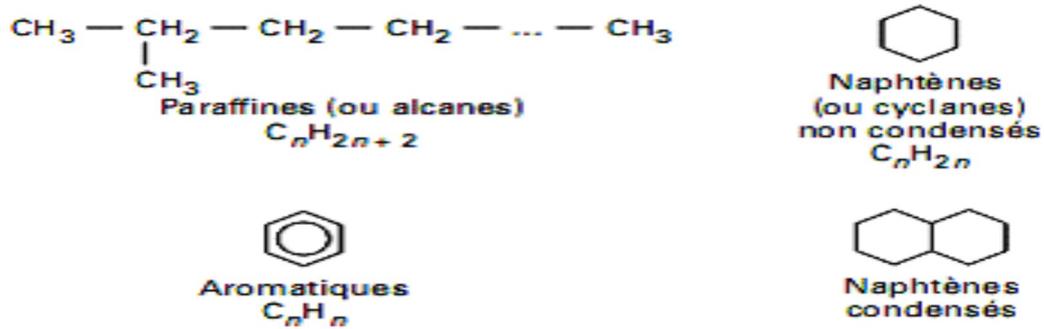


Figure 3: Structure des hydrocarbures de base dans une huile minérale [12]

a. Caractéristiques électriques des huiles minérales

i. Permittivité

La permittivité ou constante diélectrique est une propriété physique qui décrit la réponse d'un milieu à une sollicitation par un champ électrique. C'est une grandeur macroscopique essentielle en électrostatique et en électrodynamique. Elle intervient dans de nombreux domaines notamment dans l'étude de la propagation des ondes électromagnétiques puisque conditionnant l'indice de réfraction [5]. Lorsqu'un diélectrique est soumis à l'action d'un champ électrique, il se produit à l'échelle moléculaire diverses modifications qui ont pour effet de créer un champ électrique propre E_p à l'intérieur de la substance qui aura pour effet d'atténuer le champ extérieur E_e agissant sur le matériau. Ce phénomène, schématiquement montré sur la figure porte le nom de polarisation et se manifeste d'autant plus fortement que la permittivité, exprimée en F/m est importante (Figure 4) [13]. Notons que dans la pratique la grandeur utilisée est la permittivité relative obtenue par comparaison au vide ϵ_r .

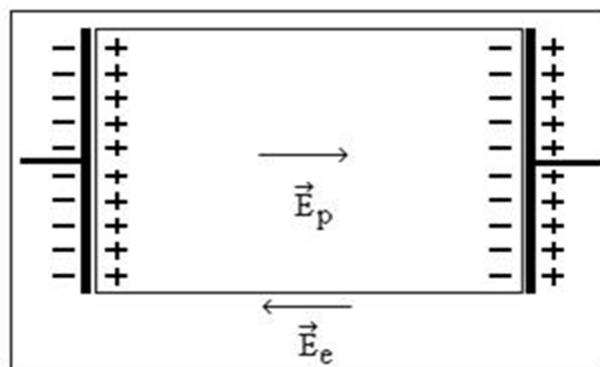


Figure 4: Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension. [13]

ii. Conductivité

La conductivité électrique est l'aptitude d'un matériau ou d'une solution à laisser les se déplacer librement charges électriques, c'est-à-dire à permettre le passage d'un courant électrique. [5]

- Principe physique

La conductivité électrique est l'inverse de la résistivité. Elle correspond à la conductance d'une portion de matériau ayant 1 m de longueur pour une section de 1 m².

Parmi les meilleurs conducteurs, il y a :

- les métaux dans lesquels la conduction est assurée par des électrons libres ;
- les électrolytes où la conduction est due aux ions, conductivité dépendant de la nature et de la concentration de ces derniers. Certains matériaux comme les semi-conducteurs, ont une conductivité qui dépend d'autres conditions physiques, comme la température ou l'exposition à la lumière, etc. Ces propriétés sont de plus en plus mises à profit pour réaliser des capteurs. [5]

iii. Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un isolant représente la valeur maximum du champ électrique que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique (donc d'un court-circuit). On utilise aussi l'expression champ disruptif qui est synonyme mais plus fréquemment utilisée pour qualifier la tenue d'une installation, alors que le terme rigidité diélectrique est plus utilisé pour qualifier un matériau.

iv. Facteur de pertes diélectrique

Le facteur de pertes est donné par $\tan \delta$. L'angle δ , défaut de quadrature entre tension et courant, dépend de la permittivité et de la résistivité. La valeur de $\tan \delta$ est une donnée fondamentale pour les huiles des transformateurs et doit, dans les conditions normales et demeurer inférieure à 0.001. La résistivité, mesurée en continue peut apporter de précieuses informations sur l'éventuelle présence de porteurs de charges, conséquence d'une dégradation par décharge partielles ou échauffements localisés [5].

Tout isolant soumis à un champ électrique alternatif est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques. Le diélectrique réel peut être représenté par les schémas équivalents suivants donnés sur les figures 5 et 6 [13].

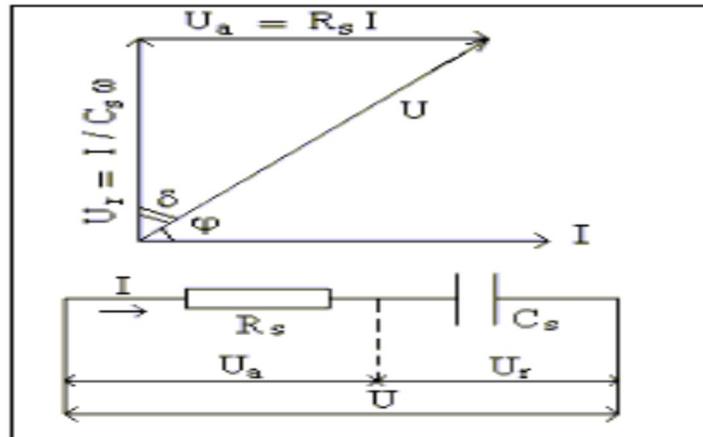


Figure 5: Circuit équivalent série

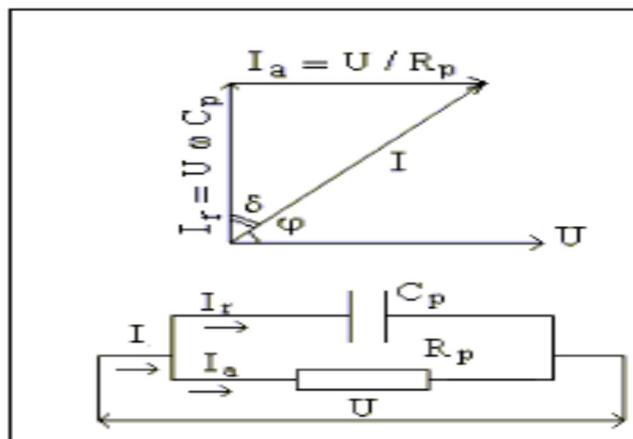


Figure 6: Circuit équivalent parallèle

Le courant total traversant l'ensemble du circuit est déphasé en avance sur la tension d'un angle $\phi < \frac{\pi}{2}$. Son complément δ est appelé angle de pertes. La tangente de cet angle est appelée facteur de dissipation (ou de pertes) et s'obtient de la façon suivante: [13]

$$= - = -$$

1.1

v. Tension inter faciale

Cette tension représente les forces s'exerçant sur une particule de la part de l'huile. Sa mesure est très délicate, mais peut, en association avec le facteur de dissipation diélectrique, servir d'avertisseur précoce d'un début de dégradation de l'huile [5].

vi. Tension de claquage en courant alternatif

La tension de claquage en alternatif est une mesure importante de la capacité de l'huile à supporter une contrainte électrique. La mesure de cette caractéristique se fait à l'aide d'un spintermètre à électrodes sphériques. Cette tension est fortement influencée par la présence d'humidité ou d'autres impuretés constituant des corps étrangers. Cette tension de claquage doit nécessairement être vérifiée lors du remplissage de la cuve. Par la suite il sera procédé à des vérifications périodiques pour se rendre compte de l'évolution de ce paramètre [5].

vii. Point d'écoulement

Le point d'écoulement est défini comme la température la plus basse pour laquelle un liquide peut couler, lorsqu'il est refroidi selon des conditions fixées.

b. Composition chimique de l'huile minérale

La composition des huiles reflète celle du distillat d'origine qui consiste en des pétroles sélectionnés. Ces pétroles sont composés d'hydrocarbures saturés d'hydrocarbures aromatiques et de diverses autres combinaisons. On rencontre également dans la composition des huiles minérales des hydrocarbures hétérocycliques associés à des atomes de soufre, d'azote ou d'oxygène avec des teneurs ne dépassant guère les 10% en masse [7].

i. Les composés paraffiniques

Les molécules paraffiniques peuvent être soit linéaires soit ramifiées avec une formule générale de forme C_nH_{2n+2} . Parmi ces molécules nous trouvons les n-alcanes à chaîne directe et les iso-alcanes présentant une chaîne ramifiée [7].

ii. Les composés naphéniques

Les molécules naphéniques sont constituées de cyclanes ou cycloalcanes qui correspondent à des chaînes carbonées fermées de formule générale C_nH_{2n} .

Dans les huiles minérales, nous rencontrons des cycles à cinq et des cycles à six atomes de carbone [7].

iii. Les composées aromatiques

Ce sont des composées cycliques, de formule générale $C_n H_m$ dont le benzène en est l'exemple simple. Ces hydrocarbures sont réactifs et leurs propriétés de fixer l'hydrogène dans la stabilité de l'huile minérale isolante [7].

c. Les hétéroatomes

Les hétéroatomes comme le soufre, l'azote et l'oxygène sont généralement fixés sur les structures aromatiques constituant l'huile minérale [7].

i. Azote

Les molécules, comme les quinoléines ou les pyridines, contenant de l'azote peuvent présenter des propriétés basiques. D'autres molécules, comme les carbazoles ou pyrroles, peuvent au contraire présenter un caractère acide affirmé. La teneur des huiles minérales en azote est faible (0.01 à 0.09% en masse) mais cet élément a une forte influence sur leurs caractéristiques. En effet, certaines molécules contenant de l'azote peuvent porter des charges par piégeage dans un champ électrique. D'autres molécules peuvent agir comme agents catalyseurs ou initiateurs de processus d'oxydation [7].

ii. Soufre

Les molécules contenant du soufre dans les huiles minérales ont en général une structure aromatique. Certains types d'entre elles peuvent agir comme inhibiteurs ou destructeurs de peroxydes au cours du processus d'oxydation, mais elles peuvent aussi provoquer la corrosion du cuivre [7].

iii. Oxygène

Lorsque l'huile minérale est neuve, la teneur en oxygène lié aux hydrocarbures sous forme d'hétéro molécule est faible et ne dépasse pas 0.02% en masse. Pendant le phénomène d'oxydation de l'huile, de l'eau est également produite. Cette dernière joue un rôle destructeur dans l'huile minérale ainsi que dans le papier isolant qu'elle imprègne [7].

d. Caractéristiques de service

Les caractéristiques de service correspondent généralement aux propriétés chimiques ou réactionnelles de l'huile. Les principales caractéristiques de service sont l'aspect, la couleur et les caractéristiques optiques. La teneur en eau est également une caractéristique importante de l'huile minérale. En effet, une huile trouble peut être l'indication d'une saturation en eau. La stabilité chimique et la stabilité électrique sont également des caractéristiques d'utilisation de l'huile d'un transformateur. [7]

i. Aspect, couleur et caractéristiques optiques

L'huile minérale doit être limpide et exempte de matières en suspension ou de dépôts. L'huile minérale a une couleur ambrée. Le changement de couleur peut provenir de l'oxydation, de diverses réactions ou de la mise en solution de pigments de vernis,...etc. Les propriétés optiques présentent un grand intérêt du fait qu'elles peuvent caractériser la constitution d'une huile.

ii. Teneur en eau

La teneur en eau affecte les propriétés électriques d'une huile minérale. L'eau dissoute dans l'huile est initialement à l'état vapeur ; sa teneur dépend de la température et de la pression partielle d'eau de l'atmosphère au dessus de l'huile c'est-à-dire de l'humidité relative extérieure. En effet, l'eau se trouvant dans l'huile d'un transformateur peut être introduite par équilibre physico-chimique avec l'air atmosphérique ou provenir d'une réaction physico-chimique avec l'air atmosphérique ou provenir d'une réaction d'oxydation de l'huile selon le processus suivant [7]:



L'eau peut provenir également d'une réaction de condensation lorsque la pression de vapeur saturante est atteinte dans l'huile. La présence d'eau affecte peu la rigidité diélectrique de l'huile lorsqu'elle n'est pas associée à une autre impureté. En revanche, la présence simultanée d'impuretés fibreuses ou de poussières atmosphériques captant l'eau peut conduire à une réduction considérable de la rigidité diélectrique de l'isolation [7].

iii. Stabilité chimique

La stabilité chimique d'une huile minérale concerne sa stabilité à l'ensemble des processus réactionnels désignés généralement sous le terme générique de vieillissement. Ces processus affectent la durée de vie de l'huile. L'oxydation d'une huile minérale se traduit par un accroissement de l'indice d'acidité total. Cet indice exprime le nombre de milligrammes d'hydroxyde de potassium (KOH) nécessaires pour neutraliser l'huile et il englobe l'acidité soluble et l'acidité volatile. Elle a pour effet de faire virer la couleur du jaune de l'huile minérale en une couleur beaucoup plus foncée. A partir d'une certaine valeur de cet indice, il y a formation de dépôts insolubles ou boues d'oxydation qui se déposent sur les isolants solides que l'huile imprègne. L'acidité volatile en fonction du temps, représentant la courbe d'oxydation d'une huile, peut commencer par une pente faible pendant plusieurs heures puis s'accroître très rapidement. La durée, en heures, au bout de laquelle se produit la variation de pente est appelée période d'induction. Cette dernière est également définie comme étant le temps au bout duquel l'acidité volatile est de 0.1 mg KOH/g.

iv. Stabilité électrique vis à vis des décharges partielles

Sous l'action d'un champ électrique intense et par l'intermédiaire de décharges partielles dans des occlusions gazeuses, l'huile minérale se décompose en donnant des gaz. La majeure partie des gaz formés est constituée d'hydrogène et d'hydrocarbures saturés (méthane, éthane et propane) [7]. La stabilité électrique des liquides correspond à leur capacité plus ou moins affirmée à absorber les gaz pouvant se former à l'interface solide liquide. [7]

v. Point d'éclair et point de feu

Le point d'éclair et le point de feu d'une huile constituent les deux caractéristiques essentielles pouvant déterminer les risques d'incendie et d'explosion d'un matériel électrique. En effet quand l'huile minérale est portée à haute température, elle peut dégager des vapeurs. Dès que la concentration de ces vapeurs dans l'atmosphère avoisinant l'huile devient suffisante pour former un mélange inflammable, elles peuvent brûler à l'approche d'une flamme. La température correspondant au dégagement de ces vapeurs est appelée point d'éclair de l'huile. Si la température augmente encore, une combustion permanente s'établit en présence d'une flamme. Cette température est appelée point de feu de l'huile. La différence de température entre le point d'éclair et le point de feu est de l'ordre de 10°C. [7]

5. Les additifs

Les huiles contiennent des additifs, destinés à améliorer les différents paramètres mentionnés précédemment. Il s'agit principalement :

- des antioxydants, qui servent à retarder la dégradation physico-chimique des huiles.
- des abaisseurs de point d'écoulement, qui les caractérisent à basse température.
- les retardateurs de flamme, qui visent à réduire le risque d'incendie. [4]

6. Humidité

Une huile pour transformateur se doit d'être particulièrement sèche. La présence d'eau fait décroître de manière drastique sa rigidité diélectrique. Le cas échéant une pompe avec mécanisme de filtration peut être utilisée sur l'appareil pour réduire cette valeur. [5]

7. Impureté

L'isolation papier du transformateur se décompose avec le temps dans l'huile. Ces fibres font abaisser la rigidité de l'huile [5].

8. Huile à base de gaz liquéfiés

En 2013, Shell annonce être capable de produire de l'huile synthétique isoparaffinique. L'huile ainsi produite contient très peu de soufre et d'aromatique. Shell prétend que cette huile se dégrade moins vite qu'une huile raffinée tout en conservant les mêmes propriétés de conductivité thermique et de fluidité [5].

9. Autres propriétés

a. Viscosité

La viscosité influe sur le transfert de chaleur, et par conséquent la montée en température de l'appareil. Pour une « température minimale de démarrage en puissance » supérieure à -40 °C, elle ne doit pas être supérieure à 1 800 mm²/s. Le point d'écoulement de l'huile est également mesuré. La faible viscosité de l'huile minérale est un avantage pour la dissipation de la chaleur par rapport aux huiles de silicone ou d'esters. [5]

b. Acidité et stabilité à l'oxydation

Si l'huile pour transformateur n'est pas stable à l'oxydation (action de l'oxygène sur l'huile), des boues et de l'acidité se forment. Les décharges partielles et les forts champs électriques amplifient le phénomène. [5]

c. Coût

L'huile minérale est relativement bon marché. Les transformateurs de puissances en contenant des dizaines de milliers de litres, cela constitue un critère décisif de choix [5].

d. Désignation

Pour référencer les huiles on utilise un code. La première lettre désigne l'inhibition de l'huile, la lettre U sert pour les huiles non inhibée, le T pour celles faiblement inhibées et le I pour celles inhibées.

e. Pollution

Les transformateurs contiennent jusqu'à plus de 100 tonnes d'huile. Les huiles minérales ne sont pas biodégradables, des fuites peuvent donc entraîner des dégâts sur l'environnement en général et la nappe phréatique en particulier [5].

IV. Tests de la qualité de l'huile**1. Tension de claquage**

La mesure de la tension de claquage de l'huile consiste à placer dans l'huile à tester deux électrodes de bronze ou d'acier de forme demi-elliptiques (diamètre 36 mm de largeur et 26 mm sur la profondeur) normalisée à une distance de 2,5 mm l'une de l'autre. Elles doivent être propres et ne pas comporter de cratères dus à de précédentes mesures. La tension est ensuite augmentée à vitesse constante de 2 kV/s jusqu'à l'apparition d'une décharge électrique. La tension atteinte est la tension de claquage. A cause du caractère aléatoire du phénomène provoquant la décharge électrique, la mesure doit être reproduite plusieurs fois (6 selon la norme), en respectant des pauses entre chaque mesures afin de permettre la dissipation des gaz formés lors de la décharge. La dispersion est due aux impuretés dont la présence ne peut être contrôlée. Cet aspect statistique amène à utiliser les transformateurs à des contraintes électriques toujours très inférieures à la rigidité moyenne pour avoir un coefficient de sécurité élevé. L'étude des phénomènes liés à la tension de claquage de l'huile est assez complexe, de nombreux paramètres entrant en jeu. De plus la grande incertitude statistique rend toute conclusion définitive toujours sujette à caution [5].

2. Mesure de l'humidité

Pour mesurer l'humidité présente dans l'huile on utilise habituellement un procédé de titrations Karl-Fisher : La méthode de Karl Fischer est une méthode chimique de mesure de la teneur en eau d'un échantillon par titrage. Elle fut proposée en 1935 par le chimiste

allemand Karl Fischer. Elle est particulièrement adaptée au dosage de l'eau que contient un liquide ou à la détection de traces d'eau, de l'ordre de la ppm (parts per million : eau détectée (en microgrammes) / taille de l'échantillon (en grammes)), dans un échantillon. La procédure est basée sur l'oxydation du dioxyde de soufre par l'iode, à l'origine observée par Robert Bunsen. Outre les méthodes chimiques, des méthodes thermogravimétriques (dessiccation par étuvage, infrarouge, halogène, hyperfréquence) et électriques sont également répandues pour la détermination du taux d'humidité [5]. Sur la figure 7 nous donnons une photographie d'un titrateur Karl-Fischer



Figure 7: Un titrateur Karl Fischer [5]

La présence de d'eau dans les huiles isolantes réduit non seulement l'efficacité de l'huile en tant qu'isolant mais peut être utilisée pour détecter les signes de dégradation dans un isolant solide des transformateurs. Cependant, l'huile se dégrade au fil du temps et sous l'effet de la lumière, et le contenu de l'eau devrait être mesuré à une température proche de celle de l'huile en fonctionnement. Désormais il est reconnu que les imprécisions peuvent apparaître lorsque l'huile est envoyée dans un laboratoire ou dans un atelier pour pannes et les analyses du contenu de l'eau. Les tests réduisant le danger de retarder la mise en service de l'équipement avec l'huile adéquate au lieu d'attendre les résultats du laboratoire. [11]

3. Normes applicables

Toutes les mesures ainsi que les différents essais à réaliser sur les huiles isolantes doivent se faire en conformité avec des normes qui peuvent être à pertinence nationale ou internationale. Parmi ces standards nous pouvons citer : Celles qui émanent de la commission internationale électrotechnique CEI :

- CEI 60296, Fluides pour applications électrotechniques - Huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillages de connexion, version 2003

- CEI 60156, Détermination de la tension de claquage à fréquence industrielle - Méthode d'essai, version 1995

ou celles publiées par l'American Society for Testing and Materials (ASTM):

- ASTM D3487, Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus, version 2009

- ASTM D5222, Standard Specification for High Fire-point Mineral Electrical Insulating Oils, version 2008

- ASTM D2225, Standard Test Methods for Silicone Fluids Used for Electrical Insulation, version 2004

4. Mesure de l'acidité

Pour apprécier le niveau d'oxydation de l'huile, on s'intéresse à son acidité par la mesure son pH. Pour cela la méthode traditionnelle utilisée consiste à mesurer la quantité de potasse (KOH) à ajouter à une quantité d'huile pour parvenir à sa neutralisation. Une méthode plus récente, basée sur un titrage potentiométrique est également utilisée [5].

5. Tableau récapitulatif

Nous avons rassemblé ci-dessous les principales qualités recherchées pour une huile de transformateurs. La satisfaction de certaines de ces exigences par les différents matériaux est explicitée dans le tableau récapitulatif T1.

6. Autres

On peut mesurer le facteur de pertes diélectriques $\tan\delta$ grâce à un montage en pont, le système le plus utilisé consiste en le pont de Shering. Il est à noter que l'analyse des gaz dissous ne nous renseigne pas sur l'état de l'huile mais plutôt sur l'état général du transformateur. [5]

Propriété recherchée	Huile minérale	Ester naturel	Ester synthétique	Silicone
Haute résistance diélectrique	Oui	Oui	Oui	Oui
Faible viscosité	Oui	Non	Non	Non
Point d'écoulement à basse température	Oui	Non	Oui	Oui
Faible oxydation	Oui	Non	Oui	Oui
Possibilité de re raffinage	Oui	Non	Non	Non
Risque d'incendie faible	Non	Oui	Oui	Oui
Stabilité à l'hydrolyse	Oui	Non	Oui	Oui
Solubilité dans l'eau	Non	Oui	Oui	Non
Biodégradable en faible quantité	Non	Oui	Oui	Non
Prix	Bas	moyen	Elevé	Elevé

Tableau 1: Tableau récapitulatif concernant certaines propriétés des huiles [5]

V. Vieillessement des huiles

Le vieillissement des huiles est un sujet très compliqué mais aussi très important. Nous nous proposons d'aborder ici la question dans sa généralité.

1. Etude bibliographique

Les isolants liquides, dans les conditions de leur utilisation, sont soumis à différentes contraintes (thermique, électrique, chimique) qui vont modifier leurs propriétés en fonction du temps. Les mécanismes de vieillissement ainsi mis en jeu sont non seulement complexes mais, de plus, souvent difficile à prédire par le manque d'informations sur la composition chimique précise des liquides utilisés. Dans l'huile minérale, il a été montré que le vieillissement constaté dans les appareils est essentiellement produit par un mécanisme d'oxydation accéléré par la présence de métaux (cuivre, fer). Dans le cas des huiles végétales, du fait de leur structure chimique, un mécanisme supplémentaire de vieillissement doit être pris en compte, il s'agit du phénomène d'hydrolyse. Le vieillissement fera ainsi intervenir des processus d'oxydation et d'hydrolyse dont les influences respectives dépendront des conditions de fonctionnement (teneur en eau, température, etc.) [12].

2. Oxydation

a. Oxydation de l'huile minérale

Une huile minérale étant composée de milliers de molécules différentes, les mécanismes d'oxydation sont décrits de façon globale sans entrer dans le détail des réactions possibles de nombreuses études ont été publiées sur l'oxydation des huiles minérales en fonction de leur origine (paraffinique, naphénique, aromatique, etc...). L'oxydation des huiles minérales est un processus chimique progressif durant lequel des molécules d'hydrocarbures sont attaquées par l'oxygène pour former divers produits oxygénés comme des hydro peroxydes, des alcools et des acides organiques. L'oxydation est initiée par la formation d'hydro peroxydes et de peroxydes qui réagissent ensuite pour produire des alcools, des cétones, des aldéhydes puis des acides. La vitesse de réaction de ces processus oxydatifs est augmentée en présence de catalyseurs métalliques tels que le cuivre et le fer. Le processus d'oxydation peut être divisé en trois phases : introduction, accélération et saturation comme le montre la Figure 8.

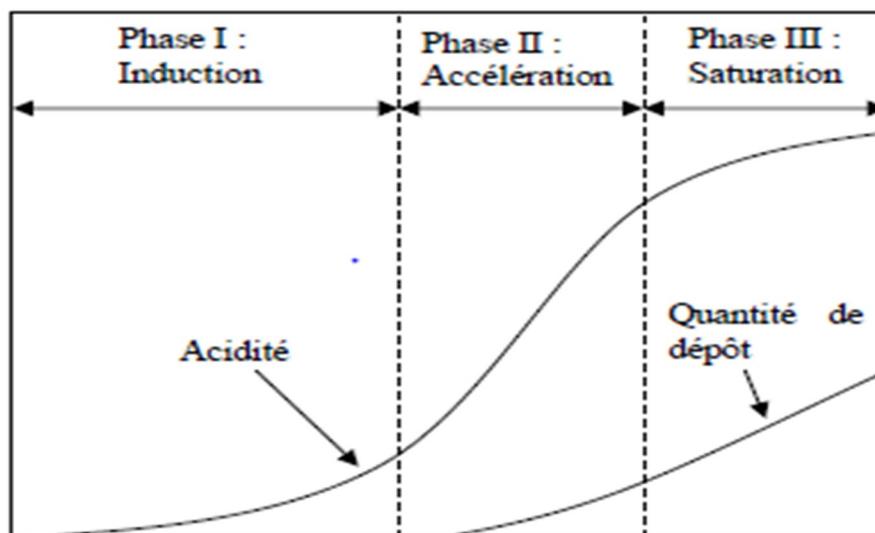


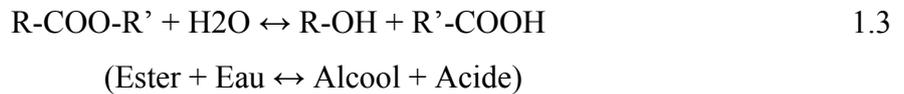
Figure 8: Différentes phases de vieillissement d'une huile minérale et variation de l'acidité et de la quantité de dépôt [12]

b. Oxydation des esters naturels

Les esters naturels s'oxydent de la même façon en formant la succession de produits : alcools, cétones, aldéhydes et enfin acides carboxyliques. En règle générale, les sous-produits de l'oxydation des esters naturels ne forment pas de dépôts ou de boues comme dans l'huile minérale [12]. Notons que l'influence de l'oxydation sur les propriétés diélectriques des huiles végétales a été peu étudiée. [12]

3. Hydrolyse

La fonction ester (-COOC-) est formée par la réaction de condensation d'un alcool et d'un acide dont la réaction inverse est l'hydrolyse. Ainsi, l'hydrolyse reforme l'alcool et l'acide de départ suivant la réaction chimique :



Notons que les esters naturels (i.e. des huiles végétales) sont des esters neutres du glycérol et d'acides gras supérieurs saturés et non saturés comportant de 16 à 22 atomes de carbone. Salomon [12] a montré que l'acidité d'un acide carboxylique est tributaire de sa structure moléculaire. L'acide carboxylique avec une longue chaîne a tendance à être moins agressif qu'un acide à courte chaîne carboxylique. [12]

4. Influence du vieillissement sur les propriétés des isolants liquides

La plupart des études sur le vieillissement des huiles isolantes à base d'esters ont été effectuées sur des produits commerciaux contenant une grande quantité d'antioxydants. Martin [12] a réalisé une étude comparative de l'influence du vieillissement sur les propriétés chimiques et diélectriques d'isolants liquides commerciaux basés soit sur des huiles végétales (huile FR3 de Cooper) soit sur des esters de synthèse à base de penta érythrytol (Midel 7131). Ces liquides ont été vieillis à 150°C en contact avec l'air et en présence ou non de catalyseurs métalliques. Bien que l'acidité initiale de l'huile minérale soit bien plus faible, après 14 jours de test, l'huile minérale et l'huile FR3 présentent de même niveau d'acidité comme montré par la figure 9.

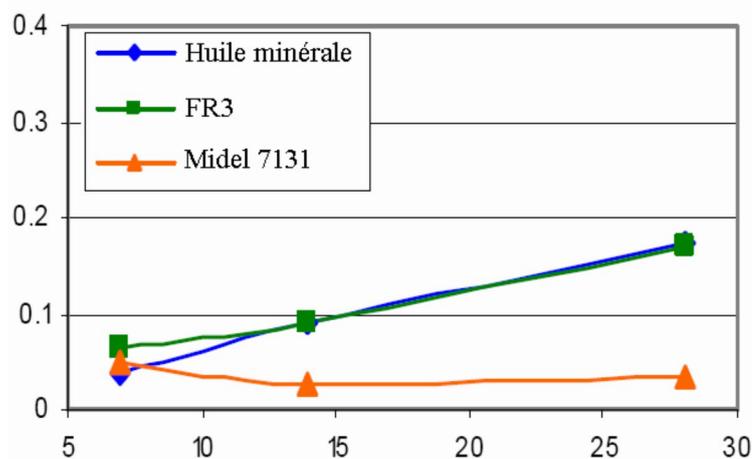


Figure 9: Acidité des huiles en fonction du temps de vieillissement.

Test sans catalyseur [12]

Dans des conditions de vieillissement similaires, Borsi et al. ont montré qu'il n'y avait pas de réduction significative de la rigidité diélectrique de l'huile végétale, alors que le facteur de dissipation diélectrique avait augmenté d'un facteur d'environ 100 [12].

Notons que dans ces mesures de la tension de claquage, la teneur en particules n'était pas contrôlée. Des divers tests de vieillissement des esters naturels ou synthétiques publiés, il ressort que les acides gras à longues chaînes créés par hydrolyse sont «doux et non-corrosif par rapport aux acides à courte chaîne trouvés dans de l'huile minérale» [12]. Ce fait peut être intéressant pour leur application dans des dispositifs électrotechniques [12].

VI. Conclusion

Il ressort de ce premier chapitre que le choix d'un liquide, destiné à l'isolation électrique n'est pas basé sur ses seules propriétés électriques, mais dépend aussi de sa tenue au vieillissement, de sa capacité à évacuer la chaleur et de sa sécurité d'emploi. L'importance croissante des questions en faveur du développement durable implique la prise en compte de critères environnementaux dans le développement de tout nouveau matériau ou matériel. Dans le cas des liquides diélectriques, un meilleur équilibre doit être trouvé entre des performances techniques à l'intérieur des appareils remplis et les conséquences sur l'environnement de fuites toujours possibles.

I. Introduction

Les tests diélectriques sont mis en œuvre dans l'industrie pour le contrôle de produits, appareils ou équipements d'une très grande diversité. Ils ont pour but soit l'étude des propriétés de tenue aux tensions élevées et d'isolement de matériaux isolants, soit la vérification de la conformité aux normes de sécurité des composants ou équipements électromécaniques et électroniques. En milieu industriel et dans une moindre mesure en laboratoire, il est parfois difficile d'interpréter les résultats et principalement lorsque ceux-ci sont en dehors des limites souhaitées ou incohérents et conduisent à un refus du produit testé par un service vérificateur. Lorsque le défaut n'est pas répétitif ou que les résultats sont très proches des valeurs limites au toisées cela entraîne généralement des litiges. Les tests diélectriques représentés par les essais de rigidité et les mesures de résistance d'isolement nécessitent un mode opératoire et des conditions parfaitement définies pour être valables, répétitives et non contestables. En milieu industriel, ses conditions de test sont souvent négligées et les phénomènes qui s'y rattachent mal connus ou interprétés. On a pour but d'étudier les différents facteurs qui influencent sur les essais de rigidité diélectrique agissant d'une façon non négligeable sur les résultats de ces essais. Avant d'entamer l'étude de ses facteurs, on doit noter que ses essais doivent respecter certaines normes [3].

La CEI (commission Electrotechnique Internationale), The IEC (International Electrotechnique Commission), est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux. La CEI a pour but de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique, à cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des **normes** internationales. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation(ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisation. [6]

1. Facteur d'influence sur les tests diélectriques

On appelle facteurs d'influence sur les essais de rigidité et d'isolement, tous les éléments qui peuvent modifier ces propriétés.

On peut citer parmi ses facteurs :

- les facteurs physique : température, humidité, contrainte mécaniques...etc.
- les facteurs électriques : tension, courant continu (polarité), courant alternatif (fréquence)...

- les facteurs chimiques : impuretés, oxydation....etc.

Il est important de noter qu'en pratique ses facteurs n'agissent jamais seuls (sauf en laboratoire au cours d'expériences spécialement mises en œuvre pour étudier un facteur particulier, bien souvent, ils interagissent en modifiant les lois qui caractérisent et rendent ainsi plus complexes leurs analyses. [3]

2. Facteurs déterminants en tests diélectriques

Dans la pratique industrielle classique, il existe 3 facteurs très importants pour l'interprétation des tests :

a. La température

La température est un élément non négligeable dans les conditions d'essais de rigidité diélectrique et de mesure d'isolement.

b. La pression

Si la pression est un facteur déterminant dans le cas des diélectriques gazeux, dans le cas des diélectriques solides son influence est quasi insignifiante. Dans le cas de diélectriques liquides l'influence demeure faible mais on peut considérer le cas de la pression atmosphérique ainsi que les cas des très hautes ou très basses pressions.

c. L'hygrométrie

L'hygrométrie est facteur important pouvant influencer fortement les résultats de tests diélectriques, son impact est souvent très difficile à cerner [3].

3. Les essais de rigidité diélectrique

Il faut distinguer les essais effectués afin de déterminer la tension de rupture (claquage) d'un milieu isolant, des essais normatifs (standard) qui sont utilisés pour détecter d'éventuels défauts sur un produit. Au cours des essais normatifs les isolants sont soumis à des tensions généralement très en dessous de leurs limites de rupture. le rapport entre les deux tensions représente en quelque sorte le coefficient de sécurité demandé pour la conception du matériel. Il existe plusieurs types d'essais de rigidité diélectrique, ils se distinguent principalement par la nature des tensions d'épreuves et des conditions d'applications (durée, vitesse, forme de l'onde). [3]

4. Facteurs d'influence-généralités

Pour comprendre les rôles respectifs de la température, de la pression et de l'hygrométrie sur la tenue en tension des isolants il est nécessaire de faire un rapport sur le mécanisme du claquage diélectrique [3].

a. La rupture diélectrique

Un claquage n'est jamais la conséquence du champ électrique appliqué au milieu isolant (contrairement à l'extraction des électrons par exemple). Ce phénomène est dû à l'accumulation d'énergie (thermique, cinétique, élastique) que le matériau ne peut composer. L'étude de la rupture diélectrique étant très complexe puisqu'elle fait appel à des lois fondamentales sur la matière, on distingue généralement le claquage électrique et le claquage thermique tout en notant que la distinction n'est pas forcément évidente car un claquage électrique conduit toujours à une destruction locale du matériau par fusion thermique et inversement un claquage thermique est principalement la conséquence d'un phénomène d'injection et/ou de conduction de nature électrique. [3]

b. Le claquage électrique

Une condition nécessaire mais non suffisante pour obtenir ce type de claquage réside dans la présence dans la matière isolante d'électrons libres pouvant être accélérés pour atteindre l'énergie d'ionisation (5 à 10 eV) des atomes et donner lieu à des avalanches électroniques ayant pour effet de multiplier le nombre de porteurs de charge [3].

c. Le critère de claquage par avalanche

Pour produire une avalanche il faut qu'un nombre suffisant d'électrons soit produit. Chaque ionisation produit 2 électrons une avalanche de m^{eme} génération donne 2^m électrons. L'allemand F. SEITZ a montré que la destruction du matériau par avalanche électronique nécessite 40 générations soit 2^{40} électrons. Pour un champ supérieur au seuil, une collision-ionisation est précédée de $n(E)$ collisions avec les phonons.

Si on appelle $\lambda = w / eE$ la distance moyenne parcourue par l'électron dans la direction du champ, entre 2 interactions avec des phonons, le critère partant de 40 générations donne la relation :

$$L = 40[\lambda + n(E)\lambda] \quad 2.1$$

Avec λ : distance moyenne pour acquérir l'énergie ionisante.

L: épaisseur de l'échantillon.

Où

$$L = 40 I + n(E)w / eE \quad 2.2$$

Dans cette seconde expression E, I, n, et e représentent respectivement :
le champ électrique appliqué

l'énergie ionisante

le nombre d'ionisations

la charge d'électron

Expérimentalement il a été montré que le champ de rupture diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de l'échantillon que l'on peut utiliser la relation simplifiée suivante :

$$E = 3/\text{Log}(10 L) \quad 2.3$$

Avec E : champ électrique en MV/cm

L : épaisseur de l'échantillon en cm pour $L > 10$ cm

d. Claquage thermique

Un matériau isolant présente toujours une légère conduction, et c'est ainsi que le courant engendré par l'application d'une tension électrique va générer un échauffement par effet Joule. Or, si pour les conducteurs la résistivité augmente avec la température, pour les isolants c'est la tendance inverse qui a lieu. La conductivité augmentera donc avec la température et le phénomène d'échauffement mènera vers un emballement thermique si l'évacuation de la chaleur devenait insuffisante. Dans un cas pareil la destruction du matériau peut être atteinte par un claquage souvent dénommé : claquage thermique [3].

5. Influence du milieu sur la tension de rupture

Il existe 3 états des isolants dans la nature :

a. Cas d'un isolant gazeux

L'isolant gazeux est assez fortement influencé par 3 facteurs que sont la température la pression et le niveau d'hygrométrie. Il y a tout de même une prédominance pour la température et la pression qui en influant sur la densité ont des effets antagonistes, le champ de rupture augmentant avec la pression et diminuant avec la température. L'hygrométrie quant à elle à une influence sur le seuil du claquage et sur la tension d'apparition de la décharge couronne.

b. Cas d'un isolant solide

Ce type d'isolant peut être influencé par les températures qui s'écartent sensiblement de la température ambiante, il l'est beaucoup moins par la pression (sauf pour les hautes

pressions). Concernant l'hygrométrie, celle-ci a un effet variable selon la nature de l'isolant et la durée d'application de ce facteur.

c. Cas de l'isolant liquide

Il est peu perturbé par les variations de la pression atmosphérique mais il peut l'être pour des écarts importants de l'ordre de quelques dizaines de bars, l'influence demeurant minime toutefois. La température quant à elle peut agir sur la viscosité des liquides ce qui peut influencer légèrement sur la tenue diélectrique. Les modifications de la viscosité des liquides ont une influence très variable selon leur nature. Elle peut être de l'ordre de 10% pour une variation de température allant de -20° C à +60°C. [4]

II. Etude bibliographique sur les huiles

L'utilisation d'un nouvel isolant liquide nécessite la connaissance de ses propriétés diélectriques, physiques, chimiques, etc. et leurs évolutions en fonction des conditions d'utilisation. Un isolant liquide contient en général des impuretés (eau, particules, etc.) et il est soumis à divers processus de dégradation (hydrolyse, oxydation, vieillissement thermique, etc.) qui vont altérer ses propriétés initiales. Les propriétés diélectriques sont intrinsèquement associées à sa structure moléculaire et diverses informations peuvent être dérivées à partir des mesures de spectroscopie fréquentielle sur une large gamme de fréquences, ce qui jusqu'à présent jamais été réalisé pour ce type de liquide. [1]

1. Solubilité de l'eau dans les isolants liquides :

La solubilité de l'eau dans un liquide dépend de la structure moléculaire de celui-ci ainsi que de la température. La relation entre le logarithme de la solubilité et l'inverse de la température suit la loi suivante :

$$\log n = \log n_0 + k\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) \quad 2.4$$

Où

n : Solubilité maximale à la température T

n_0 : Solubilité maximale à la température T_0

T : Température absolue

k : Constante

L'eau peut provenir de réactions d'oxydation de l'huile mais temps elle provient souvent de l'environnement humide. En effet, quand l'huile sèche est en contact avec une atmosphère contenant de la vapeur d'eau, elle en absorbe une petite quantité. La quantité d'eau absorbée est déterminée par la température et la pression partielle de la vapeur d'eau

dans l'atmosphère. Dans l'huile minérale, Kaufman et al. [8] ont trouvé que, pour une température donnée, le rapport entre la quantité d'eau absorbée par l'huile et sa solubilité maximale (teneur à saturation) est exactement égal à l'humidité relative (HR) dans l'air. Une conclusion importante de cette étude est que toutes les corrélations significatives entre la teneur en eau et les différentes propriétés diélectriques d'une huile doivent se baser sur la teneur relative en eau (C_r) et non à sa teneur absolue en eau. Cette teneur relative à une température donnée T s'exprime selon la relation

$$C_r(T) = C(T)/C_0(T)$$

Où $C(T)$ étant la concentration en eau à la température T alors que $C_0(T)$ représente la concentration à saturation à la même température T . La Figure 10 montre la relation entre la teneur en eau d'une huile minérale et l'humidité relative de l'air pour différentes températures. La relation linéaire obtenue indique que la solubilité de l'eau dans l'huile suit la loi classique de Henry [7]. Cependant, Fallou et Thibault [8] ont montré que la quantité d'eau dissoute dans l'huile augmente avec le niveau d'oxydation de celle-ci, ceci pour une humidité relative de l'air donnée. Les produits formés par oxydation dans l'huile sont hydrophiles [1]

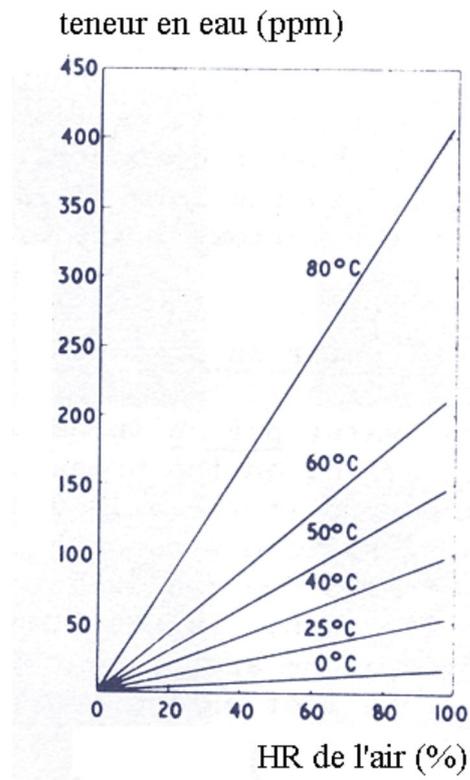


Figure 10: Teneur en eau dans l'huile minérale en fonction de l'humidité relative de l'air à différentes températures [1]

Suivant les conditions (huile non saturée en eau ou sursaturée), l'eau sera présente dans l'huile sous des formes différentes :

- dissoute (solution homogène non saturée en eau) ;
- émulsion fine (en sursaturation, l'eau se disperse sous forme de fines gouttelettes) ;
- et, enfin, émulsion grossière (l'eau en forte concentration se concentre sous forme de grosses gouttelettes).

Au-dessous de la limite de saturation, l'eau dissoute est soit libre c'est-à-dire sans interaction avec les molécules d'huile, soit liée, dans ce cas une liaison se forme (liaison hydrogène par exemple) entre la molécule d'eau et des molécules polaires de l'huile et/ou d'impuretés. L'eau libre est plus facilement éliminée par chauffage sous vide que celle liée. Quand la teneur en eau dans l'huile dépasse la limite de saturation, la quantité excédentaire d'eau produit une émulsion de fines gouttelettes dispersées dans l'huile. La taille des gouttelettes augmente avec la quantité d'eau excédentaire, par exemple, elle varie de 0,1 à 10 μ m dans l'huile minérale.

L'énergie inter faciale maintient ces gouttelettes en suspension dans l'huile tant que leur masse ne dépasse pas un certain seuil. Pour des concentrations plus élevées d'eau dans l'huile, la taille des gouttelettes devient suffisamment importante pour qu'elles tombent par gravité au fond du réservoir (décantation) [1].

a. Rigidité diélectrique : influence de la teneur en eau et des particules

Dans la pratique industrielle, des normes ont été élaborées afin de mesurer la rigidité diélectrique des isolants liquides soit en tension alternative soit sous tension de type choc de foudre. La norme CEI 60156, pour la mesure sous tension alternative, stipule que le liquide doit être soumis à un champ électrique quasi-uniforme avec une vitesse d'augmentation de la tension et une distance entre les électrodes fixées.

Dans de telles conditions, l'influence de la teneur en eau et des particules sur la rigidité diélectrique d'un liquide est très importante [1]. Dans l'huile minérale, sèche et bien filtrée, la tension de claquage garde une valeur relativement constante tant que sa teneur relative en eau est inférieure à 70% (Fig. II.2), puis elle s'abaisse rapidement pour des valeurs plus élevées de C_r . Pour $C_r > 1$, cet abaissement important de la tension de claquage est expliqué par l'action du champ électrique sur les gouttelettes d'eau qui vont s'allonger dans la direction du champ et ainsi former une « électrode » en forme de pointe qui renforce le champ. En présence d'une quantité d'eau importante, un « pont » d'eau connectant les deux électrodes peut même se former. Par contre, pour $0,7 < C_r < 1$, aucune explication simple ne

peut être avancée pour rendre compte de l'abaissement observé de la tension de claquage. La présence de particules hygroscopiques comme la cellulose conduit à une dégradation encore plus importante de la tension de claquage en présence d'eau (Figure 11). Dans ce cas, comme les particules de cellulose absorbent l'eau de l'huile, leur conductivité devient importante et elles se comportent comme des particules conductrices (de type métallique) qui abaissent fortement la tension de claquage [1].

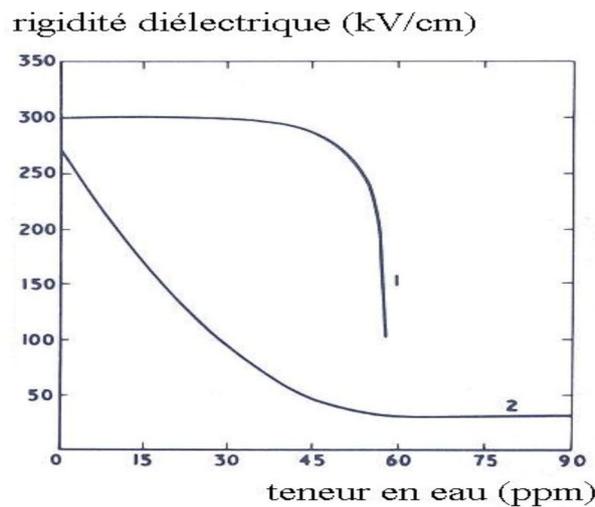


Figure 11: Rigidité diélectrique de l'huile minérale en fonction de la teneur en eau.
1) sans cellulose ; 2) avec cellulose [1]

Les particules de cellulose dans l'huile minérale ne conduisent pas à la formation d'un «pont» entre les électrodes si la cellulose et l'huile ont été séchées. Par contre, en présence d'eau, la création d'un pont est souvent observée ce qui favorise le claquage à des tensions plus faibles. Récemment, les études ont été élargies à de nouveaux liquides comme les huiles végétales. Cependant, dans ces travaux l'influence des particules n'a pas été rigoureusement contrôlée, conduisant à une dispersion des résultats et à des comparaisons erronées entre les liquides. [1]

b. Facteurs influant sur les pertes diélectriques

Les pertes diélectriques représentées par $\tan \delta$ sont sensibles à la température et à la fréquence. La mesure de ces pertes au pont de Shering à la fréquence industrielles se font à différentes températures, en générale 80, 90 et 120°C. En effet la température agit sur la permittivité mais surtout sur la conductivité.

i. Influence de la température

La dissociation d'un composé dans un liquide peut s'écrire formellement sous la forme d'un simple équilibre $AB = A^+ + B^-$, la conductivité du liquide est alors exprimée par la relation :

$$\sigma = e (\mu^+ N^+ + \mu^- N^-)$$

où μ^+ et μ^- sont les mobilités des porteurs positifs et négatifs respectivement et N^+ et N^- leurs concentrations. L'équilibre dissociation-recombinaison dépend de la température et du champ électrique, ainsi que de la permittivité du liquide.

En effet, les concentrations en porteurs ainsi que leurs mobilités augmentent avec la température. Mais une température élevée va également accroître la teneur en composés dissous N_{AB} . La conductivité et, par conséquent, les pertes par effet Joule seront augmentées par la température. La figure 12 montre comment la température influe sur les pertes pour différentes fréquences. Cette figure fait apparaître la partie réelle mais aussi le facteur de dissipation. Sur la figure 13 nous avons des données similaires pour des fréquences plus basses.

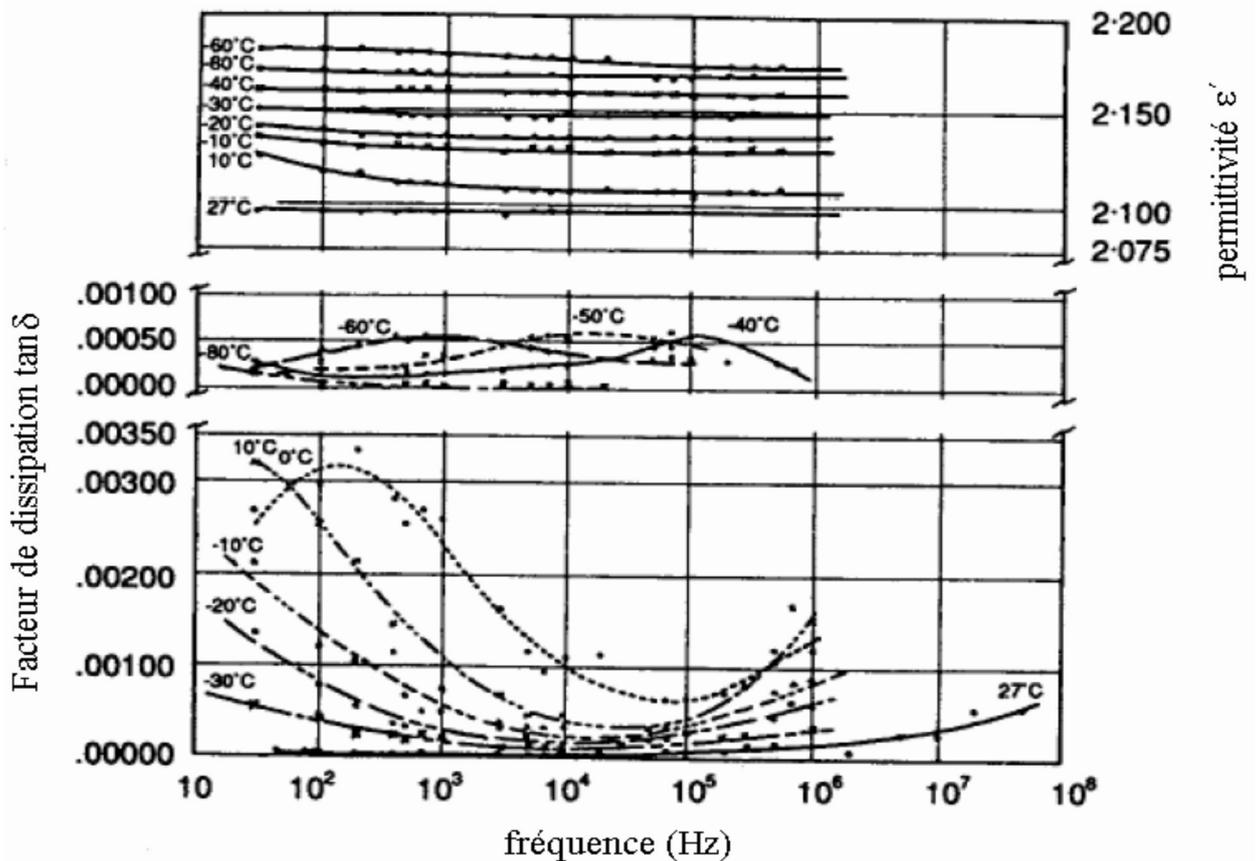


Figure 12: Facteur de dissipation et de la permittivité d'une huile minérale pour des fréquences élevées [1]

Comme la conductivité d'un liquide augmente avec la température, la plupart des spécifications des produits indiquent une valeur de résistivité ou de $\tan \delta$ à 90 °C. D'autre part, la conductivité évolue en fonction du temps de service dans un appareillage si bien que la

conductivité d'un produit neuf est en général beaucoup plus faible que celle d'un produit en service, puisque celui-ci récupère des impuretés au contact des matériaux solides contenus dans l'équipement.

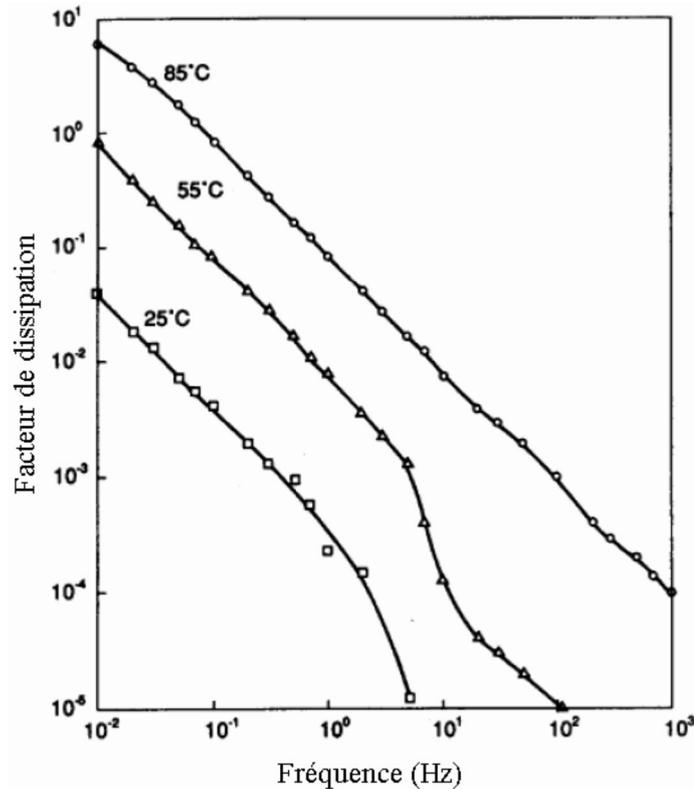


Figure 13: Influence de la température sur les pertes dans l'huile minérale pour les basses fréquences. [1]

Ainsi, si une huile minérale neuve a fréquemment une valeur de $\tan\delta$ (90°C) $< 10^{-4}$, une huile dans un transformateur peut atteindre une valeur de $\tan\delta$ (90°C) > 1 . [8]

ii. Influence de la teneur en eau

La présence d'eau n'affecte pas la $\tan\delta$ d'un liquide si sa concentration est inférieure au seuil de saturation. Par contre, en présence d'une phase aqueuse non soluble, la conductivité d'un liquide augmente fortement par suite du mouvement des gouttes d'eau sous l'effet du champ électrique [1].

2. Mesure de la tension de claquage en tension alternative

La tension de claquage doit être mesurée dans des conditions spécifiées par des normes [3]. Il existe, de par le monde, différents laboratoires procédant à ce genre de test. Les électrodes sont constituées de deux sphères de diamètre avoisinant 1cm, séparées par une distance de l'ordre de 1mm, ce qui permet de considérer le champ assez uniforme là où il est

le plus intense. Les électrodes sont immergées dans une cellule contenant 80 cm³ d'huile. Une tension alternative 50Hz en rampe de 2kV/s est appliquée jusqu'au claquage. La valeur crête de la tension claquage est mémorisée. Le résultat final de la tension de claquage, exprimée en valeur efficace, est une moyenne d'un nombre de claquages, généralement 6, pour un remplissage donné. Pour séparer l'influence de la teneur en eau et celle des particules sur la tension de claquage, la cellule de test doit être munie d'un circuit de filtration en boucle fermée.

3. Mesure des propriétés diélectriques

Le facteur de pertes diélectriques est la tangente de l'angle de pertes δ . On calcule le facteur de pertes en faisant le rapport entre la partie réelle et la partie imaginaire de l'impédance équivalente d'un diélectrique [8].

a. Principe de mesure

Le principe de la spectroscopie d'impédance [8] se pose sur l'application d'une tension sinusoïdale et sur l'analyse de l'amplitude et du déphasage de la réponse en courant du matériau comme indiqué sur la figure 14.

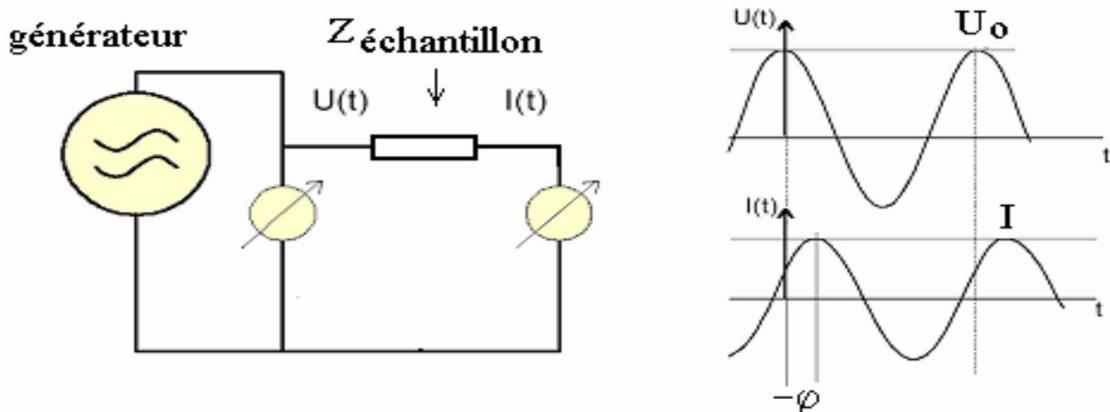


Figure 14: Principe de mesure de la spectroscopie diélectrique [3]

Le rapport des amplitudes tension/courant définit le module de l'impédance série $|Z_s|$; le déphasage entre la tension et le courant complète l'information pour donner accès aux parties réelle et imaginaire de l'impédance complexe Z_s [3].

On a alors l'expression suivante :

$$Z^*(\omega) = \frac{*(\)}{*(\)} = \frac{(\)}{(\)} \cos \varphi(\omega) + i \sin \varphi(\omega) = Z'(\omega) + iZ''(\omega) \quad 2.5$$

L'échantillon peut également être considérée comme une capacité complexe C_p^* [3] par la relation suivante :

$$Z^*(\omega) = - \frac{1}{j\omega C_p^*} \quad 2.6$$

$\epsilon^*(\omega)$ et $\tan \delta$ sont déterminées par :

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega) = - \frac{1}{j\omega C_p^*} = - \frac{1}{j\omega C_0 \epsilon^*(\omega)} \quad 2.7$$

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)} = - \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)} \quad 2.8$$

Où C_0 est la capacité à vide de la cellule de mesure. 2.9

b. Calcule du facteur de pertes diélectrique

Le facteur de pertes diélectriques se déduit de la permittivité complexe et s'exprime par :

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad 2.10$$

c. Schéma équivalent série d'un isolant

Dans le cas du schéma équivalent série, l'impédance équivalente, vaut [8] :

$$Z = R + 1/j\omega C \quad 2.11$$

en tenant compte de la définition du facteur de pertes diélectriques, il vient :

$$\tan \delta = \omega R C \quad 2.12$$

d. Schéma équivalent parallèle d'un isolant

Dans le cas du schéma équivalent parallèle, l'impédance équivalente vaut : [8]

$$Z = \frac{1}{1/R + j\omega C} \quad 2.13$$

En tenant compte de la définition du facteur de pertes électriques, il vient :

$$\tan \delta = \frac{\quad}{\omega} \quad 2.14$$

4. Le pont de Schering

Le pont de Schering permet la mesure de la capacité et du facteur de pertes d'isolation (condensateurs, câbles, isolateurs, bornes de traversées, isolants, etc.) en haute tension alternative. [8]

5. Schéma du pont de Schering

Le pont de Schering est basé sur le principe du pont de Wheatstone, il est représenté sur la figure 15

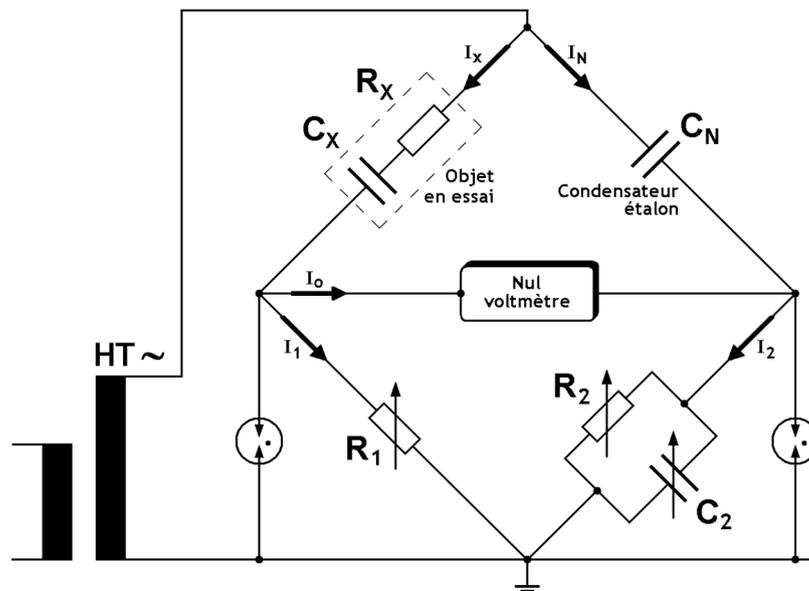


Figure 15: Schéma du pont de Schering [6]

Le condensateur étalon CN doit être pratiquement parfait. Pour cette raison, on utilise généralement un condensateur à gaz :

- la valeur de la capacité peut être ajustée très précisément par l'intermédiaire de la pression du gaz ;
- le gaz a une très faible conductivité.

La capacité C_2 ne doit pas nécessairement être parfaite, car sa conductivité est de toute manière négligeable vis-à-vis de celle de R_2 .

Le condensateur sous test est modélisé par une capacité idéale C_x en série avec une résistance R_x . Une fois l'équilibre du pont atteint, le facteur de pertes s'exprime par :

$$\tan\delta = \omega R C \quad 2.16$$

III. Appareils pour la mesure de la rigidité diélectrique des huiles

Nous donnons ci-dessous quelques informations concernant des appareils disponibles sur le marché

1. Les spintermètres de laboratoire de Megger

a. Description

Les testeurs de laboratoire automatiques de Megger permettent d'effectuer des essais précis sur la tension de claquage des liquides isolants minéraux, à base d'éther et de silicone. Les cuves d'essai moulées produisent des résultats répétables grâce aux réglages par verrouillage de l'espace entre les électrodes. Le couvercle transparent protège la chambre d'essai, sa grandeur fournissant une bonne accessibilité à la cuve d'essai. Le fournisseur propose trois modèles de laboratoire, tous équipés d'un système automatisé avec des normes préprogrammées

b. Spintermètre de laboratoires 60, 80 ou 100 kV

C'est un appareil de laboratoire destinés à mesurer la rigidité diélectrique des huiles isolantes, avec différents niveaux de tension il est composé : [11]

D'une cuve d'essai avec réglage de précision des électrodes, d'un écran visible de l'extérieur. Cet appareil adapté aux huiles minérales à base d'éther et de silicone est également muni d'un circuit de détection des erreurs avec mesure directe de la tension et du courant. Un système ultra rapide de la tension permet l'interruption dès claquage ($<10 \mu s$). L'appareil comporte aussi des programmes pouvant aider à choisir la norme que l'on souhaite.

VII. Conclusion

Le but des tests diélectriques est de vérifier le niveau d'isolement assigné d'un appareil électrique. Si le champ électrique dépasse la tenue diélectrique de l'appareil, un claquage (ou décharge disruptive) se produit et l'appareil peut voir ses propriétés physiques modifiées de façon réversible ou irréversible. Dans le cas d'appareils à haute tension, la tenue

diélectrique doit se régénérer après tout claquage éventuel dû à une surtension excessive, de façon à assurer la continuité de service après l'élimination du défaut.

Différents essais diélectriques existent se différenciant principalement par la fréquence de la tension assignée à l'appareil électrique. Celui-ci doit démontrer sa capacité à résister à toutes les conditions pouvant apparaître lors de son fonctionnement : surtension permanente, transitoire, foudre..., sous la pluie ou dans le cas de pollution. Pour réaliser ces essais, différents types de générateurs électriques de haute tension sont utilisés selon la forme de la tension souhaitée. Par ailleurs, la mesure de la tension produite nécessite des appareils spécifiques et des tests normalisés que l'on doit respecter.

I. Introduction

La tension de claquage des isolants liquides, telle qu'elle est généralement appliquée, n'est pas une propriété fondamentale du matériau, mais une procédure d'essai empirique destinée à révéler la présence de produits contaminants comme l'eau ou des matières solides en suspension et de filtration [14]. La valeur de la tension de claquage des isolants liquides dépend beaucoup de l'ensemble des conditions particulières employées dans sa détermination. En conséquence, des modes opératoires et un équipement normalisés sont essentiels pour interpréter sans ambiguïté les résultats d'essai [14]. Afin de remédier à cela, l'étude de la tension de claquage constitue une source d'informations appréciable et permet d'éviter les tests destructifs généralement coûteux [13].

1. Le dispositif expérimental

Dans le cadre du présent mémoire nous avons réalisé une cellule d'essai pour huile transformateur. Les caractéristiques du système réalisé sont les suivantes :

- une cuve confectionnée à partir d'une enceinte en verre que nous avons percée afin de faire passer les conducteurs porte électrodes. La cellule peut contenir 300 ml d'huile. Le choix d'une enceinte en verre, bien que présentant l'inconvénient de la fragilité, a été fait pour éviter toute réaction avec l'huile mais surtout pour rendre les phénomènes observables.
- deux électrodes métalliques en acier de forme sphérique. Ces électrodes ont un diamètre de 19 mm et nous avons aménagé un filetage de diamètre 5 mm.

La distance inter électrodes est ajustée à une valeur de 2.5 mm de façon à rester dans les proportions fixées par les normes. Les essais de claquage que nous avons effectués ont été réalisés avec une huile de transformateur provenant de l'entreprise Electro-Industries. Cette huile isolante est de type BORAK 22. Les essais ont été réalisés en tension continue avec une source de tension pouvant délivrer 10 mA sous 60 kV. Sur les figures 16 et 17 nous donnons des photographies de notre cellule ainsi qu'une vue d'ensemble du dispositif entourant celle-ci. Nous voyons sur la seconde figure la sonde de mesure de la tension (rapport 1000) ainsi que le voltmètre donnant accès à la valeur du courant de conduction par le biais d'une résistance de 10 k Ω



Figure 16 : Vue de la cellule expérimentale réalisée (avec l'échantillon d'huile BORAK 22)



Figure 17: Vue de l'ensemble du système expérimental (la source de tension n'apparaît pas mais la sonde est visible)

2. Résultats expérimentaux avec le dispositif mis au point

Les essais réalisés avec le dispositif ainsi confectionné permettent de connaître la valeur de la tension de claquage d'une huile disponible au laboratoire. De tels essais ne peuvent aucunement être considérés comme des tests conformes aux normes, mais nous avons essayé de nous en approcher au mieux. Nos essais ont été réalisés avec deux types d'échantillons d'huile. Une huile ayant séjourné très longtemps au contact de papier presspahn, huile restant d'une expérience d'imprégnation faite il ya plusieurs mois au laboratoire. Cette huile peut donc être considérée comme contaminée. L'autre qualité d'huile testée est une huile n'ayant eu aucun contact avec de la cellulose et conservée à l'abri de l'air. Cette huile peut être dans un premier temps considérée comme une huile indemne mais toutefois moins performante que celle traitée en usine avant emploi.

a. Résultats avec l'huile contaminée

i. Tension de claquage

Avec ce type d'huile nous avons relevé une tension de claquage de l'ordre de 12 kV pour les premiers essais. Après une série de claquages la rigidité semble s'améliorer et l'huile tient à des tensions de l'ordre de 30 kV. Ce comportement peut être imputé à un conditionnement autant du liquide que des électrodes. Ce qui apparaît aussi de façon claire, c'est le caractère aléatoire du claquage au-delà d'un certain seuil. Ce phénomène rend très difficile les expériences dès lors que tout claquage intempestif met l'appareillage en danger.

ii. Courant de conduction

Dans le souci de mettre en évidence le phénomène de conduction nous avons mesuré le courant traversant l'huile soumise à essais. Cette mesure a été effectuée par mesure de la chute de potentiel au borne d'une résistance non inductive. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 18. Sur cette figure nous remarquons une linéarité quasi parfaite ce qui tend à montrer le comportement ohmique de l'huile. Toutefois la non connaissance complète du champ électrique nous empêche d'accéder à la résistivité.

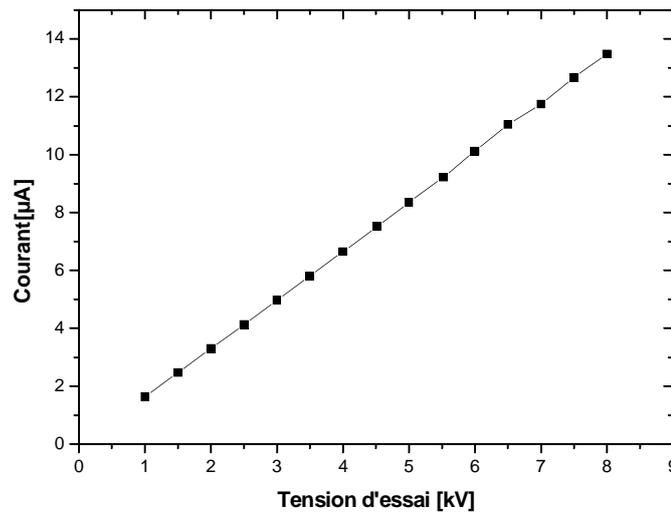
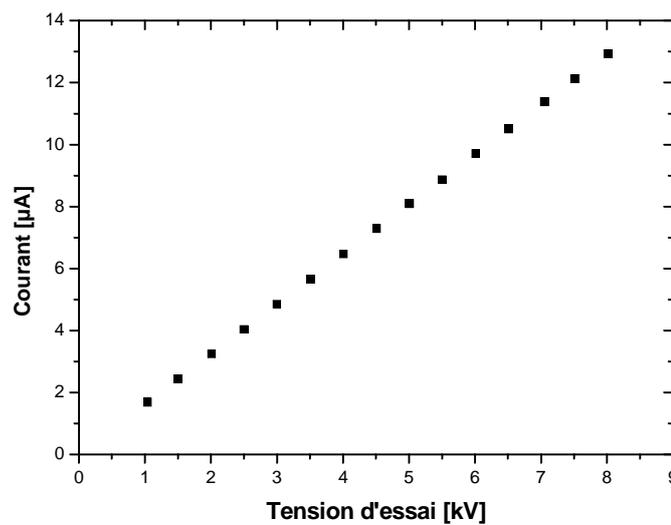
b. Résultats avec l'huile indemne

i. Tension de claquage

La tension de claquage de cette huile est beaucoup plus élevée que celle de l'huile contaminée

ii. Courant de conduction

Les courants de conduction obtenus avec l'huile indemne sont du même ordre de grandeur que ceux mesurés avec l'huile contaminée, cependant les courants sont légèrement plus élevés avec l'huile contaminée. Nous donnons sur la figure 19 l'allure du courant pour l'huile indemne et nous pouvons constater la parfaite linéarité comme pour le cas précédent. Sur la figure 20 nous donnons les deux caractéristiques dans le but d'apprécier la différence.

**Figure 18:** Caractéristique courant tension pour l'huile contaminée**Figure 19:** Caractéristique courant tension pour l'huile indemne

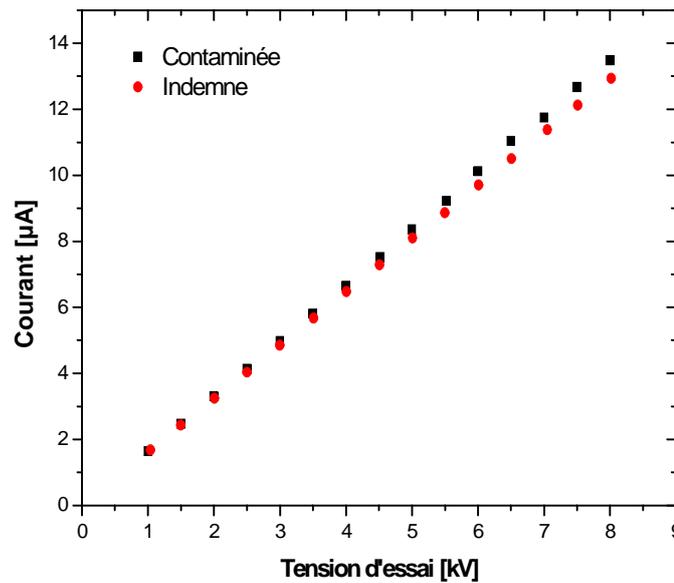


Figure 20: Caractéristiques courant tension des huiles indemne et contaminée

II. Caractéristiques du spintermètre industriel Electro Industries

L'entreprise Electro Industries est un partenaire de notre Université. Cette firme est spécialisée dans la construction de matériel pour l'électrotechnique. Notre réalisation a pour but principal de permettre à des étudiants de voir des claquages dans les huiles en courant continu ou en alternatif le cas échéant. Le système que nous avons réalisé a donc un but pédagogique.

1. Détermination de la tension de claquage à fréquence industrielle

a. Méthode d'essai (CEI 156 :1995)

La présente norme européenne a été adoptée par le CENELC le 1995-07-04. Les membres du CENELEC sont tenus de se soumettre au Règlement Intérieur du CEN/CENELEC qui définit les conditions dans lesquelles doit être attribué, sans modification, le statut de norme nationale à la norme européenne. Les listes mises à jour et les références bibliographiques relatives à ces normes nationales peuvent être obtenues auprès du Secrétariat Central ou auprès des membres du CENELEC. La présente norme européenne existe en trois versions officielles (allemand, anglais, français). Une version dans une autre langue faite par traduction sous la responsabilité d'un membre du CENELEC dans sa langue

nationale et notifiée au Secrétariat Central du CENELEC, a le même statut que les versions officielles. Les membres du CENELEC sont les comités électrotechniques nationaux des pays suivant : Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Irlande, Islande, Italie, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Portugal, Royaume-Uni, Suède et Suisse [14].

CENELEC : Comité Européen de Normalisation Electrotechnique [14].

b. Domaine d'application

La présente norme internationale décrit la méthode de détermination de la tension de claquage diélectrique des isolants liquides à fréquence industrielle. Le liquide en essai, contenu dans un appareil spécifié, est soumis à un champ électrique alternatif croissant, obtenu par augmentation de la tension, à vitesse constante, jusqu'à l'obtention du claquage. La méthode est applicable à tous les types d'isolants liquides de viscosité nominale allant jusqu'à $350 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$ à 40°C . Elle convient aussi bien pour les essais d'acceptation de liquides neufs à la livraison que pour définir l'état d'échantillons d'isolants liquides prélevés lors de la surveillance et de la maintenance des matériels immergés [14].

c. Référence normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par la suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente Norme internationale. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur la présente Norme internationale sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possède le registre des Normes internationales en vigueur [14].

CEI 52: 1960, Recommandations pour la mesure des tensions au moyen d'éclateurs à sphères (une sphère à la terre)

CEI 60, Techniques des essais à haut tension

CEI 475 : 1974, Méthode d'échantillonnage des diélectriques liquides.

2. Appareillage électrique

L'appareillage électrique se compose des éléments suivants:

- Régulateur de tension
- Transformateur élévateur c} Disjoncteur

- Système de limitation d'énergie

Deux ou plusieurs de ces éléments peuvent être intégrés dans un système d'équipement [14].

3. Régulateur de tension

La montée en tension uniforme en fonction du temps étant difficile à réaliser par des moyens manuels, un réglage automatique est indispensable.

Ce réglage de tension peut être réalisé par l'une des méthodes suivantes:

- Autotransformateur à rapport variable
- Régulateur électronique
- Régulateur à variation de champ
- Régulateur à induction
- Diviseur de tension résistif [14].

4. Transformateur élévateur

La tension d'essai est obtenue au moyen d'un transformateur élévateur alimenté à partir d'une source de tension alternative (48 Hz à 62 Hz) dont la valeur est augmentée progressivement. Les commandes de la source basse tension variable doivent être capables de faire varier la tension d'essai sans à-coups, d'une manière uniforme, sans oscillations ni transitoires de tension. L'incrémentación (obtenue, par exemple, à l'aide d'un autotransformateur variable) ne doit pas dépasser 2 % de la tension de claquage attendue. La tension appliquée aux électrodes de la cellule remplie du liquide doit avoir une forme d'onde approximativement sinusoïdale, telle que le facteur de crête se situe dans les limites suivantes: $1,41 \pm 0,07$. Il convient que le point milieu de l'enroulement secondaire du transformateur soit relié à la terre [14].

5. Résistances de limitation de courant

Afin de protéger le matériel et pour éviter une décomposition excessive du liquide au moment du claquage, il est possible d'insérer, en série avec la cellule d'essai, une résistance de limitation du courant de court-circuit. Le courant de court-circuit du transformateur et de ses circuits associés doit être compris entre 10 mA et 25 mA pour toutes les tensions supérieures à 15 kV. Ce résultat peut être obtenu par une combinaison de résistances placées dans le circuits primaire ou secondaire d'un transformateur haute tension ou dans les deux circuits [14].

6. Disjoncteur

a. Exigences minimales requises

Le circuit du transformateur élévateur doit être automatiquement ouvert quand un arc franc se produit. Le circuit primaire du transformateur élévateur doit être pourvu d'un disjoncteur fonctionnant sous l'action du courant qui résulte du claquage de l'échantillon et il doit couper la tension en moins de 10 ms. Le circuit peut être ouvert manuellement si un arc transitoire (audible ou visible) se produit entre les électrodes. La sensibilité de l'élément détecteur de courant dépend du dispositif de limitation d'énergie utilisé et seule une information approximative peut être fournie. Normalement le déclenchement provoqué par un courant de 4 mA maintenu pendant 5 ms est acceptable, tandis que pour les dispositifs de limitation d'énergie rapide, le déclenchement provoqué par un courant transitoire de 1 A maintenu pendant 1 s s'est révélé satisfaisant [14].

b. Exigences particulières requises pour les liquides silicones

Les liquides silicones peuvent donner des produits solides de décomposition sous l'effet des décharges électriques, susceptibles d'entraîner de grossières erreurs dans les résultats observés. Dans de tels cas, toutes les dispositions possibles doivent être prises pour limiter l'énergie dissipée dans le claquage. Alors que la limitation de courant, décrite ci-dessus, associée à l'ouverture du primaire du transformateur élévateur en moins de 10 ms est satisfaisante pour les hydrocarbures, pour les liquides silicones on obtient un meilleur résultat en court-circuitant le circuit primaire du transformateur par une faible impédance ou en employant un dispositif de détection de claquage basse tension agissant en moins de quelques microsecondes. Ce dispositif peut être de type analogique (par exemple un modulateur) ou de type à commutation (par exemple à thyristors). La tension secondaire du transformateur élévateur doit être, par l'emploi de tels types de dispositifs, annulée en moins de 1 ms après détection du claquage et ne doit pas pouvoir être réenclenchée, tant que l'étape suivante de la séquence d'essais n'est pas reprise [14].

c. Dispositif de mesurage

Dans le cadre de la présente norme, la valeur de la tension d'essais est définie par sa valeur de crête divisée par $\sqrt{2}$. Cette valeur peut être mesurée au moyen d'un voltmètre de crête, ou de tout autre type de voltmètre relié au primaire ou secondaire du

transformateur d'essai, ou à tout autre enroulement spécial prévu sur le transformateur; il faut que l'instrument utilisé soit étalonné jusqu'à la tension maximale que l'on souhaite mesurer. L'utilisation d'un étalon de transfert s'est révélée satisfaisante comme méthode d'étalonnage. Il s'agit d'un dispositif auxiliaire de mesurage placé entre les sorties haute tension, à la place de la cellule d'essai et présentant une impédance identique à celle de la cellule d'essai remplie. Ce dispositif auxiliaire est étalonné séparément à partir d'un étalon primaire, par exemple un éclateur à sphères conforme à la CEI 52 (voir aussi la CEI 60) [14].

7. Dispositif d'essai

a. Cellule d'essai

Le volume de la cellule doit être compris entre 350 ml et 600 ml. La cellule doit être réalisée dans un matériau isolant électrique, transparent, chimiquement inerte et résistant à l'isolant liquide ainsi qu'aux produits de nettoyage qui peuvent être utilisés. La cellule doit être équipée d'un couvercle et construite de manière à permettre facilement le démontage des électrodes, afin de les nettoyer et de les maintenir en état [14].

b. Electrodes

Les électrodes doivent être soit en laiton, en bronze ou en acier inoxydable austénitique. Elles doivent être polies et de forme sphérique (diamètre 12,5 mm à 13,0 mm) comme le montre la figure 21, ou hémisphérique aux dimensions données dans la figure 22. L'axe du système d'électrodes doit être horizontal et placé dans la cellule à 40 mm au moins en dessous de la surface du liquide en essai. Aucune partie de l'électrode ne doit être située à moins de 12 mm des parois de la cellule ou de l'agitateur. L'écartement entre les électrodes doit être de $2,50 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$. Les électrodes doivent être examinées fréquemment pour vérifier qu'elles ne sont pas piquées ou qu'elles n'ont pas subi d'autres détériorations; elles doivent être maintenues en bon état ou remplacées dès que l'on observe de telles détériorations [14].

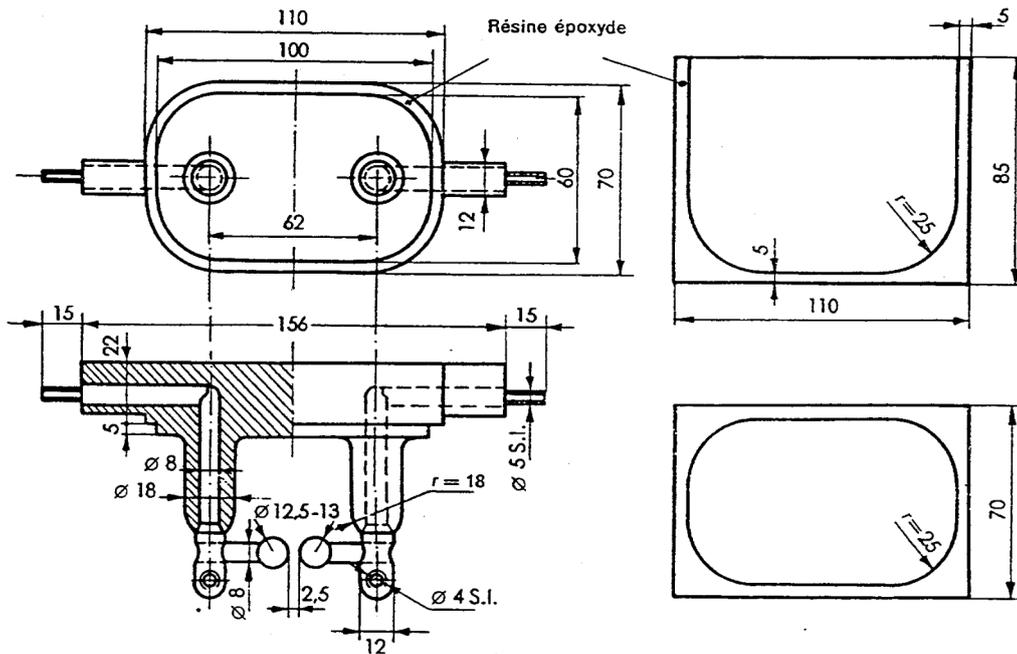


Figure 21: Exemple d'une cellule et d'électrodes sphériques appropriées [14].

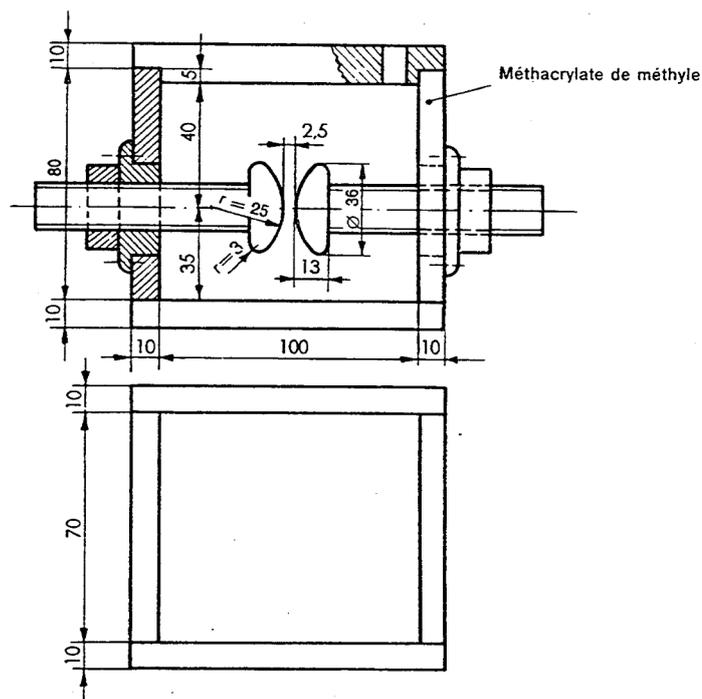


Figure 22: Exemple d'une cellule et d'électrodes hémisphériques appropriées [14].

c. Agitateur

L'essai peut être effectué avec ou sans agitation du liquide. Des différences de résultats entre essais effectués avec ou sans agitation ne se sont pas révélées statistiquement significatives. Cependant, un agitateur peut être commode,

particulièrement avec des appareils fonctionnant automatiquement. L'agitation peut être réalisée à l'aide d'une hélice à deux pales, de diamètre efficace de 20 mm à 25 mm et de hauteur d'axe de 5 mm à 10 mm, tournant à la vitesse de 250 tpm. À 300 tpm. L'agitateur ne doit pas créer de bulles d'air et tourner de préférence dans un sens tel que l'écoulement du liquide soit dirigé de haut en bas. Il doit être réalisé de telle sorte qu'il puisse être nettoyé facilement. L'agitation au moyen d'un agitateur à aimant (de longueur 20 mm à 25 mm et de 5 mm à 10 mm de diamètre) est une solution acceptable pourvu qu'il n'y ait pas de risque d'éliminer des particules magnétiques. Les dimensions du système d'agitation doivent répondre aux exigences de 4.2 pour l'écartement [14].

d. Préparation des électrodes

Les électrodes neuves, les électrodes piquées ou les électrodes qui pendant une longue période n'auraient pas été stockées convenablement doivent être nettoyées de la manière suivante:

- nettoyer toutes les surfaces avec un solvant volatil convenable qu'on laissera évaporer suffisamment;
- polir avec de la poudre abrasive fine (par exemple du rouge à polir), ou avec de la toile ou du papier abrasif (par exemple toile à polir ultra fine);
- nettoyer, après polissage, à l'éther de pétrole (qualité pure pour analyse, plage d'ébullition 60 °C - 80 °C) puis à l'acétone (qualité pure pour analyse) ;
- monter les électrodes dans la cellule que l'on remplira de liquide isolant neuf et propre, de même type que celui qui sera ultérieurement essayé, et augmenter la tension jusqu'au claquage, 24 fois.

e. Préparation du dispositif d'essai

Il est recommandé de réserver une cellule d'essai distincte pour chaque type d'isolant liquide. Ces cellules d'essai doivent être stockées dans un endroit sec avec leur couvercle et remplies de liquide isolant séché, correspondant au type pour lesquelles elles sont normalement destinées. Dans le cas où l'on ne peut faire autrement que changer le liquide en essai, éliminer toutes les traces du liquide précédent avec un solvant approprié, rincer la cellule équipée avec le liquide à essayer, propre et sec, laisser égoutter et remplir à nouveau [14].

f. Echantillonnage**i. Récipient d'échantillonnage**

Le volume de l'échantillon soit approximativement trois fois plus important que celui de la cellule d'essai. Les récipients d'échantillonnage appropriés doivent être conformes à la CEI 475. Le récipient à employer de préférence est une bouteille en verre brun. Des bouteilles en verre transparent peuvent être utilisées mais elles doivent être conservées à l'abri de la lumière jusqu'au moment de l'essai. Il est possible d'employer des récipients en plastique inattaquables par le liquide à essayer, à condition de ne pas les réutiliser. Pour la fermeture des bouteilles, utiliser de préférence des bouchons à vis équipés de joints d'étanchéité en polyoléfine ou en polytétrafluoréthylène. Les récipients et bouchons doivent être lavés avec un solvant approprié pour éliminer toutes les traces d'échantillons antérieurs. Ils doivent ensuite être rincés avec de l'acétone dont les traces seront éliminées par un jet d'air chaud. Après nettoyage, les récipients seront immédiatement bouchés et conservés fermés jusqu'à l'utilisation [14].

ii. Technique d'échantillonnage

L'échantillonnage des isolants liquides usagés ou neufs doit être effectué conformément aux modes opératoires décrits dans la CEI 475. Lors de l'échantillonnage, il convient de remplir les récipients à peu près complètement, en laissant un espace libre d'environ 3% du volume du récipient. La tension de claquage est très sensible à la moindre contamination de l'échantillon par l'eau et les particules. Une attention particulière est donc faite ici sur les précautions nécessaires pour éviter toute contamination, et sur la nécessité de disposer d'un personnel entraîné sous surveillance expérimentée. Sauf avis contraire, l'échantillon est prélevé à l'endroit où le liquide est vraisemblablement le plus contaminé, en principe au point le plus bas du récipient qui le contient.

g. Etat de l'échantillon

Sauf indication contraire, effectuer l'essai sur l'échantillon tel qu'il est reçu, sans le sécher ni le dégazer. Au moment de l'essai, la température du liquide en essai et la température ambiante ne doivent pas différer de plus de 5 °C et pour les essais d'arbitrage la température du liquide doit être de $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

h. Mode opératoire**i. Préparation de l'échantillon**

Juste avant le remplissage de la cellule d'essai, agiter doucement le récipient contenant l'échantillon en le renversant plusieurs fois afin d'homogénéiser, autant que possible, les impuretés du liquide, sans créer de bulles d'air.

Eviter d'exposer inutilement l'échantillon à l'air ambiant [14].

ii. Remplissage de la cellule

Immédiatement avant de commencer l'essai, vider la cellule d'essai et rincer les parois, les électrodes et autres parties internes de la cellule avec l'échantillon à essayer. Vider la cellule et la remplir lentement avec l'échantillon en évitant de former des bulles d'air. Mesurer et noter la température du liquide. Placer la cellule dans le dispositif d'essai et mettre en route l'agitateur, s'il y en a un [14].

iii. Application de la tension

- La première application de la tension est effectuée environ 5 min après avoir achevé le remplissage en vérifiant qu'il n'y a pas de bulles d'air visibles entre les électrodes.
- Augmenter régulièrement la tension appliquée aux électrodes, de zéro jusqu'au claquage, à la vitesse de $2,0 \text{ kV S}^{-1} \pm 0,2 \text{ kV S}^{-1}$. La tension de claquage est la tension maximale atteinte à l'ouverture du circuit, soit automatiquement (arc franc) ou manuellement (décharge audible ou visible détectée).
- Noter la valeur.
- Réaliser six claquages sur le même remplissage en respectant une pause d'au moins 2 min après chaque claquage et avant remise sous tension. Vérifier qu'il n'y a pas de bulles de gaz entre les électrodes. S'il y a un agitateur, le laisser fonctionner pendant tout l'essai.
- Calculer, en kilovolts, la valeur moyenne des six tensions de claquage. [14]

i. Rapport

Noter le résultat de l'essai comme étant la valeur moyenne, en kilovolts, des six tensions de claquage. Le rapport doit également stipuler "identification de "échantillon, les valeurs individuelles des tensions de claquage, le type d'électrodes employées, la fréquence de la tension d'essai, la température du liquide et l'usage d'un agitateur, si c'est le cas [14].

j. Dispersion des résultats

Il a été démontré que la dispersion des valeurs individuelles des tensions de claquage dépendait de la valeur du résultat de l'essai. La représentation graphique de la figure 23 indique les valeurs du coefficient de variation (rapport de l'écart type à la valeur moyenne) trouvées pour un grand nombre de résultats d'essais obtenus par plusieurs laboratoires sur de l'huile de transformateur. Dans le graphique, la courbe en trait plein représente la distribution de la valeur médiane du coefficient de variation en fonction de la moyenne. Les courbes en pointillé représentent l'intervalle de confiance à 95 % des valeurs du coefficient de variation en fonction de la moyenne.

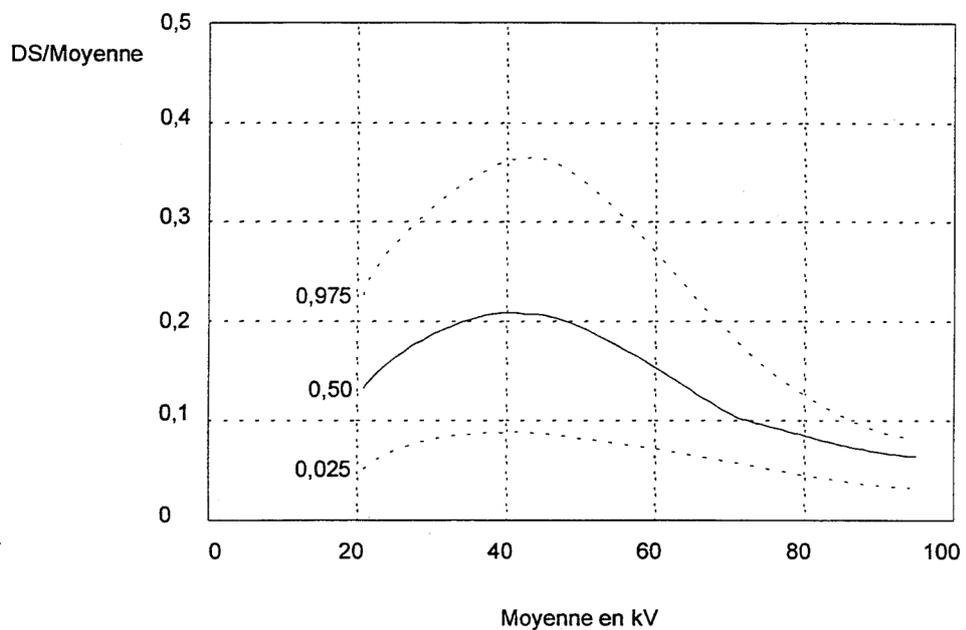


Figure 23: Représentation graphiques de coefficient de variation (rapport de l'écart type à la valeur moyenne) en fonction de la moyenne de tension de claquage [14].

8. Résultats expérimentaux avec le spintermètre industriel

Les essais réalisés avec le spintermètre industriel disponible au niveau de l'entreprise Electro-Industries, largement décrite précédemment se sont déroulés selon le protocole suivant :

- L'écartement des électrodes est de 2.5 mm.
- L'échantillon de l'huile analysée est celle destinée au remplissage des transformateurs de puissance. Cette huile a subi tous les traitements nécessaires.
- La tension est alternative est appliquée avec une vitesse de montée de 2kV/s jusqu'au claquage. La fréquence de la tension appliquée varie entre 48 et 62 Hz

Les tensions de claquage obtenues sont :

50.90 kV - 31.30 kV - 46.60kV - 49.00 kV - 53.60 kV - 49.40 kV.

La valeur moyenne de la tension de claquage est :

$$U_C = 46.80 \text{ kV}$$

III. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de réaliser une cellule d'essais pour mesurer la tension de claquage des huiles pour transformateurs. Nous avons essayé ou maximum d'approcher les normes exigées, de tels essais ne peuvent aucunement être considérés comme des tests conformes aux normes. Après un certain nombre de claquages (environ 5) la tension de claquage augmente, Cette valeur se trouve dans la plage admissible prévue par les normes. Une comparaison de la tension de claquage obtenue par le dispositif que nous avons réalisé à celle donnée par le spintermètre industriel montre un grand rapprochement entre les deux valeurs. Ceci nous permet d'affirmer que le dispositif pédagogique que nous avons mis au point peut être utilisé de manière fiable par les étudiants dans leurs séances de travaux pratiques.

Conclusion générale

Le choix d'un liquide destiné à l'isolation électrique, n'est pas basé sur ses seules propriétés électrique, mais dépend aussi de sa tenue au vieillissement, sa capacité à évacuer la chaleur et de sa sécurité. Les isolations hautes tension, pour la plupart, mettent nécessairement en œuvre des liquides sélectionnés pour contribuer à l'élimination des décharges partielles et pour faciliter l'évacuation de la chaleur tout en préservant leurs qualités isolantes (grande résistivité, faible pertes diélectriques, rigidité élevée). Cette dernière dépend d'une multitude de facteurs et n'est pas une qualité intrinsèque du liquide lui-même. Selon la formule chimique, des différences notables existent d'un liquide à l'autre, mais les conditions d'emploi interviennent considérablement (forme de la tension appliquée), contrainte thermiques, variations des pressions, configuration de l'isolation (employée sous champ uniforme ou sous champ divergent). L'huile minérale demeure donc le liquide le mieux adapté et le plus utilisé dans l'isolation haute tension, mais reste toujours le risque de claquage.

Nous avons noté que les propriétés électriques sont très sensibles à la présence d'impuretés telles que l'humidité, les particules solides et les gaz. La mesure de la tension de claquage, qui constitue l'essai de référence pour déterminer la tenue diélectrique d'une huile. La capacité des huiles à évacuer la chaleur est une caractéristique très importante, car elle permet d'éviter la surchauffe du transformateur, et de diminuer ainsi la dégradation prématurée de certains matériaux sensibles aux températures. Elle peut être évalué avec le calcul du facteur de pertes diélectrique $\tan \delta$ sa viscosité, la conductivité thermique et son point d'écoulement.

La sécurité d'emploi d'une huile de transformateur est un critère qui, de nos jours est déterminant pour le choix d'un liquide isolant. Elle prend en compte sa résistance au feu, sa toxicité vis-à-vis l'homme et de l'environnement.

Résumer

Le choix d'un liquide destiné à l'isolation électrique, n'est pas basé sur ses seules propriétés électrique, mais dépend aussi de sa tenue au vieillissement, sa capacité à évacuer la chaleur et de sa sécurité. Les isolations hautes tension, pour la plupart, mettent nécessairement en œuvre des liquides sélectionnés pour contribuer à l'élimination des décharges partielles et pour faciliter l'évacuation de la chaleur tout en préservant leurs qualités isolantes (grande résistivité, faible pertes diélectriques, rigidité élevée). Cette dernière dépend d'une multitude de facteurs et n'est pas une qualité intrinsèque du liquide lui-même. Selon la formule chimique, des différences notables existent d'un liquide à l'autre, mais les conditions d'emploi interviennent considérablement (forme de la tension appliquée), contrainte thermiques, variations des pressions, configuration de l'isolation (employée sous champ uniforme ou sous champ divergent). L'huile minérale demeure donc le liquide le mieux adapté et le plus utilisé dans l'isolation haute tension, mais reste toujours le risque de claquage. Nous avons noté que les propriétés électriques sont très sensibles à la présence d'impuretés telles que l'humidité, les particules solides et les gaz. La mesure de la tension de claquage, qui constitue l'essai de référence pour déterminer la tenue diélectrique d'une huile. La capacité des huiles à évacuer la chaleur est une caractéristique très importante, car elle permet d'éviter la surchauffe du transformateur, et de diminuer ainsi la dégradation prématurée de certains matériaux sensibles aux températures. Elle peut être évalué avec le calcul du facteur de pertes diélectrique $\tan \delta$ sa viscosité, la conductivité thermique et son point d'écoulement. La sécurité d'emploi d'une huile de transformateur est un critère qui de nos jours est déterminant pour le choix d'un liquide isolant. Elle prend en compte sa résistance au feu, sa toxicité vis-à-vis l'homme et de l'environnement.

Mots clés : claquage, spintermetre, l'huile minérale (BORAK 22), rigidité diélectrique,

- Claquage : est un phénomène qui se produit dans un isolant quand le champ électrique est plus important que ce que peut supporter cet isolant. Il se forme alors un arc électrique.
- Spintermetre : appareil de mesure des tensions de claquages des huiles pour transformateurs.
- l'huile minérale (BORAK 22) : ont pendant longtemps été fabriquées à partir de brut.
- rigidité diélectrique : d'un milieu isolant représente la valeur maximum du champ électrique que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique (donc d'un court-circuit).