

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المكتبة
BIBLIOTHEQUE —
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DER GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

THEME

**INFLUENCE DU VIEILLISSEMENT THERMIQUE
SUR LES PROPRIETES
DE L'HUILE DE TRANSFORMATEUR**

Proposé par :

Mr.A. BOUBAKEUR

Etudié par :

S.ABDI
S.ZELMAT

Dirigé par :

Mr.A.BOUBAKEUR
Mr.MLEBID



PROMOTION JUIN 1998

10 , Avenue Hassen Badi, EL-Harrach, Alger.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DER GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

THEME

**INFLUENCE DU VIEILLISSEMENT THERMIQUE
SUR LES PROPRIETES
DE L'HUILE DE TRANSFORMATEUR**

Proposé par :
Mr.A. BOUBAKEUR

Etudié par :
S.ABDI
S.ZELMAT

Dirigé par :
Mr.A.BOUBAKEUR
Mr.M.LEBID

PROMOTION JUIN 1998

10 , Avenue Hassen Badi, EL-Harrach. Alger.

DEDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

A mes très cher parents pour leur abnégation .

A mes frères et soeurs .

A toute la famille

A tous mes amis.

Je dédie ce travail .

SIF EDDINE



DEDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

A mes très cher parents pour leur abnégation .

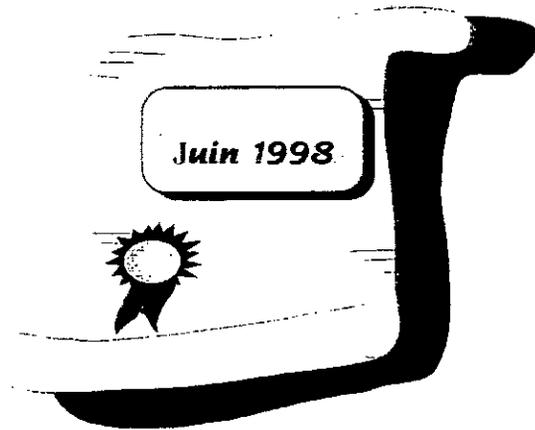
A mes frères et soeurs .

A toute la famille

A tous mes amis.

Je dédie ce travail .

SAMIR



REMERCIEMENTS



Nous exprimons toute notre gratitude à monsieur A. BOUBAKEUR , maître de conférences à l'école nationale polytechnique , qui nous a fait l'honneur d'encadrer notre travail, et notre remerciement pour son aide si précieuse .

Monsieur M. LEBID chef de service à la SONELGAZ D'EL HAMMA , fût, durant l'élaboration de cette thèse , une source intarissable de conseils et d'encouragement . Qu'il accepte notre reconnaissance profonde et notre sincères remerciement .

Monsieur T. Ahmed Zaid chargé de cours à l'ENP pour ces conseils le long de ce travail.

Ainsi que monsieur R. KHAILI , chef de département a la CABEL (ex ENICAB) / Gûe de Constantine et l'ensemble des techniciens de la SONELGAZ D'EL HAMMA et de la CABEL qu'ils acceptent nos remerciement pour leur aide significative.

Nous tenons a exprimer notre reconnaissances à M. T. BOURBON pour son aide précieuse, et a tous ceux qui ont contribué a la réalisation de ce travail de prêt ou de loin .

Introduction Générale ----- 1

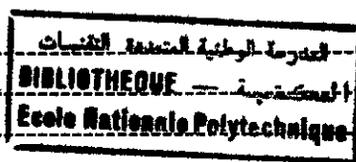
Chapitre I : La Conduction dans les diélectriques liquides

I-1 Introduction	-----3
I-2 Mécanismes électronique	-----3
I-2.1 Dissociation et conduction renforcée par le champ	-----3
I-2.2 Production de charges aux interfaces	-----3
I-2.3 Conséquences du transfert de charges	-----4
a - Cas d'un ion	-----4
b - Cas d'une espèce neutre	-----4
I-3 Mécanismes de claquage avec phase gazeuse	-----4
I-3.1 Mécanisme thermique	-----4
I-3.2 Mécanisme de cavitation	-----5
I-4 Mécanisme de claquage par pont	-----5
I-4.1 Origine des particules	-----6
I-4.2 Rôle des impuretés dans le claquage	-----6
a- Particules isolantes	-----6
b- Particules conductrices	-----6
I-5 Évolution des décharges dans les diélectriques liquides	-----7

Chapitre II : Caractéristiques des huiles de transformateur

II-1 Transformateur de puissance	-----8
II-1.1 Définition	-----8
II-1.2 Principaux éléments d'un transformateur	-----8
II-1.3 Localisation des pertes dans un transformateur	-----10
II-1.4 Rôle des diélectriques liquides dans les transformateurs	-----10
II-1.5 Évolution de l'isolation du transformateur de puissance	-----11
II-2 Huiles minérales isolantes	-----12
II-3 Caractéristiques des huiles minérales isolantes	-----14
II-3.1 Caractéristiques électriques	-----14
1-Permittivité	-----14
2-Conductivité et facteur de pertes diélectriques	-----14
3-Rigidité diélectrique	-----15
II-3.2 Caractéristiques d'étude	-----16
1-Viscosité	-----16
2-Point d'écoulement	-----16
II-3.3 Caractéristiques de service	-----17
1-Solubilité de gaz	-----17
2-Solubilité de l'eau	-----17
3-Acidité et couleur	-----17
4-Teneur en soufre et en composés oxygénés	-----18
5-Stabilité de l'oxydation	-----18
6-Stabilité thermique	-----18
7-Stabilité électrique aux décharges partielles	-----18

II-3.4 Sécurité d'emploi -----	19
1-Point d'éclair et Point de feu -----	20
2-Température d'auto inflammation -----	20
3-Caractéristique de combustion -----	20
II-4 Évolution des caractéristiques des huiles minérales en service -----	21
II-4.1 Rigidité diélectrique -----	21
II-4.2 Pertes diélectriques ($tg\delta$) -----	21
II-4.3 Acidité -----	21
II-4.4 Teneur en eau -----	22
II-4.5 Autres caractéristiques -----	22



Chapitre III : Vieillessement des isolants liquides

III-1 Introduction -----	23
III-2 Vieillessement des matériaux -----	23
III-2.1 Définition -----	23
III-2.2 Différents types de vieillessement -----	24
III-2.2.1 Vieillessement Physique -----	24
1- Avec transfert de masse -----	24
2- Sans transfert de masse -----	24
III-2.2.1 Vieillessement Chimique -----	25
1 Vieillessement thermochimique -----	25
2 Vieillessement thermique en présence d'oxygène -----	25
3 Vieillessement Photochimique -----	25
4 Vieillessement radiochimique -----	26
5 Vieillessement biochimique -----	26
6 Vieillessement par hydrolyse -----	26
7 Vieillessement climatique -----	27
8 Vieillessement électrique -----	27
III-3 Vieillessement thermique des isolants liquides -----	27
III-4 Lois du vieillessement des isolants -----	28
III-4.1 Loi de Montsinger -----	28
III-4.2 Loi de Dakin -----	29
III-5 Remplacement et régénération de l'huile isolante -----	29

Chapitre IV : Techniques Expérimentales

IV-1 Introduction -----	30
- Présentation de l'huile -----	30
IV-2 Essais diélectriques -----	30
IV-2.1 Mesure de facteur de pertes diélectriques ($tg\delta$) et la permittivité relative (ϵ_r) -----	30
IV-2.2 Mesure de la rigidité diélectrique -----	31
IV-2.3 Mesure de la résistivité (ρ) -----	31
IV-3 Essais Physico-chimique -----	31
IV-3.1 Mesure de la viscosité cinématique (η) -----	31
IV-3.2 La couleur -----	31
IV-3.3 L'acidité -----	32
IV-3.4 Mesure de la teneur en eau -----	32

IV-4 Essai du vieillissement thermique de l'huile	33
IV-4.1 Mode Opérateur	33
IV-4.2 Conduite d'essais	33
IV-5 Analyse des gaz dissous par chromatographie en phase gazeuse	34
IV-5.1 Objectif fondamental de la chromatographie	34
IV-5.2 Principe de la méthode	34
IV-5.3 Analyse des chromatogrammes	35
1-Analyse qualitative	35
2-Analyse quantitative	35
Chapitre V : Résultats et interprétation	
V-1 Introduction	36
V-2 Propriétés de l'huile neuve	36
V-2.1 Facteur de pertes diélectriques ($tg\delta$)	36
V-2.2 Permittivité relative (ϵ_r)	36
V-2.3 Résistivité (ρ)	36
V-2.4 Rigidité diélectrique	39
V-2.5 Acidité	39
V-2.6 Teneur en eau	39
V-2.7 couleur	39
V-2.8 viscosité cinématique (η)	39
V-3 Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile	40
V-3.1 Facteur de pertes diélectriques ($tg\delta$)	40
V-3.2 Permittivité relative (ϵ_r)	44
V-3.3 Résistivité (ρ)	47
V-3.4 Rigidité diélectrique	48
V-3.5 Acidité	48
V-3.6 Teneur en eau	49
V-3.7 Couleur	49
V-3.8 Viscosité cinématique	50
V-4 Analyse chromatographique	51
V-4.1 Méthodes d'analyses	51
1-Dosage de CO_2 , O_2 , CO	51
2-Dosage de H_2	51
3-Dosage de C_1 à C_3	51
V-4.2 Résultats d'analyse	51
V-4.3 Commentaire et conclusion	52
V-5 conclusion	54
Conclusion Générale	55

Annexes

Références Bibliographiques

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Introduction
générale

INTRODUCTION GENERALE :

Devant la demande croissante en énergie électrique, l'industrie électrique devient un grand consommateur des huiles isolantes. Ces dernières sont diversement utilisées dans l'élaboration du matériel électrique, (transformateurs, inductances, condensateurs, câbles et disjoncteurs), comme produit de remplissage, ou imprégnant d'isolants solides .

Ces huiles sont utilisées à des fins de refroidissement et d'isolation, elle devront s'adapter à des contraintes de plus en plus sévères. C'est la raison pour laquelle les études et recherche portant sur les huiles isolantes, et plus globalement pour les diélectriques liquides, constituent jusqu'à nos jours, un sujet toujours d'actualité.

Tout au long de leur utilisation, les huiles isolantes peuvent être soumises à plusieurs contraintes : électrique, thermique, chimique ...etc. Malgré les avantages qu'elles présentent, les huiles isolantes se détériorent progressivement sous l'action combinée ou séparée de ces contraintes.

La dégradation des matériaux au cours du temps est connue sous le nom de vieillissement. L'étude du phénomène de vieillissement thermique d'un isolant a deux buts principaux : le premier est l'évolution de la durée de vie de ces isolants sous l'effet des contraintes thermiques, le second but est de trouver une éventuelle corrélation entre le phénomène de vieillissement et les contraintes qui le provoquent [1].

Nous avons tenté à notre échelle et par les moyens qui ont été mis à notre disposition d'effectuer une étude sur l'influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile de transformateur.

Notre travail comprend deux parties .

La première partie est subdivisée en trois chapitres . Dans le premier chapitre, nous faisons le point sur les connaissances concernant la conduction dans les diélectriques liquides.

Le deuxième chapitre présente les différentes caractéristiques des huiles de transformateur, et dans le troisième chapitre nous traitons essentiellement le vieillissement de l'isolation.

La deuxième parties est réservée à la présentation des techniques expérimentales relatives aux variations des propriétés diélectriques et physico-chimiques de l'huile durant un vieillissement de 1500 heures.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I

La conduction dans les diélectriques liquides

I-1 INTRODUCTION

Les études concernant le phénomène de conduction dans les liquides font toujours l'objet de recherche, et cela depuis plus de trente ans, en particulier pour expliquer les mécanismes de création de porteurs de charges et leur nature, ainsi que les processus fondamentaux conduisant au claquage. Dans ce chapitre on s'intéresse à présenter les principaux mécanismes de conduction, et le claquage des diélectriques liquides purs ou ceux contenant des impuretés de différentes natures.

I.2 MECANISMES ELECTRONIQUE :

La conduction dans les diélectriques liquides, même sous champ intense ($E \geq 1 \text{ MV / cm}$) est presque toujours assurée par des ions de mobilité faible (inférieur à $10^{-3} / \mu \text{ s}$), qui préexistent dans les milieux où se créent aux interfaces [2].

II-2-1 DISSOCIATION ET CONDUCTION RENFORCEE PAR LE CHAMP :

La conduction est régie par un équilibre dissociation recombinaison entre espèces neutres et des ions, cette équilibre peut être schématisée par la réaction :



La formation des paires d'ions résultent des interactions de recombinaisons K_r et de dissociations K_d de deux (02) charges de signes opposés en interaction électrostatique. L'application d'un champ électrique modifie l'équilibre initial par déplacement des ions, et abaisse l'énergie de liaison des molécules neutres AB. Le nombre des ions dissociés devient supérieur au nombre des ions recombinaison [3].

I-2-2 PRODUCTION DE CHARGES AUX INTERFACES :

La création d'ions aux électrodes a pour origine des réactions électrochimiques résultante de la mise en contacte de l'électrode et du diélectriques. Des échanges électroniques ont lieu lorsque l'ion pénètre dans une zone de 10^{-7} cm d'épaisseur, on règne un champ très intense ($\sim 10^7 \text{ V / cm}$) [4].

I-2-3 CONSEQUENCE DU TRANSFERT DE CHARGE :

Le transfert de charges s'accompagne d'une augmentation ou d'une réduction de la résistivité du liquide selon que l'élément qui réagit est un ion ou une espèce neutre .

a- Cas d'un ion :

Il peut s'agir d'une réduction de l'ion A^+ : $A^+ + e^- \longrightarrow A$

ou de l'oxydation de l'ion B^- : $B^- \longrightarrow B + e^-$

Toutes les deux conduisent à une élimination d'ion. Par conséquent, la résistivité du liquide va augmenter.

b- Cas d'une espèce neutre :

Qu'il s'agisse de réduction : $N + e^- \longrightarrow N^-$ ou d'oxydation : $N \longrightarrow N^+ + e^-$, on est toujours en présence d'une injection (production) d'ions provoquant une baisse de la résistivité [4] [5].

I-3 MECANISME DE CLAQUAGE AVEC PHASE GAZEUSE :

Dans les liquides ultra-purs et en géométrie pointe-plan sous tension continue, il a été observé qu'à partir d'un certain seuil de tension, des bulles gazeuses se forment au voisinage de la pointe, puis sont violemment chassées vers le plan.

Cette phase gazeuse résulterait soit de la vaporisation et de la nucléation de bulles, soit de la cavitation [6]. Certains auteurs suppose que les cavités gazeuses existent à priori et considèrent uniquement la propagation de ces cavités.

I-3-1 MECANISME THERMIQUE :

L'échauffement du liquide par effet joule est susceptible de provoquer l'ébullition au voisinage d'une pointe ou d'aspérités entraînant d'intenses renforcements du champ.

Pour WATSON et SHARBAUGH , une bulle de vapeur est générée dans le liquide par une injection de courant à partir d'aspérités sur la cathode. Ce courant serait limité par la charge d'espèce [7].

Un modèle plus élaboré et tenant compte du régime transitoire a été proposé par KAO. Si l'intensité de courant est suffisante pour ramener la température du liquide à son point d'ébullition, il y a claquage [6].

Dans la théorie que KAO a formulé, le claquage se produit dans des bulles qui se formeraient de plusieurs façons :

- à partir de poches de gaz des électrodes ;
- par une répulsion électrostatique des charges d'espèce, qui dépasserait la tension superficielle.
- en raison d'une dissociation des molécules du liquide par des électrodes, ou d'une vaporisation du liquide par le courant dû à des impuretés ou émis à partir d'aspérités sur les électrodes.

I-3-2 MECANISME DE CAVITATION :

Le phénomène de cavitation dans un liquide se manifeste lorsque la pression de ce liquide à température constante tombe au dessous de sa vapeur saturante.

D'après KRASUCKI, ces bulles seraient créées en des points de pression nulle [8].

L'application d'un champ électrique dans un liquide peut engendrer une dépression :

- soit directement par le phénomène d'électrostriction du liquide là où le champ est renforcé.
- soit indirectement par la mise en mouvement de ce liquide.

I-4 MECANISME DE CALQUAGE PAR PONT :

Dans les isolants liquides utilisés en technique, peuvent apparaître, en suspension, des impuretés de différentes natures (bulles de gaz, gouttelettes d'eau, particules solides isolantes ou conductrices).

I-4-1 ORIGINE DES PARTICULES :

Les particules de faible dimension peuvent être classées en trois catégories :

- particules existantes initialement dans l'huile de remplissage de la cuve.
- particules qui apparaissent ensuite dans l'huile, provenant des éléments du transformateurs, comme les enroulements, les circuits magnétiques, et autres parties solides.
- particules apparaissant durant le service.

I-4-2 RÔLE DES IMPURETES DANS LE CLAQUAGE [9]:

La présence d'impuretés dans les liquides isolants conduit au renforcement local du champ électrique. La déformation du champ dépend de plusieurs paramètres comme :

- forme et dimensions des impuretés ;
- intervalle et forme des électrodes ;
- permittivité et conductivité des impuretés ;
- concentration des impuretés entre les électrodes ;
- valeur des charges libres existantes à la surface des particules.

a- Particules isolantes :

Les particules isolantes ayant la permittivité plus grande que celle du liquide seraient attirées sous l'action du champ, vers les régions de champ intense, et formeraient des ponts entre les électrodes. La rupture dans ce cas serait le résultat soit de l'échauffement produit par l'effet joule dans le pont qui est plus conducteur que le liquide, soit par la grande intensité locale du champ qui apparaît juste avant l'achèvement du pont.

b- Particules conductrices :

Les particules conductrices peuvent se charger facilement au contact d'une électrode, et transporter leur charges sur l'autre électrode.

Lorsque la distance entre la particule et l'électrode ayant le signe opposé est très petite, le champ est si élevé qu'une micro décharge a lieu entre la particule et l'électrode déclencherait la rupture.

La rupture diélectrique est en général précédée par des phénomènes impulsionnels appelés " pré-claquage ".

I-5 EVOLUTION DES DECHARGES DANS LES DIELECTRIQUES LIQUIDES :

Dans les diélectriques liquides, le mécanisme de l'évolution des décharges pour de tels intervalles est similaire, dans ses caractéristiques générales, à celui observé dans l'air pour des intervalles de l'ordre de quelques mètres. Ce mécanisme est appelé comme dans le gaz, mécanismes de streamer-leader.

Durant ces dernières années, de nombreux travaux ont porté sur la propagation de streamer, dans des géométries divergentes [10]. Il est généralement admis que le claquage est précédé d'une phase de préclaquage pouvant être elle-même séparée en deux :

- une phase de génération caractérisée par un temps t_g dit de génération, pendant lequel apparaît au voisinage d'une électrode une perturbation révélant la forme d'arborescence ;
- une phase de propagation durant laquelle se développe la perturbation précédemment créée. Cette phase est caractérisée par un temps t_p .

Les steamers sont caractérisés par leur indice de réfraction qui est différent de celui du liquide. Ils produisent des courants, et éléments de la lumière. De même que leur propagation est accompagnée d'onde de choc quelque soit leur vitesse [9] [10] [11].

CHAPITRE II

Caractéristiques des huiles de transformateurs

II-1 TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE :

II-1-1 DEFINITION

Le transformateur est un appareil électronique statique qui transforme un courant alternatif primaire en un courant secondaire de même fréquence ayant dans le cas général d'autres caractéristiques.

II-1-2 PRINCIPAUX ELEMENTS D'UN TRANSFORMATEUR :

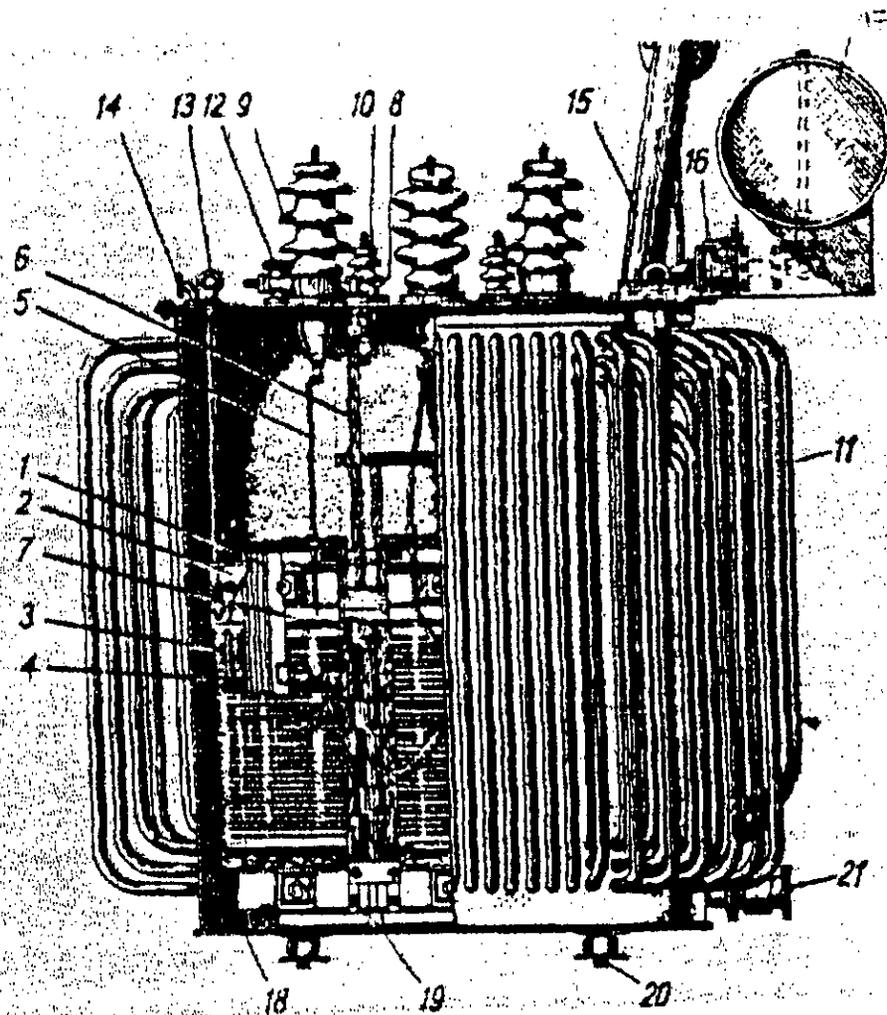
Les parties principales d'un transformateur sont [12] :

- ◆ Le noyau ;
- ◆ L'enroulement ;
- ◆ La cuve avec l'huile dans les transformateurs remplis d'huile ;
- ◆ Les isolateurs de sorties .

Les transformateurs remplis d'huile sont les plus utilisés, leur partie active est placée dans une cuve remplie d'huile. (Figure II-1).

Le tuyau d'échappement protège la cuve contre les endommagements possibles en cas de court-circuit par suite de la formation de gaz dans la cuve et de l'accroissement brusque de la pression.

Le conservateur d'huile est un récipient en tôle installé au dessus de couvercle de la cuve et réuni à l'aide d'une tubulaire avec cette dernière. Le niveau d'huile dans le conservateur doit être tel que la cuve soit toujours remplie d'huile. Le relais Bucholz est situé entre le conservateur et la cuve, il signale tout accident dans le transformateur de réseau en cas d'avarie [13].



Figur

- 1- Circuit magnétique feuilleté ; 2- Poutrelle en U serrant la culasse ;
- 2- Enroulement basse tension ; 4- Enroulement haute tension ; 5- Prise HT ;
- 6 - Prise BT ; 7- Commutateur triple de prise de réglage de l'enroulement HT ;
- 8- Commande de commutateur ; 9- Isolateur HT ; Isolateur BT ; 11- Cuve à radiateur ;
- 9- Robinet pour le remplissage de l'huile ; 13- Anneau de levage de la partie active ;
- 10- Pipe pour la connexion de la pompe à vide ; 15- Tuyau d'échappement ;
- 11- Relais Buchholz ; 17- Conservateur d'huile ; 18- Équerre du butée sur le fond de la cuve ; 19- Goujon verticale réunissant les poutrelles en U serrant les culasses ;
- 20-Galet de roulement ; 21- Robinet de vidange de l'huile.

II-1-3 LOCALISATION DES PERTES DANS UN TRANSFORMATEUR :

Lors de son fonctionnement, un transformateur est le siège de pertes d'énergie, dont la plus grande partie est localisée dans deux éléments principaux

- Le circuit magnétique ou elles sont causées par la variation du flux alternatif dans les tôles magnétiques, et dépendant de l'induction, c'est-à-dire de la tension appliquée ;
- Les enroulements ou elles sont dues en grande partie à l'effet Joule, mais aussi au courant de Foucault, et dépendant de l'induction, c'est - à-dire de la charge.

Pour réduire ces pertes, de nouveaux matériaux sont proposés [14].

II-1-2 RÔLE DES DIELECTRIQUES LIQUIDES DANS LES TRANSFORMATEURS :

L'échauffement des éléments correspondants du transformateur est dû aux pertes d'énergie, ce qui nécessite la mise en œuvre de moyens de réfrigération. C'est la première fonction assignée aux diélectriques liquides : le transfert de chaleur (refroidissement).

La chaleur évacuée est véhiculée par circulation naturelle ou forcée du diélectrique liquide au moyen d'un équipement tel qu'une pompe ou un ventilateur, vers les dispositifs de refroidissement. Le transfert de chaleur de la partie active à l'air à lieu en deux étapes : de la partie active à l'huile - à l'intérieur de la cuve -, de l'huile à l'air dans le réfrigérant.

L'isolement est l'autre fonction essentielle des diélectriques. D'une manière générale, tout transformateur exige : un isolement entre spires, un isolement entre couches ou entre bobines, un isolement entre les enroulements de basse tension et la masse, un isolement entre les enroulements basse tension et les enroulements haute tension, et enfin, un isolement entre les enroulements haute tension et la masse [15].

Cet isolement est assuré soit par une couche solide (papier ou carton) imprégnée d'huile, soit par une isolation mixte : combinaison de lames de diélectrique liquide et de barrières d'isolantes solides.

II-2 HUILES MINÉRALES ISOLANTES :

Les huiles minérales sont obtenues à partir de la distillation de pétroles sélectionnés (distillats), substances naturelles d'origines diverses (gaz légers, sulfures d'hydrogène, eau etc...).

Elles sont paraffiniques ou naphthéniques [17] suivant que le rapport du nombre de carbones paraffiniques (C_p) au nombre de carbones naphthéniques (C_n) est supérieur ou inférieur à deux. Elles ont pendant longtemps été fabriquées à partir de bruts naphthéniques, cependant, devant les craintes de raréfaction de ces bruts et devant leur origine très limitée. C'est les bruts paraffiniques qui sont utilisées maintenant.

Les huiles naphthéniques et paraffiniques ont des propriétés électriques très comparables.

Les huiles en électrotechnique appartiennent à trois classes correspondant à leur comportement aux basses températures, défini par leur point d'écoulement et leur point d'éclair, qui gouvernent leur viscosité. Les valeurs de la température du point d'écoulement et du point d'éclair sont les plus grandes pour la classe I, puis la classe II, puis la classe III.

Les huiles de la classe II sont les plus répandues.

Caractéristiques	Classes(1)			
		II et II A	III et III A	
Viscosité cinématique (2) à	+40°C	≤16.5	≤11	≤3.5
	+20°C(mm2/s)	≤40	(≤25)	(≤6)
	-15°C ou	≤800		
	-30°C cst		≤1800	
	-40°C			≤150
Point de feu en coupe ouverte	(°C)	Nom spécifié		
Point d'éclair en coupe ouverte	(°C)	≥140	≥130	≥95
Point d'écoulement	(°C)	≤-30	≤-45	≤-60
Aspect		Limpide et sans matières en suspension ni dépôt		
Masse volumique à 20°C	(Kg/m ³)	≤895		
Tension interfaciale à 25°C essai facultatif	(N/m)	≥40*10 ⁻³		
Indice de neutralisation sur l'huile neuf (d'acidité)	(mg KOH /g)	≤0.03		
Souffre corrosif		non corrosif		
Teneur en eau (essai facultatif)	(mg/kg)	(citernes : < 30 ;fûts :<40)		
Additifs antioxydant		Aucun pour les huiles non inhibées type et concentration doivent être indiqués pour les huiles inhibées.		
Stabilité à l'oxydation des huiles non inhibées :indice de neutralisation après essai (d'acidité) (mg KOH/g)		0.4		
Dépôt en masse	(%)	0.1		
Tension de claquage :				
à la livraison	(KV)	≥30		
huile traitée	(KV)	≥70		

Tableau 1 : Spécification des huiles minérales d'après NFC 27 101

II-3 CARACTERISTIQUES DES HUILES MINERALES ISOLANTES :

Les propriétés des liquides sont généralement divisées en propriétés physiques, chimiques et électriques. Ces dernières seront divisées en caractéristiques électriques, caractéristiques d'études, caractéristiques de service et autres caractéristiques.

II-3-1 CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES :

Les caractéristiques électriques des liquides dépendent de leur formulation (composition, constitution moléculaire etc...), et de leur condition d'utilisation ou conditionnement (filtration, déshydratation etc...)

1-Permittivité :

La permittivité définit la possibilité, sous l'action du champ électrique, de libérer des charges. Elle résulte de diverses contributions de déplacements de charges[19].

La permittivité relative est définie comme le rapport ϵ/ϵ_0 de la permittivité absolue ϵ du liquide à celle du vide ($\epsilon_0=(1 / 36\pi)10^{-9}$ F/m).

La permittivité relative des huiles varie peu avec la fréquence. Dans le cas des isolants solides imprégnés d'huile, la contrainte électrique est plus élevée dans le milieu de permittivité la plus faible, c'est-à-dire dans l'huile minérale.

2-Conductivité et facteur de pertes diélectriques :

Si la permittivité est une caractéristique de constitution, la conductivité des liquides est une propriété de conditionnement.

Tout liquide isolant, soumis à une différence de potentiel donne lieu à un courant de fuite caractérisant de la conductivité électrique σ du fluide.

Aux faibles champs électriques ($\approx 10\text{KV/cm}$), la conduction présente généralement un caractère ohmique. Aux champs élevés, la conduction des isolants perd son caractère ohmique. Plusieurs théories rendent compte des courants élevés selon que les matériaux sont contaminés ou non par des impuretés [19].

En pratique, pour mieux caractériser un diélectrique de point de vue pertes, il est usuel d'utiliser la tangente de l'angle de pertes. C'est une fonction croissante de la température dépendant de la tension.

Les valeurs les plus courantes, quelque soit l'application, se situe autour de 10^{-3} .

3-Rigidité diélectrique :

a- A fréquence industrielle : C'est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut appliquer à l'huile sans décharge. Comme la conductivité, la rigidité électrique, a fréquence industrielle est une caractéristique de conditionnement du liquide, mais elle est aussi de sa formulation.

b- au choc de foudre : Il s'agit d'impulsions de tension normalisées à front raide.

L'intérêt de connaître le comportement des liquides est double :

- D'une part, connaître les effets des tensions transitoires, auxquelles ils sont soumis dans les matériels ;
- D'autre part, différencier les produits entre eux, puisque la valeur de la rigidité sous choc de foudre est fortement influencée par la nature chimique et de la composition des liquides [16].

c- Sous tension continue : la rigidité des liquides en champ non uniforme, varie avec la polarité, elle est plus élevée quand la polarité de l'électrode en forme de pointe est négative.

Cependant, la valeur de la rigidité de l'huile, quelque soit sa qualité, est influencée par la présence des polluants extérieurs. L'eau, les poussières et les fibres cellulosiques réduisent fortement la rigidité.

II-3-2 CARACTERISTIQUES D'ETUDE :

1-Viscosité :

La viscosité d'un fluide traduit les forces qu'opposent les molécules de ce fluide à une force tendant à les déplacer. C'est donc la résistance au mouvement que manifeste tout les fluides .

La viscosité diminue avec la température et augmente avec la pression. L'expérience montre que dans la cas d'une huile minérale, la viscosité double quand la pression passe de la pression atmosphérique à 350 Bars.

L'indice de viscosité exprime la variation de la viscosité en fonction de la température.

Les huiles pour transformateurs ont un indice très bas, ce qui permet une circulation plus facile, donc un refroidissement plus efficace.

2-Point d'écoulement :

Le point d'écoulement, température à laquelle les liquides se figent, est insuffisante pour évaluer les performances des huiles à basses températures. En particuliers dans les transformateurs avec circulation forcée, les notions de limites de pompabilité ou de filtrabilité présentent beaucoup plus d'intérêt que le point d'écoulement. Ainsi, la température à laquelle la viscosité permet le fonctionnement des pompes est de l'ordre de -25°C à 35°C pour des points d'écoulement de -45°C .

Les huiles de point d'écoulement le plus bas sont obtenues à partir des coupes naphéniques.

II-3-3 CARACTERISTIQUES DE SERVICE :

1-Solubilité des gaz :

Tous les gaz se dissolvent plus au moins dans l'huile minérale, comme d'ailleurs dans les liquides. La plus grande valeur du volume de gaz qui peut être mis en solution à la saturation s'appelle coefficient de solubilité S. Il est défini comme étant le rapport du volume des gaz dissout au volume d'huile et est exprimée en pour cent .

2-Solubilité de l'eau :

les propriétés électriques des liquides sont affectées par leur teneur en eau . cette dernière dépend de la température et de la pression partielle d'eau dans l'atmosphère au dessus du liquide . la teneur à saturation et à température ambiante est de l'ordre de 50 p.p.m pour les huiles minérales [20].

La solubilité de l'eau dans l'huile dépend de la composition chimique de celle-ci , elle croit avec la concentration en hydrocarbures aromatiques .

dans le cas d'une huile vieillie ,les produits de dégradation augmentent la quantité d'eau qu'elle peut contenir .

3-Acidité et couleur :

Dans les huiles neuves ,on ne constate pas de présence d'acides minéraux , mais celle d'acides organiques .

L'acidité d'une huile en service résulte des produits d'oxydation pour une huile neuve, l'acidité est de l'ordre 0.005 [mg KOH/g] et atteint en fin de vie les valeurs de 0.5 [mg KOH/g].

Corrélativement, la couleur de l'huile s'accroît de clair (indice <0.5) à jaune (indice<2.5), brunit (indice 5.5) , pour devenir noir (indice 8). Ce changement de couleur peut être l'indication d'une oxydation, mais aussi de la mise en solution de pigments de matériaux incompatibles.

4-Teneur en soufre et en composés oxygénés :

Les composés organosoufrés laissés dans les huiles minérales correspondent à la nécessité de maintenir des hydrocarbures aromatiques pour donner aux huiles une bonne stabilité à l'oxydation. Dans le cas de huile mal raffiné, il peut rester des traces d'hétérocycles oxygénés. Ce sont des composés généralement instables qui initient les réactions d'oxydation et sont responsable de l'acidité initiale de l'huile.

5-Stabilité à l'oxydation :

On désigne par oxydation un ensemble de réaction complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène dissout. La vitesse de réaction d'oxydation croît avec la température et de la concentration en oxygène. Les conséquence de l'oxydation de l'huile sur l'isolation sont :

- Une mauvaise évacuation de la chaleur par augmentation de la viscosité ;
- Une augmentation des pertes diélectriques et de la conductivité ;
- Une corrosion des pièces métalliques ;
- Une dégradation plus rapide de l'isolation cellulosique.

6-Stabilité thermique :

La stabilité thermique concerne généralement les matériaux en association avec l'huile, cependant la connaissance de comportement de l'huile seule présente de l'intérêt dans le cas de points chauds hors bobinage. L'oxygène joue un rôle prépondérant dans la décomposition thermique des huiles pour des températures de 175 à 235 °C.

Les huiles minérales sont stables jusqu'à des températures de 110 à 120°C.

7-Stabilité électrique aux décharges partielles:

Sous l'action d'un champ électrique intense et par l'intermédiaire de décharge partielle dans des occlusions gazeuses qui se forment ou préexistent, les liquides se décomposent, en donnant des gaz, deux méthodes d'analyses indiquent, suivant des conditions d'essai, si les isolant liquides sont des absorbeurs et émetteurs de gaz.

Le comportement au gassing d'un isolant liquide est principalement fonction de sa composition chimique, mais des variations de certains paramètres d'essais peuvent modifier les résultats de façon considérable. Ces deux méthodes diffèrent par leur condition d'essai. La stabilité électrique désignée sous le vocable gassing s'évalue par le coefficient de gassing G , ce coefficient est positif ou négatif suivant qu'il y a désorption ou absorption de gaz.

Le comportement d'une huile minérale sous l'action de décharges électrique dépend de l'intensité d'ionisation, de la température et de la phase gazeuse concernée. Les hydrocarbures aromatiques sont plus stable et fixent l'hydrogène, leur présence contribue à accroître la stabilité électrique d'une huile.

La stabilité thermique aux décharges partielles des huiles minérales correspondent à des faibles énergies et dépend de la décomposition de l'huile.

Dans le cas d'arc électrique, et donc de température très élevée ($>2000^{\circ}\text{C}$), il n'a pas de liquides qui puissent résister. La nature des gaz formés et leur proportions relatives permettent de caractériser la sécurité de la contrainte .

II-3-4 SECURITE D'EMPLOI :

La sécurité d'emploi des liquides isolants concerne les risques d'incendie et d'explosions dont il pouvait être la cause, la santé des individus et les risques de l'environnement.

Le danger d'incendie repose sur des caractéristiques d'inflammabilité (point d'éclair, point de feu , température d'auto inflammation) et certaines caractéristiques (indice d'oxygène, quantité de chaleur dégagée).

Le danger d'explosion est lié à la nature des gaz produit par décomposition des

liquides sous arcs électriques et points chauds, hydrogène, méthane et acétylène étant les principaux gaz concernés.

1-Point d'éclair et point de feu :

Le point d'éclair d'un liquide est la température minimale à laquelle il doit être pour que les vapeurs émises s'allument en présence d'une flamme dans des conditions bien définies. Le point d'un liquide et la température minimale à laquelle il y a inflammation puis combustion, pendant une durée minimale fixée. Le point de feu indique donc la combustion liquide sera ou non entretenue. La différence entre ces deux points en coupe ouverte est de l'ordre de 10°C.

2-Température d'auto-inflammation :

La température d'auto-inflammation d'un liquide est la température minimale à laquelle se produit une combustion instantanée. Elle est supérieure à celle du point d'éclair. Alors que le point de feu caractérise les limites thermiques de services, la températures d'auto-inflammation nous renseigne sur le comportement du liquide dans un incendie.

3-Caractéristiques de combustion :

Certaines liquides, quoique dits peu inflammable, n'en brûlent pas moins et leur comportement dans les matériels pris dans un incendie pose problème. Pour répondre à cette interrogation, les caractéristiques de combustion (indice limite d'oxygène, capacité thermique de combustion, dégagement de fumées) sont maintenant considérés associés en outre à la corrosivité des produits de combustion et a leur toxicité.

En particulier, le débit calorifique, associé au point de feu permet d'établir une échelle de probabilité de propagation de feu sans avoir recours à d'autre propriété telles que l'indice limite d'oxygène.

II-4 EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DES HUILES MINERALES EN SERVICE :

II-4-1 RIGIDITE DIELECTRIQUE :

C'est la caractéristique la plus sensible à la pollution de l'huile ,elle est fortement réduite par l'eau , les fibres cellulosiques et les poussières . seul une huile bien traitée, séchée et filtrée peut satisfaire aux exigences sévères d'un transformateur .

La rigidité n'est pas influencée par le vieillissement de l'huile , une huile très vieille mais propre, peut avoir une rigidité parfaite .

II-4-2 PERTES DIÉLECTRIQUE (TGδ) :

En dehors de toute pollution extérieure , les pertes diélectriques évoluent avec le vieillissement de l'huile. En effet, les produits résultants de l'oxydation de l'huile, sont pour la plupart des produits polaires et acides.

D'autre part, le facteur de perte électrique est sensible à la présence de produits dissous dans l'huiles, et ces produits proviennent des matériaux constitutifs du transformateur et non de l'huile elle même.

La valeur de $tg\delta$ d'une huile neuve ne doit pas dépasser 0.005 (0.5%), sauf pollution accidentelle.

La valeur de la permittivité relative d'une huile neuve est de l'ordre de 4.4 à 20°C .

II-4-3 ACIDITE :

L'acidité des huiles minérales neuves est très faible, de l'ordre de 0.005 [mgKOH/g] En service, elle augmente parallèlement avec le vieillissement de l'huile.

En exploitation normale, elle évolue très lentement et reste pratiquement stable durant des années. A l'approche de la durée de l'huile, cette évolution devient très rapide pour atteindre la valeur critique de 05 [mgKOH/g].

Des études expérimentales ont montré qu'une acidité élevée est accompagnée par une augmentation des pertes, mais l'inverse n'est pas vérifié.

II-4-4 TENEUR EN EAU :

L'eau, normalement trouvée dans le transformateur, peut y avoir été introduite, soit par équilibre physico-chimique avec l'air atmosphérique, soit par réaction de l'oxydation de l'huile suivant le schéma :



soit encore par une réduction de condensation.

Ce qui provoque une augmentation de la teneur en eau durant le vieillissement.

II-4-5 AUTRES CARACTERISTIQUES :

Les autres caractéristiques telles que viscosité, densité et point éclair, ne subissent pratiquement aucune évolution en service.

Cependant leur variation ne peut être due qu'à un mélange accidentelle avec un autre produit étranger.

CHAPITRE III

Vieillessement des isolants liquides

III-1 INTRODUCTION :

Tout au long de leur utilisation, les huiles minérales isolantes peuvent être soumises à plusieurs contraintes électriques, thermiques, chimiques, rayonnement, etc...

Malgré les avantages qu'ils présentent, les huiles isolantes se détériorent progressivement sous l'action combinée ou séparée de ces contraintes, auxquelles elles sont soumises pendant la mise en service des transformateurs où elles sont utilisées.

La dégradation des matériaux au cours du temps est connue sous le nom du vieillissement.

III-2 : VIEILLISSEMENT DES MATERIAUX :

III-2-1 : DEFINITION :

On appelle vieillissement tout phénomène se traduisant par une évolution lente et irréversible des propriétés du matériaux. Cette évolution peut résulter de la modification de la structures des macromolécules [1].

Les types de problèmes de vieillissement peuvent être classés dans les catégories suivantes :

- expertise : analyses des pièces défailantes, recherche des causes de vieillissement et détection des anomalies.
- optimisation : amélioration de stabilité d'un matériau par modification de sa composition, essais comparatifs.
- prédiction de la durée des essais de vieillissement accélérés, étude des modèles cinétiques permettant la prédiction de la durée de vie.
- recherche de base sur les mécanismes de vieillissement et de stabilité [21].

III-2-2 DIFFERENTS TYPES DE VIEILLISSEMENT :

Les différents mécanismes de vieillissement sont classés en deux grandes catégories selon qu'ils s'impliquent ou non d'une modification chimique de la structure.

III-2-2-1 Vieillissement physique :

La composition chimique du matériau n'est pas modifier, le vieillissement physique peut se produire avec ou sans transfert de masse.

1- Avec transfert de masse :

Un solvant peut pénétrer dans le matériau : dans le polymère, il peut y avoir plastification accompagnée d'un gonflement ou également pertes d'adjuvants par extraction ou évaporation. Lorsque le matériau est soumis à des contraintes (mécaniques, électriques, etc.), le solvant peut provoquer une craquelure ; les anglo-saxon désignent ce phénomène « Crazing ». Si la déformation du polymère se poursuit, il se développe un phénomène de fissuration ou de cracking.

Avec l'eau, il peut exister des gradients de concentration dus à la diffusion, un gonflement différentiel fibre-polymère pour les composites ou un gonflement dû aux hétérogénéités du matériau.

Cette pénétration de l'eau dans le matériau contribue à diminuer la résistance d'isolement, elle se produit généralement lorsque les matériels, par exemple des moteurs sont à l'arrêt.

2- Sans transfert de masse :

Des chocs thermiques peuvent entraîner des ruptures mécaniques induites par dilatation différentielle (gradients de température dans l'épaisseur ou matériau hétérogène), un matériau peut se fissurer sous contrainte en présence d'un composé tension-actif

Si le matériau est dans un état thermodynamique instable après sa mise en oeuvre, il peut en résulte un vieillissement physique interne [17].

III-2-2 VIEILLISSEMENT CHIMIQUE :

Le vieillissement chimique provoque une modification du matériaux sous l'influence de l'environnement .

Dans la pratique , il se superpose à un vieillissement physique . Les isolations peuvent être soumises à différents types de vieillissement chimique [17].

1- Vieillessement thermochimique (non -oxydatif) :

On appelle vieillissement thermique non oxydatif tout phénomène traduisant une émulsion qui ne fait intervenir que : la température, l'atmosphère , et le matériau [22].

2- Vieillessement thermique en présence d'oxygène :

Ils produit a des températures modérées (généralement inférieur à 300°C), la présence d'oxygène a pour effets :

- d'abaisser le seuil de température au-delà du quelle un vieillissement thermochimique anaérobie démarre ;
- de provoquer une plus forte exothermicite ;
- d'entraîner une prédominance des coupures de chaînes des polymères par rapport aux articulations .

L'utilisation d'anti-oxygène ou de noir de carbone peut inhiber le phénomène d'oxydation [17].

3- Vieillessement photochimique :

Ce phénomène est relativement complexe; beaucoup de facteurs influent sur son déroulement : la nature de l'atmosphère environnante (l'humidité, l'oxygène); l'influence de la température peut provoquer un changement de couleur et une formation de dépôts .

4- Vieillissement radiochimique :

Dans les application nucléaires , spatiales , médicales, etc... les matériaux sont soumis a des radiations (α , β , γ , X, neutrons) de forte énergie , il s'ensuit des coupures de chaînes et des réticulations. L'oxygène est en effets consommé si rapidement qu'il ne peut se renouveler par diffusion dans le matériau.

Le vieillissement radiochimique est donc influencé par la température ; l'oxygène, l'humidité, qui jouent un rôle important. Des adjuvants tels que le noir de carbone, les produits phénoliques on un effets stabilisant [17].

5- Vieillissement biochimique :

Certains micro-organismes (moisissures, champignons, insectes, rongeurs, etc..) peuvent dégrader les polymères , plusieurs mécanismes de vieillissement sont connus : dégradation biochimique du matériau ; consommation des adjuvants ; attaque mécanique par les rongeurs.

La biodégradation est favorisée par des milieux humides, à des températures supérieures à l'ambiante, avec un maximum d'activité vers 30°C, on peut citer les milieux tropicaux ou équatoriaux, le milieu marin ou fluvial, le milieu terrestre.

De nombreux additifs sont utilisés (phénols, dérivés organométalliques (Hg, Sb, As, Sn, Zn) pour limiter les phénomènes de biodégradation [17].

6- Vieillissement par hydrolyse :

Sous l'influence de l'humidité ($\geq 95\%$), et de la température (au moins 100°C), certains polymères (polyesters, polyméthanés, etc...) peuvent se dégrader [17].

7- Vieillissement climatique :

Le vieillissement climatique « Weathering » résulte de l'exposition directe des matériaux aux rayonnements solaires, intempéries et à diverses pollutions (marine, industrielle, etc.), la température joue également un rôle important.

De nombreux adjuvants permettent de protéger les polymères (noir de carbone, pigments minéraux, tels que oxyde de zinc et oxyde de titane et absorbeurs UV).

Ce vieillissement peut dégrader les caractéristiques électriques de la surface d'un isolant, et provoquer la formation de cheminements [17].

8- Vieillissement électrique :

Si le matériau est soumis à des décharges partielles dont les effets se traduisent par la formation de radicaux libres, ces composés réagissent rapidement avec l'oxygène. Il s'ensuit une dégradation généralisée ou très localisée (arborescences électriques) des isolants. En présence d'humidité, d'impuretés ioniques et sous l'influence de la température, des réactions électrochimiques peuvent conduire à une dégradation des propriétés du matériau.

III-3 VIEILLISSEMENT THERMIQUES DES ISOLANTS LIQUIDES :

On appelle vieillissement thermique tout phénomène traduisant une évolution qui ne fait intervenir que le matériau, l'atmosphère et la température. Il peut faire intervenir des phénomènes physiques et des phénomènes chimiques, et il résulte d'une oxydation de chaînes carboniques qui entraîne une augmentation des pertes diélectriques et une chute des caractéristiques mécaniques [23].

L'étude du phénomène de vieillissement thermique d'un isolant liquide tel que l'huile pour transformateur a deux buts principaux :

Le premier est l'évolution de la durée de vie de ces isolants sous l'effet des contraintes thermiques, le second but est de trouver une éventuelle corrélation entre le processus de vieillissement et les contraintes qui le provoquent.

Le vieillissement de l'isolant dépend d'une réaction chimique unique, les molécules de l'isolant se dégradent sous l'influence de la température, ce qui conduit à une formation de dépôts dont le poids augmente notablement. Il conduit à un changement de couleur et une augmentation de pertes diélectriques.

III-4 LOI DU VIEILLISSEMENT DES ISOLANTS :

Les isolants utilisés dans la fabrication des transformateurs, qu'ils soient solides (papier, carton, bois) ou liquides (huile), subissent avec le temps une altération chimique sous l'influence de la couleur et d'autres agents tels que l'oxygène et l'humidité.

Les différents matériaux en présence peuvent avoir une influence réciproque. Ainsi, le cuivre nu est un catalyseur de l'oxydation de l'huile, tandis que les produits de décomposition du papier accélèrent l'altération de l'huile.

Depuis une quarantaine d'années, des études considérables ont été consacrées à ce problème. Les conséquences se sont faites sentir dans tout les domaines : développement de procédé de mesure, élaboration de normes, amélioration des produits existants, création de nouveaux produits, mise au point de procédé de fabrication plus performants [13].

III-4-1 LOI DE MONTSINGER :

La loi de Montsinger (1930) concernant la durée de vie de l'isolant est de la forme [13] :

$$L = C \text{ EXP } [-\ln 2 / \Delta\theta * \theta]$$

L : étant la durée de vie ;

θ : la température en °C ;

$\Delta\theta$: l'écart de température correspondant au doublement ou à la réduction de moitié de la durée de vie ; il est égale à 6°C dans la publication 354 de la CEI [17].

III-4-2 LOI DE DAKIN :

W Dakin (1948) à montré que la durée de vie L d'un isolant ou d'un système d'isolation en fonction de la température peut se mettre sous la forme simple [13] :

$$\text{Log } L = A + B/T$$

A, B étant des constantes.

III-5 REMPLACEMENT ET REGENERATION DE L'HUILE ISOLANTE :

Le remplacement pur et simple de l'huile peut s'imposer dans le cas ou celle-ci est disqualifiée ou même seulement polluée au point de rendre tout traitement plus onéreux que le remplacement.

Les cas ou le remplacement du diélectrique s'impose de façon absolue sont assez rares, cependant, il faut signaler le cas d'une huile exagérément vieillie notamment lorsque l'indice d'acidité est supérieure à 1[mgKOH/g] ($IA \geq 1 \text{ mgKOH/g}$) [13].

Une opération de régénération de l'huile est nécessaire lorsque elle est sévèrement polluée par des produits de composition. Si ces derniers sont instables, ils provoquent des dépôts dont l'élimination nécessite un décufrage, et s'ils sont par contre soluble, ils contaminent le diélectrique en jouant parfois un rôle de catalyseur dans le poursuite de la décomposition et ne peuvent êtres éliminés que par une opération chimique ou physico-chimique spécifique assimilable a un nouveau raffinage.

CHAPITRE IV

Techniques expérimentales

IV-1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous allons présenter les essais effectués sur l'huile de transformateur, qui ont été réalisés au DCME de la SONELGAZ XP, HAMMA (ALGER), à l'exception de la mesure de la résistivité qui a été réalisée au laboratoire de mesure de la CABEL, GUE DE CONSTANTINE

Nous avons étudié dans la première partie, certaines propriétés diélectriques et physico-chimique de l'huile.

La deuxième partie a porté essentiellement sur l'influence de vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile.

- Présentation de l'huile :

Nous avons effectué nos essais sur l'huile neuve de transformateur utilisé par la SONELGAZ, cette huile est commercialement appelée BORAK 22. Ces caractéristiques principales sont données en annexe 1.

IV-2 ESSAIS DIELECTRIQUES :

IV-2-1 MESURE DU FACTEUR DE PERTES DIELECTRIQUES ($\text{tg}\delta$) ET LA PERMITTIVITE RELATIVE (ϵ_r) :

Le facteur de pertes diélectriques ($\text{tg}\delta$) et la permittivité relative (ϵ_r), ont été mesuré à l'aide d'un pont de schering TETEX 2801 selon la norme CEI250 [24]. Il est basé sur le principe du pont de Weatestone, la cellule d'essai contenant l'échantillon d'huile est constituée de deux cylindres coaxiaux de distance interélectrode de 5mm.

Les essais ont été effectués sous une tension de 2kV, 50hz, et sous une température variant de 30 °C à 120 °C, la sensibilité peut aller jusqu'à 10^{-6} .

IV-2-2 MESURE DE LA RIGIDITE DIELECTRIQUE :

La mesure de la tension de claquage à été effectuée conformément à la norme CEI 156 [25].

L'appareil utilisé est un Spintèrmètre (OT60)WALTER. Une cellule ayant des électrodes à boules sphériques de diamètre $d=12.5\text{mm}$ et un écartement $e=2.5\text{mm}$.

La cellule est remplie avec de l'huile, et on mesure la rigidité . Pour exprimer la rigidité en kV/cm , il suffit de porter la valeur de la tension mesurée sur le tableau des courbes donnant la valeur correspondante de la rigidité .

IV-2-3 MESURE DE LA RESISTIVITE (ρ) :

La résistivité (ρ) est mesurée à l'aide d'un Meghommètre selon la norme CEI 93 [26].

Les mesures ont été effectuées sous une tension continue de 500V , appliquée durant 10mn , et sous une température variant de 30°C à 120°C .

IV-3 ESSAIS PHYSICO-CHIMIQUE :**IV-3-1 MESURE DE LA VISCOSITE CINEMATIQUE (η) :**

La viscosité cinématique(η) à été mesurée selon la norme NFT60-100 [27]. On procède à la mesure du temps d'écoulement d'un volume du liquide dans un viscosimètre à capillaire en verre de type ATPM14760 BRETVILLE.

La viscosité cinématique est le produit de ce temps par la constante de temps d'étalonnage de l'appareil.

IV-3-2 LA COULEUR :

La couleur d'une huile isolante est déterminée en lumière transmise, et exprimée par un indice obtenu par comparaison avec une série de couleurs de verres étalons. L'étalon de couleur correspondant, ou celui dont la couleur est juste supérieure, est pris comme valeur de couleur.

L'appareil utilisé s'appelle colorimètre[28].

IV-3-3 L'ACIDITE :

La mesure de l'acidité a été réalisée par un procédé simple et chimique : la neutralisation.

L'acidité est exprimée en mg de KOH par g d'huile, c'est à dire le nombre de mg d'une solution de Potasse alcoolique de normalité 0.1, nécessaire pour neutraliser une gamme d'huile à essayer.

Elle se calcule par l'équation suivante :

$$LA=0.1M_1 V/M$$

ou :

0.1 : normalité de la solution KOH (g/l).

M_1 : masse moléculaire de la solution KOH (g/moles).

M : masse d'huile (g).

V : volume en ml de KOH nécessaire pour avoir la neutralisation .

IV-3-4 MESURE DE LA TENEUR EN EAU :

La teneur en eau est mesurée par un appareil numérique, celui-ci est branché à un tube contenant une solution chimique. On injecte un volume d'huile dans ce tube d'essai et en introduit comme donné, le volume d'huile injecté. Après quelques instants, l'appareil affiche la teneur en eau en p.p.m (en poids ou en volume) après spécification de la densité de l'huile[29].

IV-4 ESSAIS DE VIEILLISSEMENT THERMIQUE DE L'HUILE :**IV-4-1 MODE OPERATOIRE :**

Avant l'essai de vieillissement de l'huile, les flacons en verre sont nettoyés, puis séchés dans une étuve à 110°C pendant une heure, afin d'éliminer toute trace d'impuretés et d'humidité [30]. Les flacons nettoyés sont remplis d'huile pour essais (huile neuve), et bouchés par des bouchons en liège entourés d'une feuille d'aluminium.

Ces flacons ont été misent dans deux étuves réglées à deux températures différentes, l'une à 80°C, et l'autre à 120°C, la durée totale de vieillissement est de 1500 heures.

IV-4-2 CONDUITE DES ESSAIS :

Une séries de mesures est obtenue, en faisant prélever des échantillons de l'huile pour les deux températures d'essai, et on mesure pour chaque fois.

IV-5 ANALYSE DES GAZ DISSOUS PAR CHROMATOGRAPHIE EN PHASE GAZEUSE :

IV-5-1 OBJECTIF FONDAMENTAL DE LA CHROMATOGRAPHIE :

La chromatographie en phase gazeuse est une méthode de séparation des composés gazeux ou susceptibles d'être vaporisés par chauffage sans décomposition. Elle permet aussi l'analyse de mélanges éventuellement très complexes dont les constituants peuvent différer d'une façon considérable par leur nature et leur volatilité [31].

IV-5-2 PRINCIPE DE LA METHODE :

L'analyse par chromatographie en phase gazeuse des gaz dissous dans l'huile a été effectué à l'aide d'un chromatographe de marque GIRDEL.

Les gaz dissous dans l'huile ne peuvent pas être séparés sur un même appareil, les principales caractéristiques de ces chromatographes sont :

1^{ère} chromatographe :

Il permet de détecter les gaz suivants : N_2 , O_2 , CO_2 , CO .

La description de ce chromatographe est donnée en Annexe 2.

2^{ème} chromatographe :

C'est pour la séparation des hydrocarbures C_1 , C_3 .

3^{ème} chromatographe : Annexe 3

C'est pour la séparation de l'hydrogène.

IV-5-3 ANALYSE DES CHROMATOGRAMMES :

Il faut chercher les résultats expérimentaux qui assurent une bonne séparation des pics. Deux types d'analyses sur le chromatogramme peuvent intervenir :

1- Analyse qualitative :

L'identification qualitative des chromatogrammes se fait par comparaison des grandeurs de rétention de l'huile à des étalons de composition parfaitement connues.

2- Analyse quantitative :

Une fois l'identification qualitative des différents composants dans l'échantillons d'huile est faite, on suit les étapes suivantes pour le calcul de leur concentration [9] :

-mesure de l'aire des pics.

-calcul des coefficients de proportionnalité.

CHAPITRE V

Résultats et interprétations

V-1-INTRODUCTION :

Nous présentons en première partie les résultats expérimentaux sur l'évolution de quelques caractéristiques de l'huile neuve. Celles ci concernent l'influence de la température sur le facteur de pertes diélectriques, la permittivité relative et la résistivité, ainsi que la détermination de la rigidité diélectrique, l'indice d'acidité, la teneur en eau, la couleur et la viscosité cinématique.

En seconde partie, nous nous intéressons à l'évolution de ces caractéristiques sous l'influence du vieillissement thermique.

V-2-PROPRIETES DE L'HUILE NEUVE :

V-2-1 PFACTEUR DE PARTES DIELECTRIQUE $\text{tg}(\delta)$:

Le facteur de pertes diélectrique augmente en exponentiel en fonction de la température. Ce résultat est similaire à celui obtenu par d'autres auteurs[24]. Cette évolution est due à une augmentation de la mobilité des porteurs de charges et à l'augmentation du nombre des porteurs de charges par une grande dissociation thermique, ce qui engendre des courants de fuite (Figure V-1)

V-2-2 PERMITTIVITE RELATIVE ϵ_r :

La permittivité relative ϵ_r décroît faiblement avec la température, c'est par ce qu'elle est une caractéristique de constitution (.Figure V-2).

V-2-3 LA RESISTIVITE ρ :

La résistivité décroît en fonction de la température (Figure V-3). Ce décroissement est dû au transfert de charges qui accompagne l'augmentation de la température.

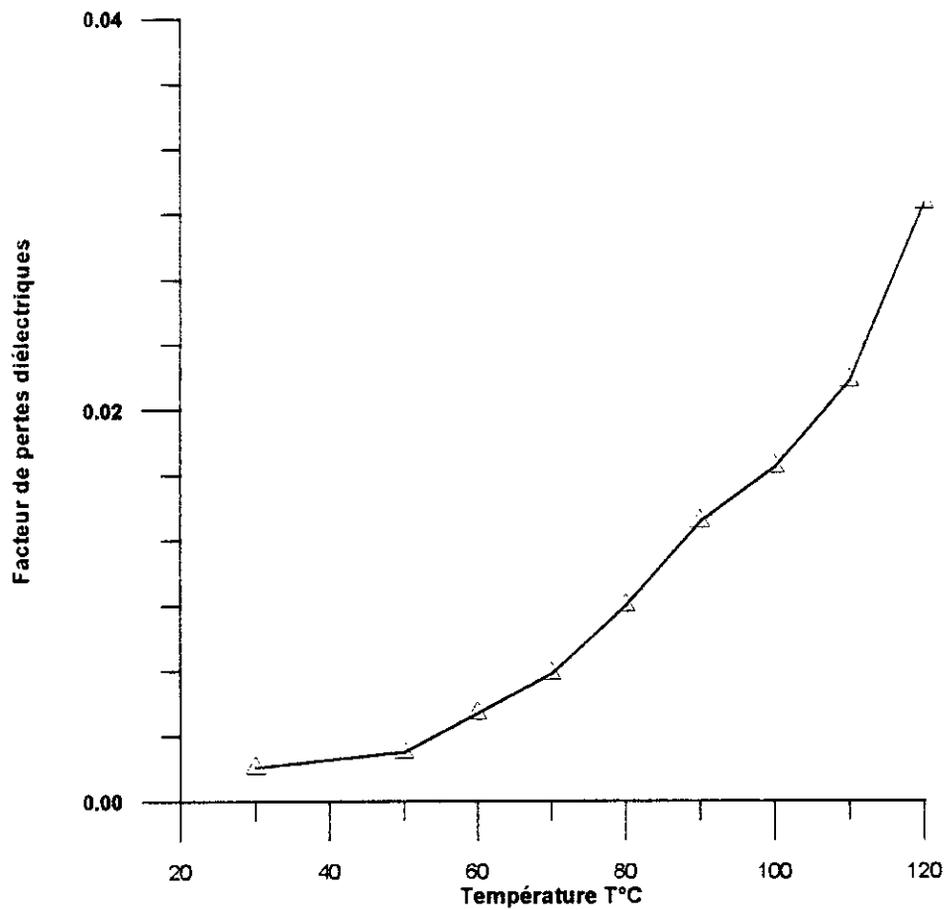


Figure V-1 : Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la température

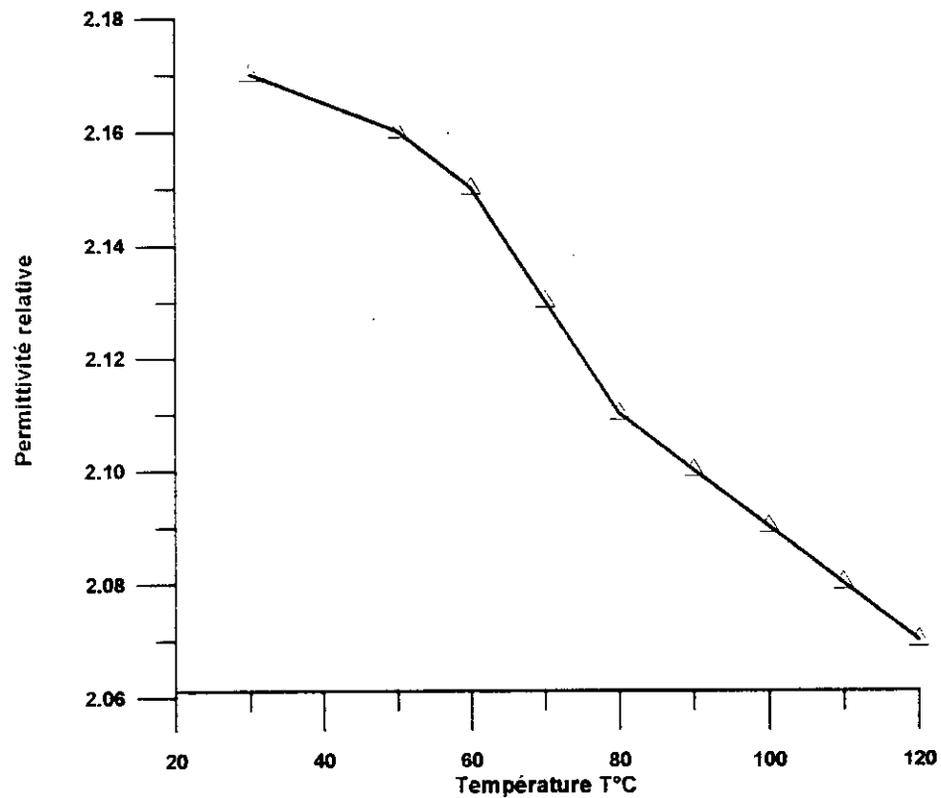
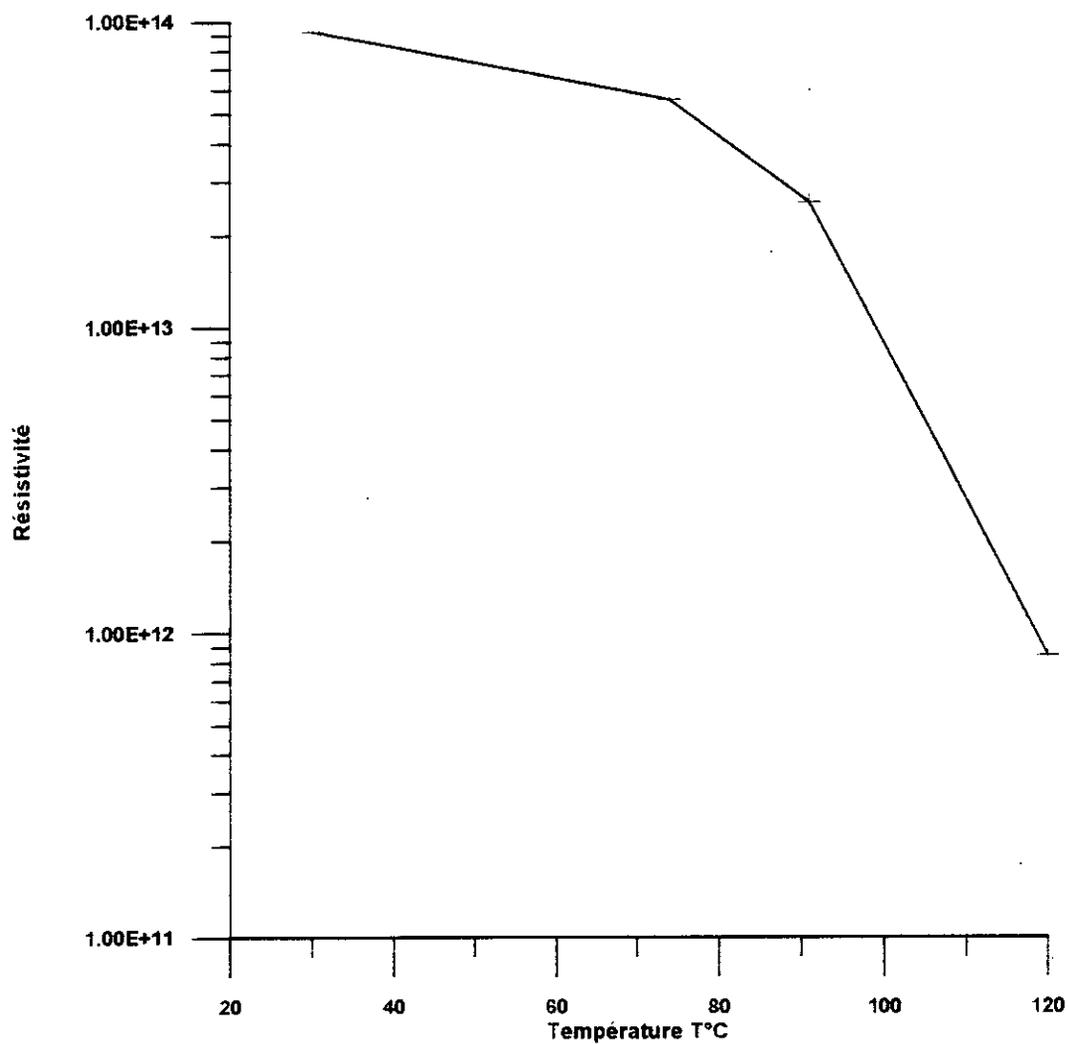


Figure V-2 : Variation de la permittivité relative en fonction de la température



FigureV-3 : Variation de la résistivité en fonction de la température

V-2-4 RIGIDITE DIELECTRIQUE :

A l'état neuve, toutes les huiles avaient une tension de claquage comprises entre 49 et 84 kV [32].

La valeur de la tension de claquage de l'huile BORAK 22 neuve est de 51kV, elle correspond a une valeur de la rigidité diélectrique de 235 kV /cm.

V-2-5 ACIDITE

L'indice d'acidité de l'huile neuve utilisée est très faible, à savoir 0.026 mg KOH / g d'huile. Cette acidité reflète l'existence de composés organiques acides inhérents à la constitution chimique de l'huile.

V-2-6 TENEUR EN EAU :

La mesure de la teneur en eau de l'huile neuve étudiée a donné une quantité d'eau de 30 p.p.m, cette valeur est acceptable [33].

V-2-7 LA COULEUR :

L'indice de couleur de l'huile neuve est 1, cette huile contient une fraction minime de la fonction aromatique.

En effet, la couleur caractérise la constitution chimique de l'huile en hydrocarbures.

V-2-8 VISCOSITE CINEMATIQUE :

La viscosité cinématique, correspondant à une température fixe, est donnée par :

$$V = C \cdot t$$

C : constante de temps d'étalonnage de l'appareille .

t : temps d'écoulement en secondes.

Pour notre essai : $C = 0.04787$, $t = 262$ sec.

D'où $V = C \cdot t = 12.54$ CST

V-3 INFLUENCE DU VIEILLISSEMENT THERMIQUE SUR LES PROPRIETES DE L'HUILE :

V-3-1 FACTEUR DE PERTES DIELECTRIQUES :

Après 1500 heures de vieillissement sous deux températures 80°C et 120°C , les résultats concernant la variation du facteur de pertes diélectriques $\text{tg}(\delta)$ en fonction du temps sont respectivement représentés par les figures V-4, V-5.

D'après ces deux courbes, on remarque que le facteur de pertes diélectriques $\text{tg}(\delta)$ augmente au cours du vieillissement thermique.

Cette augmentation s'explique par la formation de produits d'oxydation accélérées par des températures élevées au cours du vieillissement.

La figure V-8 ci-dessous, rassemble les variations de pertes diélectriques $\text{tg}(\delta)$, en fonction de la température avant et après vieillissement.

Dans le cas des trois types d'huile (neuve, vieillie à 80°C , vieillie à 120°C), le facteur de pertes diélectriques augmente en exponentiel en fonction de la température.

Nous remarquons par ailleurs que le vieillissement de l'huile à 80°C et à 120°C , engendre une augmentation du facteur de pertes diélectriques par rapport à l'huile neuve, cette augmentation est considérable pour l'huile vieillie à 120°C .

Pour les température élevées, l'huile vieillie à 120°C marque un net écart par rapport à l'huile vieillie à 80°C . D'où l'intérêt de la mesure de $\text{tg}(\delta)$ à 90°C [24].

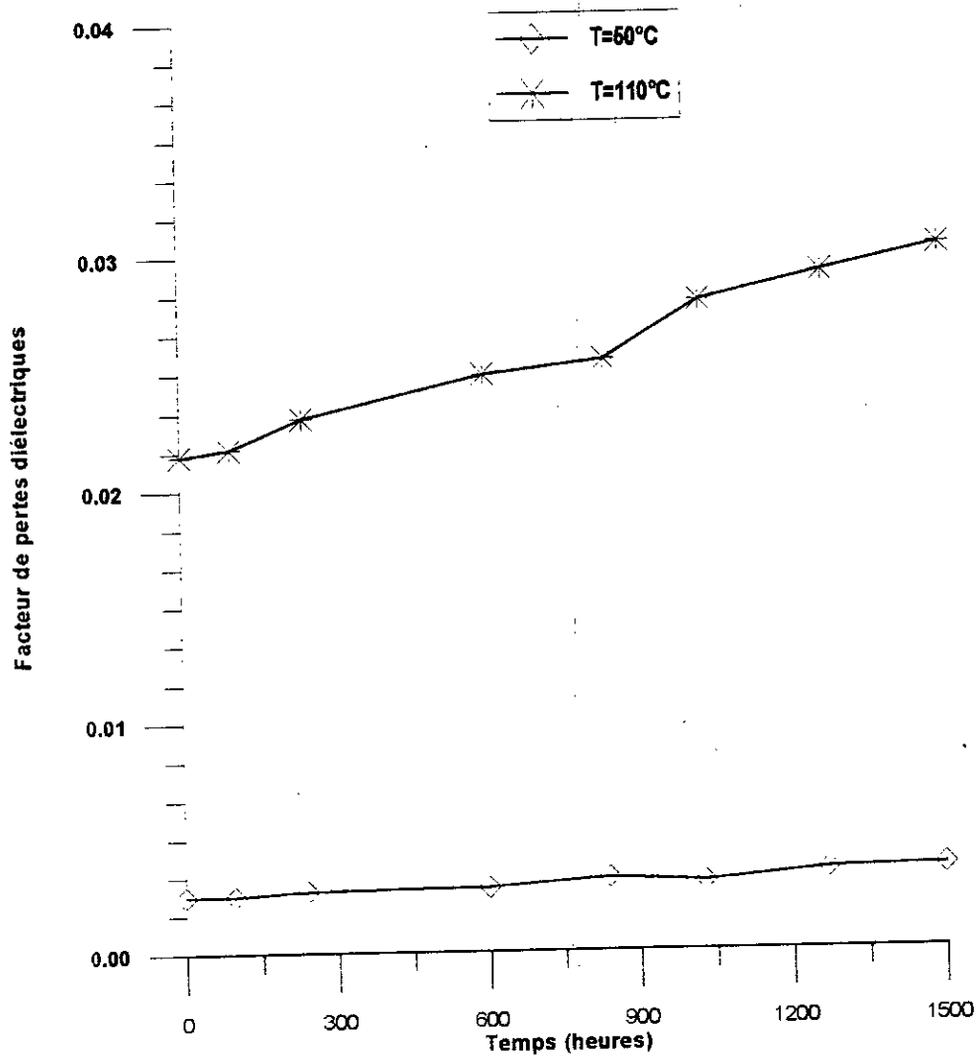


Figure V-4 : Évolution du facteur de pertes diélectriques durant le vieillissement à $T=80^{\circ}\text{C}$.

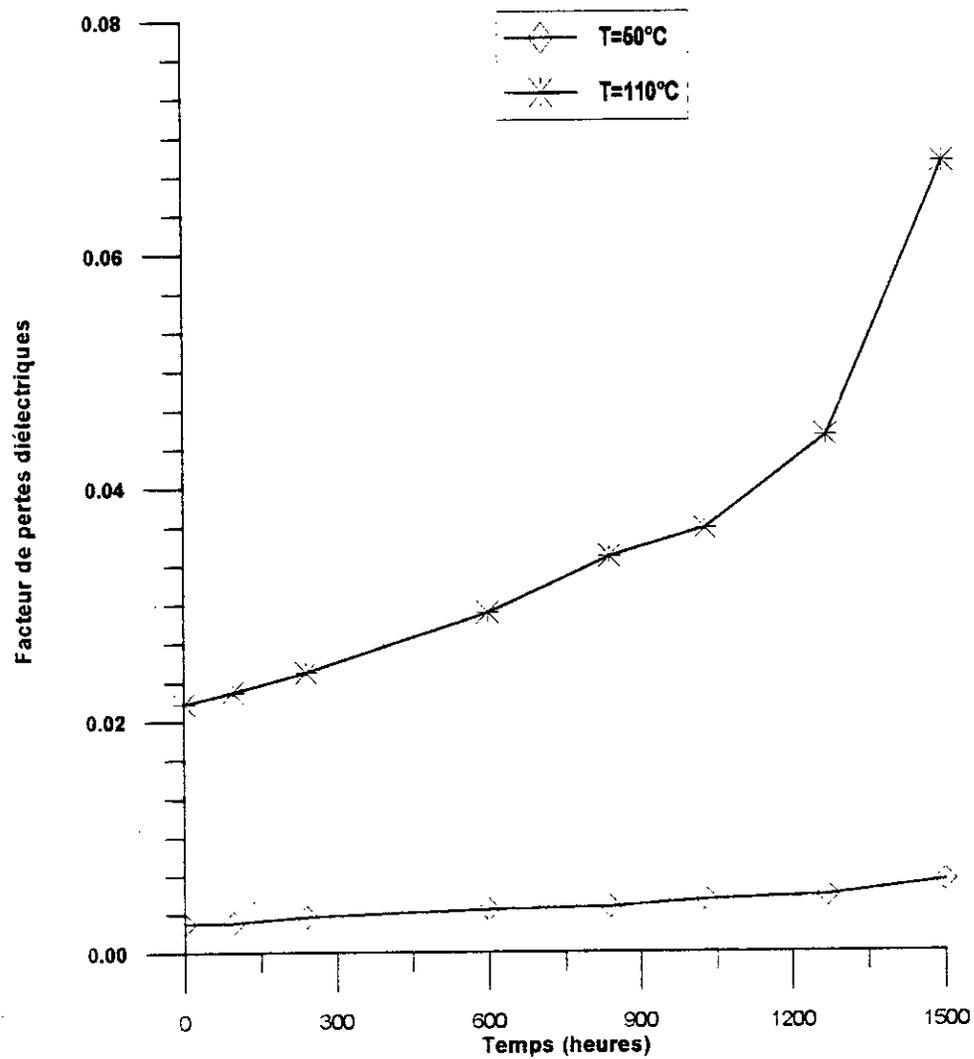
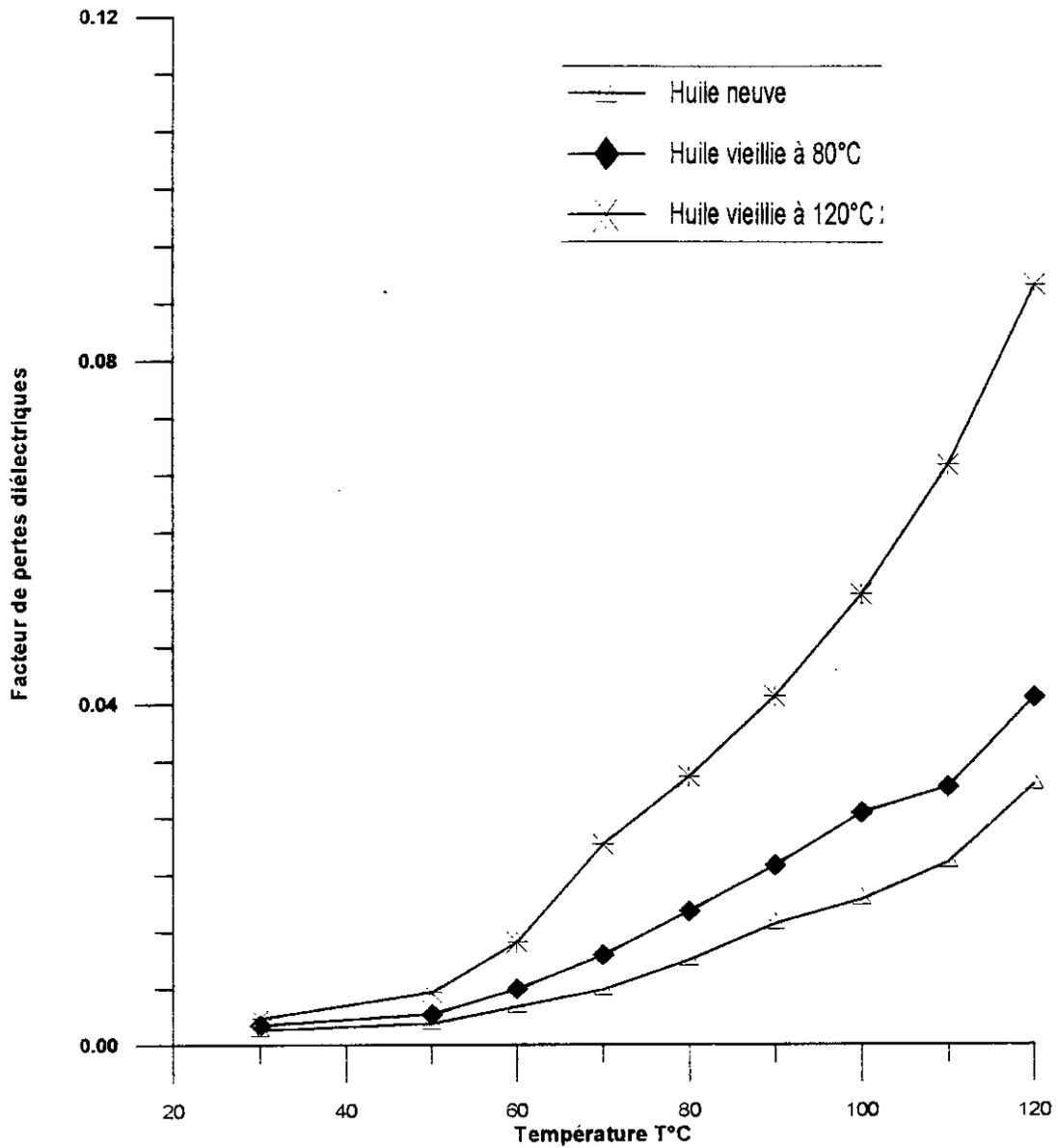


Figure V-5 : Évolution du facteur de pertes diélectriques durant le vieillissement à $T=120^{\circ}\text{C}$.



FigureV-6 : Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la température avant et après vieillissement

V-3-2 PERMITTIVITE RELATIVE ϵ_r :

Les résultats concernant les variations de la permittivité relative durant le vieillissement thermique à 80°C et 120°C sont représentés par les figures V-7, V-8.

D'après ces deux courbes, on remarque que la permittivité relative ϵ_r subit une très faible variation durant le vieillissement.

La figure V-9 représente la variation de la permittivité relative de l'huile vieillie à 80°C et à 120°C sont très faibles par rapport à celle de l'huile neuve. Ce qui confirme que la permittivité relative est une caractéristique de constitution.

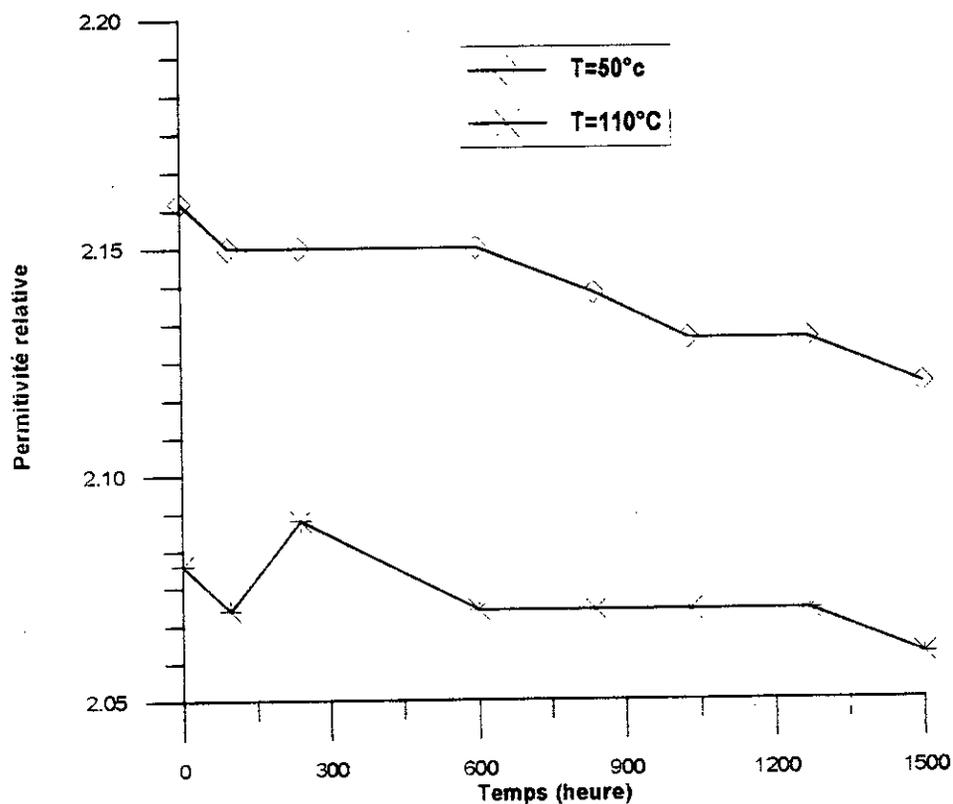


Figure V-7 : Évolution de la permittivité relative ϵ_r durant le vieillissement à T=80°C.

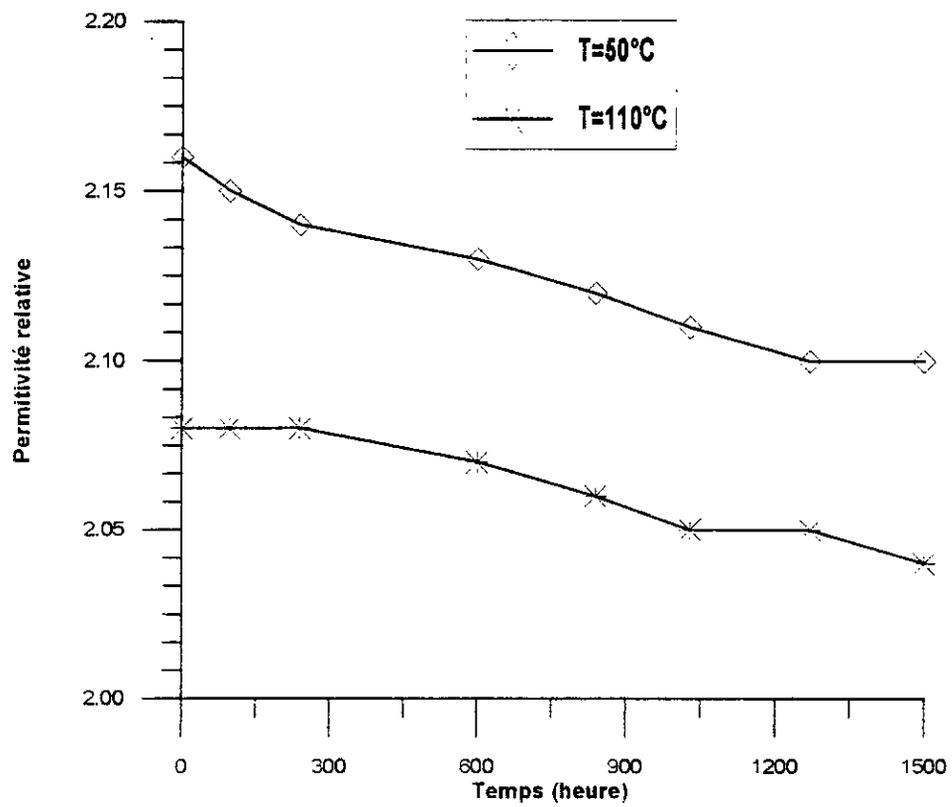
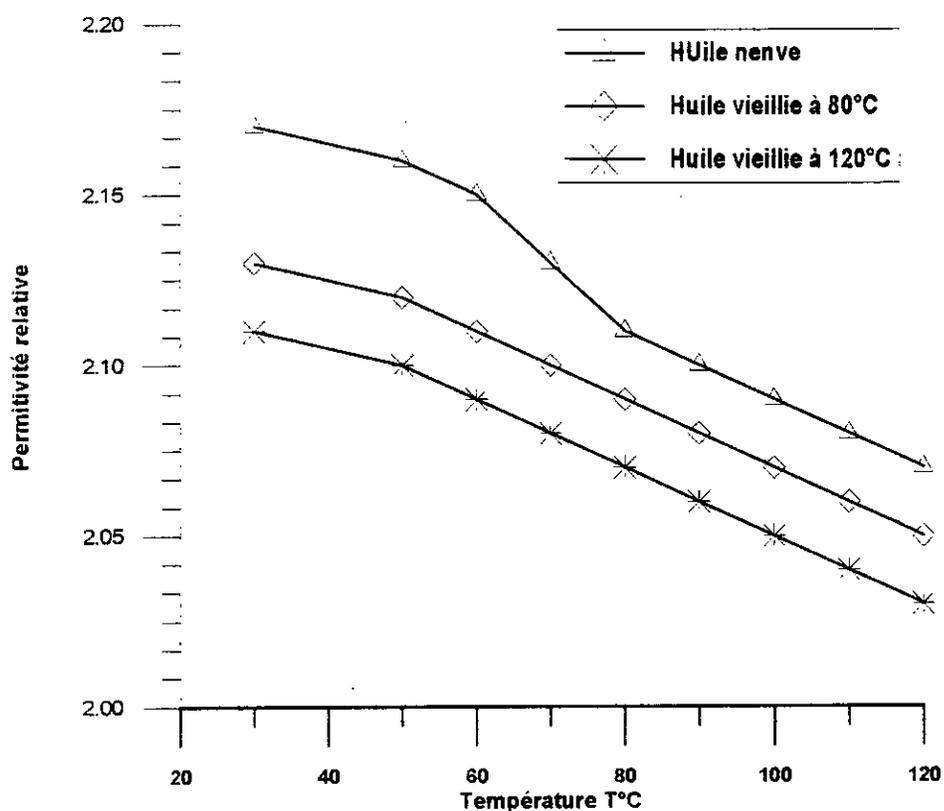


Figure V-8 : Évolution de la permittivité relative ϵ_r durant le vieillissement à $T=120^\circ\text{C}$.



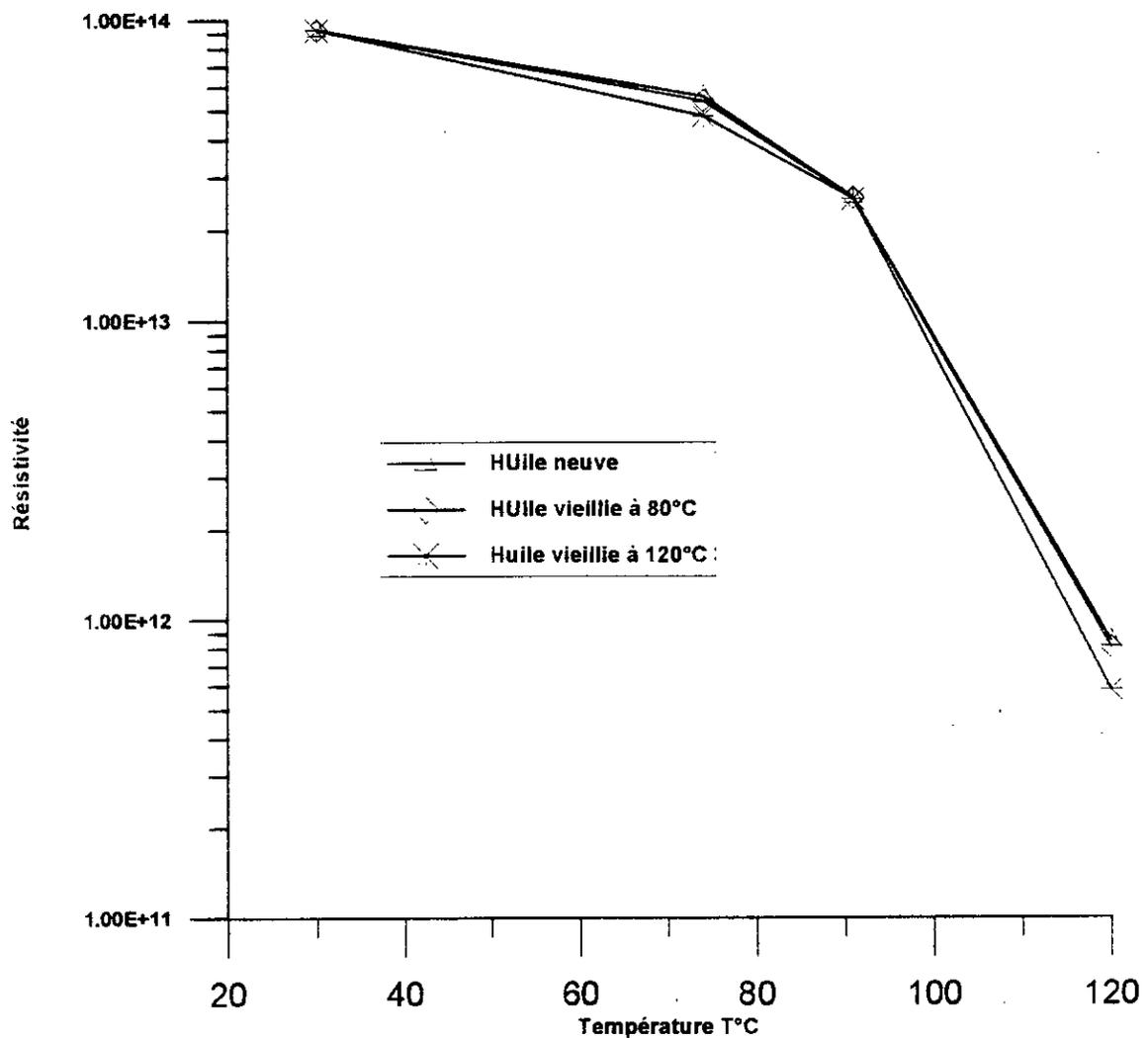
FigureV-9 : Variation de la permittivité relative en fonction de la température avant et après vieillissement

V-3-3 RESISTIVITE ρ :

La variation de la résistivité des trois huiles (neuve, vieillie à 80°C, vieillie à 120°C) en fonction de la température est représentée par la figure V-10.

On observe une diminution de la résistivité ρ en fonction de la de la résistivité avec l'augmentation de la température, et cela, pour des trois états de l'huile.

Toutefois, la résistivité de l'huile vieillie à 120°C est inférieure à celle de l'huile vieillie à 80°C.



FigureV-10 : Variation de la résistivité en fonction de la température avant et après vieillissement

V-3-4 RIGIDITE DIELECTRIQUE :

Les mesures obtenues pour la rigidité diélectrique des trois états d'huiles : neuve, vieillie à 80°C et vieillie à 120°C sont représentées dans le tableau V-1.

États de l'huile	Tension de claquage (kV)	Rigidité diélectrique(kV/cm)
Neuve	51	235
Vieillie à 80°C	51	235
Vieillie à 120°C	49	225

Tableau V-1 : Tension de claquage de l'huile avant et après vieillissement .

Après vieillissement, le tension de claquage diminue pour T=120°C, cela est dû à la vaporisation de l'eau sous température élevée, ce qui n'est pas le cas pour l'huile vieillie à 80°C.

V-3-5 ACIDITE :

On représente dans le tableau V-2 les résultats obtenues pour l'indice d'acidité des trois états d'huiles : neuve, vieillie à 80°C et vieillie à 120°C.

États de l'huile	Indice d'acidité (mgKOH/g)
Neuve	0.026
Vieillie à 80°C	0.046
Vieillie à 120°C	0.108

Tableau V-2 : Indice d'acidité de l'huile avant et après vieillissement .

On relève également une augmentation de l'indice de l'acidité avec le vieillissement de l'huile, cette augmentation est liée aux conditions d'augmentation de l'huile : température de vieillissement, pression, contact avec l'air, présence d'eau. Ces

conditions favorisent les réactions d'oxydations qui donnent naissance à des produits acides.

V-3-6 TENEUR EN EAU :

États de l'huile	Teneur en eau (p.p.m)
Neuve	30
Vieillie à 80°C	31
Vieillie à 120°C	35

Tableau V-3 : Teneur en eau de l'huile avant et après vieillissement .

Le vieillissement thermique de l'huile a provoqué une augmentation de la teneur en eau qui est passée de 30 p.p.m pour l'huile neuve à 31 p.p.m pour l'huile vieillie à 80°C, et à 35 p.p.m pour l'huile vieillie à 120°C (Tableau V-3).

La présence de cette eau, en quantité différente pour les deux températures de vieillissement, peut être la conséquence du contact de l'huile avec l'atmosphère, ou le produit d'une oxydation de l'huile selon la réaction suivante :



V-3-7 COULEUR :

États de l'huile	Indice de couleur
Neuve	1
Vieillie à 80°C	1
Vieillie à 120°C	3

Tableau V-4 : Indice de couleur de l'huile avant et après vieillissement .

1 : blanc pur

3 : citron pâle

L'évolution de l'indice de couleur de 1 à 3 pour l'huile vieillie à 120°C est due à l'oxydation de l'huile en service qui a pour conséquence la formation des produits acides, et de la mise en solution des pigments de matériaux incompatibles (Tableau V-4).

Pour l'huile vieillie à 80°C, la petite formation des produits acides n'influe pas sur l'indice de couleur.

La couleur de l'huile devient plus foncée après vieillissement.

V-3-8 VISCOSITE CINEMATIQUE :

Les résultats obtenus sont représentés au tableau V-5.

États de l'huile	Viscosité cinématique (CST)
Neuve	12.54
Vieillie à 80°C	12.54
Vieillie à 120°C	12.49

Tableau V-6 : Viscosité cinématique de l'huile avant et après vieillissement .

La viscosité cinématique calculée est presque constante durant le vieillissement. La pollution de l'huile, et les produits oxydes, ont pour effet un ralentissement de l'écoulement de l'huile, ce qui augmente le temps d'écoulement et par conséquent la viscosité cinématique.

Pour les basses températures (telles que 40°C), il n'y a pas de formation d'oxydes, ni d'influence de polluants extérieurs, d'où la viscosité reste constante.

V-4 ANALYSES CHROMATOGRAPHIQUES :**V-4-1 METHODES D'ANALYSE :**

Les analyses sont effectués en trois opérations distinctes :

1- DOSAGE DE CO₂, O₂, CO :

La méthode consiste à utiliser deux colonnes en série : l'une de 4 mm de diamètre et de 2.70 m de longueur, remplie de silicagel et maintenue à 150°C, l'autre de 6mm de diamètre et de 3.3 m de longueur remplie de tamis moléculaire 13X et maintenue à température ambiante.

Les colonnes sont parcourues par de l'hélium comme gaz vecteur avec un débit de 40 mm par minute. Le détecteur est un catharomètre.

2- DOSAGE DE H₂ :

L'hydrogène est séparé des autres gaz sur deux colonnes de tamis moléculaire 5A de 5m de longueur et 3 mm de diamètre, montées en parallèle à une température de 50°C, avec un catharomètre comme détecteur, et on utilise l'argon comme gaz vecteur.

3- DOSAGE DES HYDROCARBURES C₁ A C₃ :

En ce qui concerne les hydrocarbures de C₁ à C₃, il suffit d'utiliser deux colonnes porapak (T+S) non imprégnées de 2.5 m de longueur et de 3 mm de diamètre, montées en parallèle avec un détecteur à ionisation de flamme et un débit de 25 ml/mn d'hélium.

V-4-2 RESULTATS D'ANALYSE :

L'analyse de l'échantillon d'une huile neuve soumise à des contraintes thermiques (120°C), et ce pendant 500 puis 1500 heures, nous a permet d'obtenir le les résultats suivants :

- 1- absence de l'hydrogène .
- 2- absence des hydrocarbures de c1à c3 .

3- présence de l'air en quantité considérable et absence de CO et CO₂, ainsi que le montre les chromatogrammes 1 et 2.

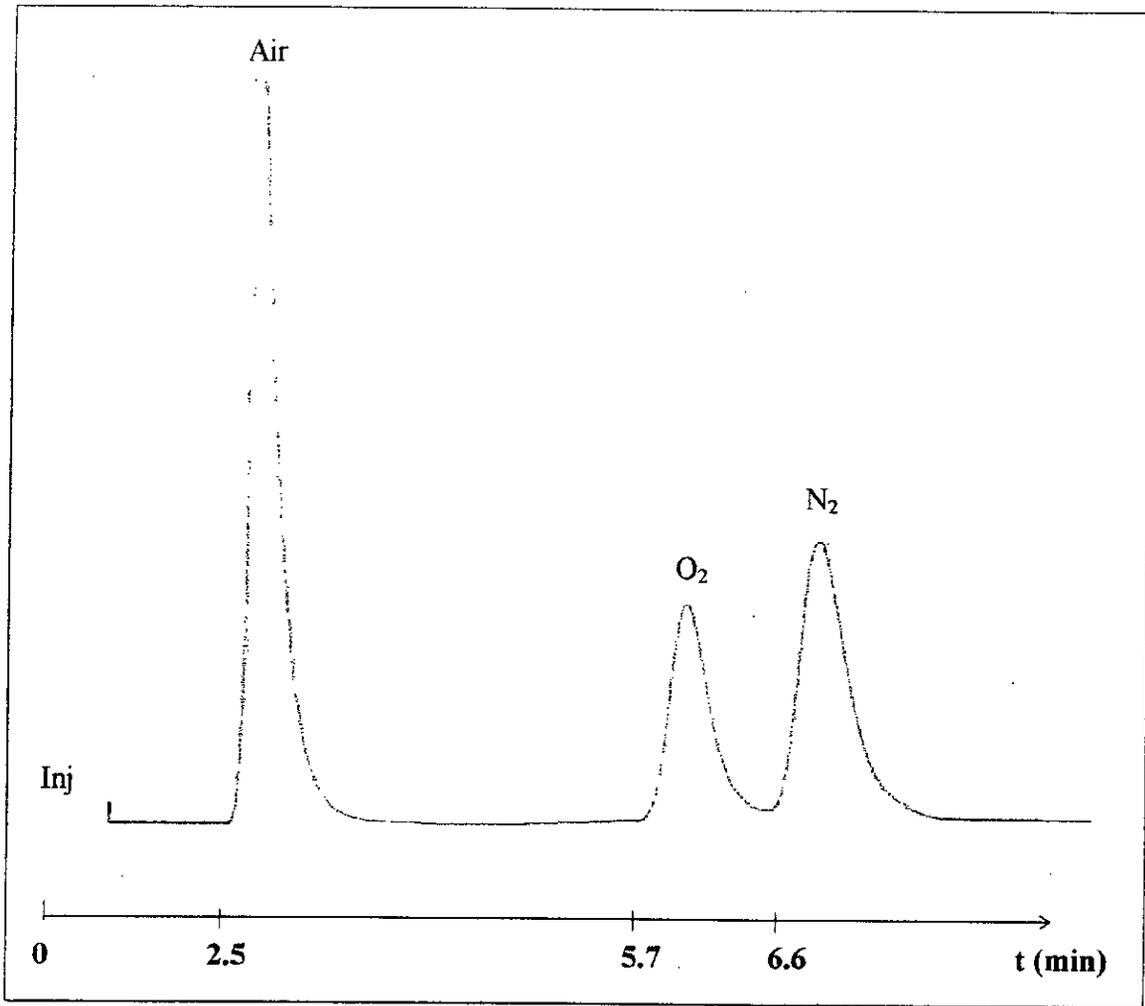
Le tableau ci dessous donne la quantité des différents éléments en mg dans 0.5 cm² d'huile qui a séjourné pendant un temps t sous une contrainte thermique de 120°C.

Les différents éléments	t (heures)	
	500	1500
H ₂	—	—
N ₂	109,34.10 ⁻⁴	512,5.10 ⁻⁴
O ₂	224,4.10 ⁻⁴	523,6.10 ⁻⁴
CO ₂	—	—
CO	—	—
C ₁ à C ₃	—	—

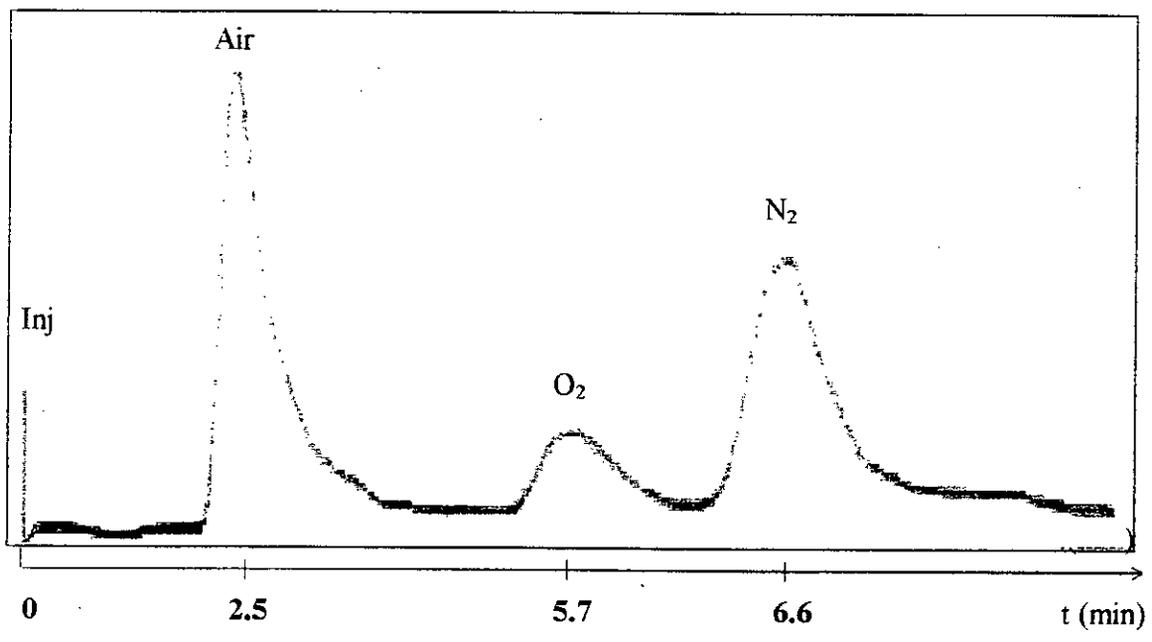
V-4-3- COMMENTAIRE ET CONCLUSION :

On remarque que la quantité d'air dissoute dans l'huile augmente avec le temps de vieillissement, relativement à celle de N₂, la quantité d'eau dissoute augmente. Ainsi, on peut conclure que l'affinité de l'huile à l'oxygène augmente avec le vieillissement de cette dernière.

On remarque aussi l'absence de H₂, CO, CO₂, et les C₁ à C₃, cela est dû à la condition de vieillissement, car à 120°C la fraction pétrolière lourde qui consiste en un autre échantillon n'a pas subi d'altération moléculaire.



Chromatogramme N°1 Analyse des gaz dissous dans une huile neuve, vieillie thermiquement pendant 1500 heures



Chromatogramme N°2 Analyse des gaz dissous dans une huile neuve, vieillie thermiquement pendant 500 heures

V-4 CONCLUSION :

L'analyse des résultats obtenus nous amène à tirer les conclusions suivantes :

- ◆ Les propriétés électriques de l'huile (Facteur de pertes diélectriques, permittivité relative, résistivité) dépendent de la température.
- ◆ Le facteur de pertes diélectriques $\text{tg}(\delta)$ varie en exponentiel en fonction de la température.
- ◆ La permittivité relative diminue lorsque la température augmente.
- ◆ La résistivité décroît en fonction de la température .

En ce qui concerne le vieillissement thermique de l'huile les résultats confirment une variation de ces caractéristiques électriques et quelque caractéristique physico-chimique de l'huile vieillie, et surtout pour celle vieillie à la température la plus élevée.

Ces variation se traduisent notamment par l'élévation de $\text{tg}(\delta)$, et l'indice d'acidité, et autres tel que la teneur en eau, et la couleur.

Par ailleurs, la résistivité, la rigidité diélectrique ne subit pas une grande variation et particulièrement pour la température ambiante.

L'analyse chromatographique de l'huile vieillie a indiqué l'absence de l'hydrogène et des hydrocarbures dans l'huile, avec une présence d'air en quantité considérable

Conclusion

générale

CONCLUSION GENERALE :

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile de transformateur, et leur évolution en fonction du temps de vieillissement.

Ainsi, on a vu l'influence de la température sur les principales propriétés de l'huile.

Nous avons constaté l'effet de la température, qui a pour conséquences l'augmentation du facteur de pertes diélectriques $\text{tg}(\delta)$, et la diminution de la résistivité ρ .

Le vieillissement thermique nous a permis de remarquer une dégradation des propriétés diélectriques et physico-chimiques de l'huile.

Nous avons obtenu une augmentation du facteur de pertes diélectriques $\text{tg}(\delta)$, de l'indice d'acidité, de la teneur en eau et de l'indice de couleur. Aussi nous avons relevé une faible diminution de la résistivité, de la rigidité diélectrique et de la permittivité relative.

La dégradation serait due à l'apparition de produits de décomposition sous l'influence de la température.

Nous avons obtenu une plus forte dégradation de l'huile à la température la plus élevée.

Par ailleurs, l'analyse des gaz dissous par chromatographie en phase gazeuse, indique l'inexistence des gaz dissous dans l'huile vieillie.

En perspective d'autres travaux peuvent compléter notre étude. Plus particulièrement des essais de vieillissement thermique sous l'effet du champ électrique.

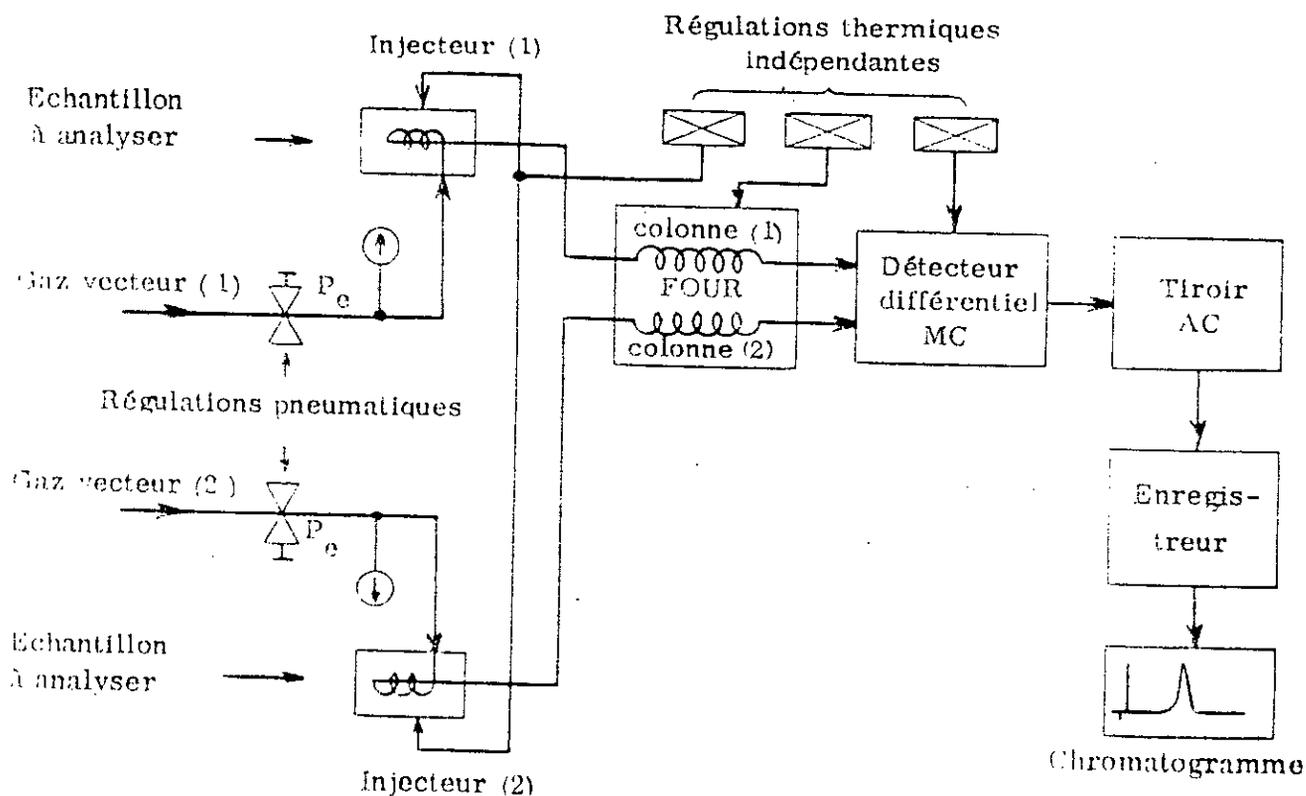
Annexes

Annexe 1

<u>Borak 22</u>			
Caractéristiques physico-chimiques	Normes	Unités	RESULTATS TYPIQUE
Couleur			L1
Densité à 15°C			0.861
Viscosité à 20°C 40 100			34,7 15,28 3,43
Indice de viscosité			97
Point éclair V.O V.C	D92 D93	°C °C	176 170
Point d'aniline	D611	°C	95
INDICE DE NEUTRALISATION	D974	MGKOH/G	0.006
Indice d'acide	CEI 296	Mg KOH/g	-
CORROSION LAMME DE CUIVRE(3H-100°C)	D130		1A
RIGIDITÉ DIELECTRIQUE	CEI	kV	50
INDICE DE NEUTRALISATION		mg KOH/g	0.05
DEPOTS		%PDS	0.25
PRESENCE SOUFRE ACTIF	D 1275		NON CORROSIVE

Cet appareil comprend : (Fig 1 et 2)

- (1) -Un système de sécurité coupant le chauffage du four lors de l'ouverture de la porte.
- (2) -Un détecteur à thermoconductibilité.
- (3) -Un système de sécurité permettant de limiter la température maximale du four.
- (4) -Deux injecteurs 1'8
- (5) -Un emplacement réservé aux vannes de commutation, de "backflush".
- (6) -Un emplacement réservé à une vanne d'introduction l'échantillons gazeux .
- (7 et 8) Deux "façades gaz vecteur" assurant commande et contrôle pneumatiques en amont de chaque injecteur.
- (9) -Un tiroir (RTF-1 ou PTF-6) assurant la régulation thermique et/ou la programmation de température du four.
- (10) -Un tiroir RT-2 de régulations proportionnelles des températures des injecteurs et du détecteur.
- (11) -Un tiroir AC 7 assurant l'alimentation, la commande et le contrôle du détecteur à thermoconductibilité.
- (12) -Une façade de commande générale et de contrôle thermique.



Annexe 3

1. - DESCRIPTION

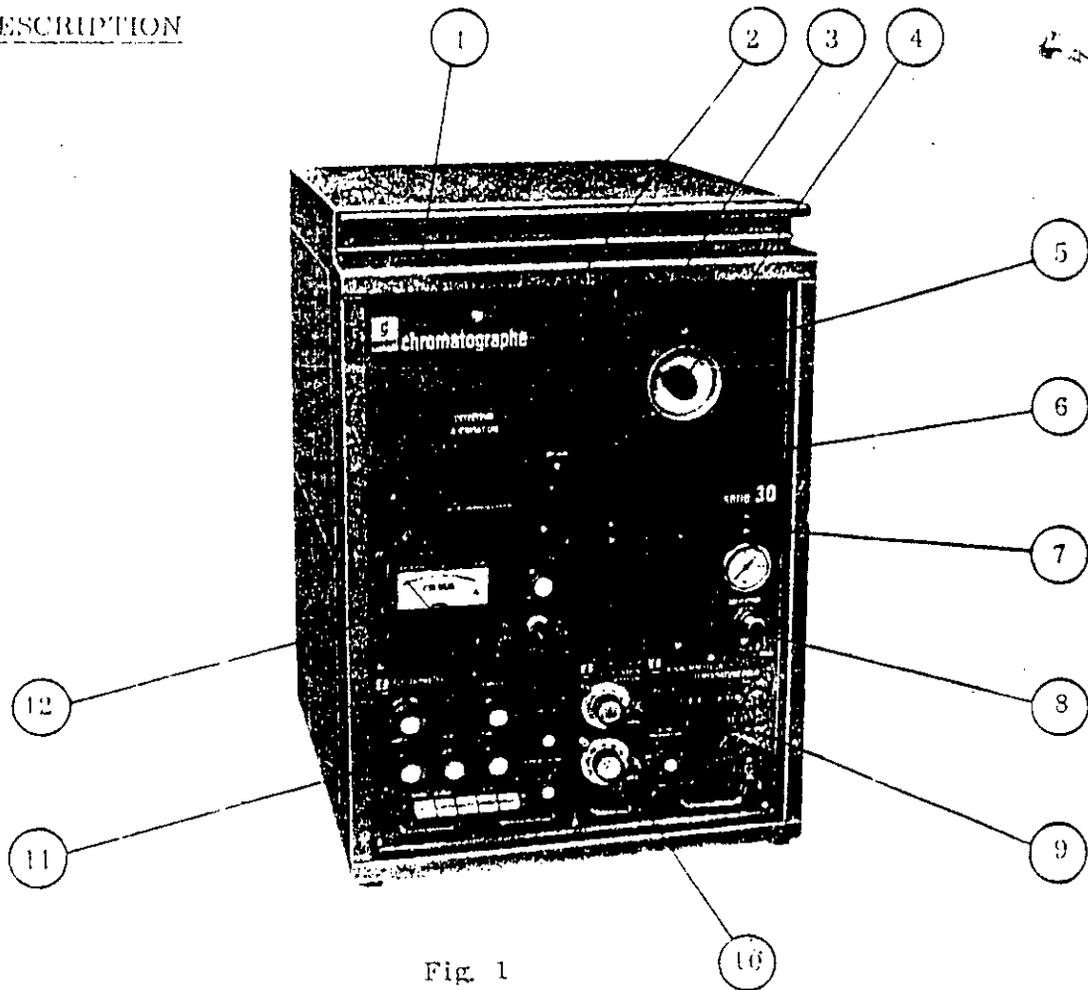
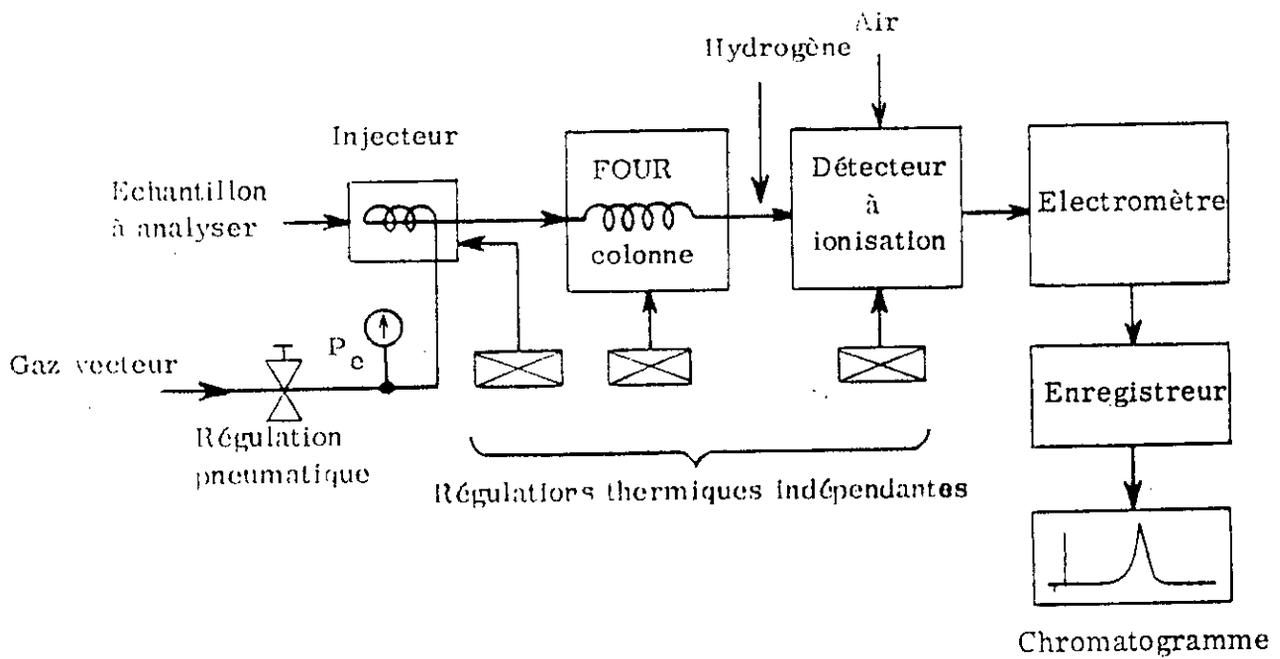


Fig. 1



Cet appareil comprend : (Fig. 1 et 2)

- (1) Un système de sécurité coupant le chauffage du four à l'ouverture de la porte.
- (2) Un détecteur à ionisation de flamme.
- (3) Un système de sécurité permettant de limiter la température maximale du four.
- (4) Un injecteur 1/4".
- (5) Un emplacement réservé aux vannes de commutation "backflush". . .
- (6) Un emplacement réservé à une vanne d'introduction d'échantillons gazeux.
- (7) Une "façade gaz vecteur" assurant commande et contrôle pneumatiques en amont de l'injecteur.
- (8) Un emplacement destiné à recevoir une vanne à vernier pour le réglage de la fuite d'un diviseur d'entrée pour colonne capillaire (voir OPTIONS).
- (9) Un tiroir (PTF-1 ou PTF-6) assurant la régulation thermique et/ou la programmation de température du four.
- (10) Un tiroir RT-2 de régulations proportionnelles des températures de l'injecteur et du détecteur.
- (11) Un électromètre E-2
- (12) Une façade de commande générale et de contrôle thermique.

ANNEXE : TABLEAU DES RESULTATS

• Facteur de pertes diélectriques $\text{tg}\delta$ et permittivité relative :

1- Essai avant vieillissement :

T(°C)	30	50	60	70	80	90	100	110	120
$\text{tg}\delta \cdot 10^4$	17	25	45	65	100	143	171	215	306
ϵ_r	2.17	2.16	2.15	2.13	2.11	2.10	2.09	2.08	2.07

1- HUILE VIELLIE à 80°C

Après 96 heures

T(°C)	30	50	60	70	80	90	100	110	120
$\text{tg}\delta \cdot 10^4$	17	25	47	65	102	147	179	218	312
ϵ_r	2.16	2.15	2.14	2.13	2.11	2.10	2.09	2.07	2.07

Après 240 heures

T(°C)	30	50	60	70	80	90	100	110	120
$\text{tg}\delta \cdot 10^4$	18	27	52	73	107	158	187	231	327
ϵ_r	2.16	2.15	2.14	2.13	2.13	2.11	2.10	2.09	2.07

Après 600 heures

T(°C)	30	50	60	70	80	90	100	110	120
$\text{tg}\delta \cdot 10^4$	20	28	57	80	118	151	202	249	346
ϵ_r	2.15	2.14	2.13	2.12	2.10	2.09	2.08	2.07	2.06

Après 840 heures

T(°C)	30	50	60	70	80	90	100	110	120
$\text{tg}\delta \cdot 10^4$	19	32	55	86	133	167	211	255	353
ϵ_r	2.15	2.14	2.13	2.12	2.10	2.09	2.08	2.07	2.06

Après 840 heures

T(°C)	30	50	60	70	80	90	100	110	120
tgδ.10 ⁴	21	39	61	96	153	195	249	341	425
ε _r	2.13	2.12	2.11	2.10	2.09	2.08	2.07	2.06	2.05

Après 1030 heures

T(°C)	30	50	60	70	80	90	100	110	120
tgδ.10 ⁴	25	45	79	132	175	227	287	365	478
ε _r	2.12	2.11	2.10	2.09	2.08	2.07	2.06	2.05	2.04

Après 1270 heures

T(°C)	30	50	60	70	80	90	100	110	120
tgδ.10 ⁴	26	49	88	164	199	279	376	445	623
ε _r	2.11	2.10	2.10	2.09	2.08	2.07	2.06	2.05	2.04

Après 1500 heures

T(°C)	30	50	60	70	80	90	100	110	120
tgδ.10 ⁴	31	62	121	236	315	409	528	679	889
ε _r	2.11	2.10	2.09	2.08	2.07	2.06	2.05	2.04	2.03

• Résistivité (ρ) : Avant et après vieillissement.

T(°C) / ρ(Ω.cm)	30	74	91	120
Huile neuve	9.27.10 ¹³	5.6.10 ¹³	2.58.10 ¹³	0.085.10 ¹³
Huile vieillie à 80°C	9.27.10 ¹³	5.4.10 ¹³	2.57.10 ¹³	0.081.10 ¹³
Huile vieillie à 120°C	9.26.10 ¹³	4.8.10 ¹³	2.55.10 ¹³	0.058.10 ¹³

**Références
bibliographiques**

[1] N. KHALECHE

Rupture par arborescence électrique du PVC vieilli thermiquement

Thèse de magister ENP, 1993.

[2] R. KATAN

Étude de la formation et de la dynamique de bulles dans les hydrocarbures liquides générés par les impulsions de courant en champ électrique intense

Thèse d'état, université J,Fourier,Grenoble 1,Novembre 1990.

[3] R. TOBAZEON

Liquides diélectriques : préclaquage et claquage

Techniques de l'ingénieur D226 ,1986.

[4] N.FELICI , B.GOSSE , JP. GOSSE

Conduction dans les diélectriques liquides : idées modernes et progrès récents .Aspect électrochimique et electrohydrodynamique .

RGE, novembre 1976,t 85 ,n°11.

[5] A. HAMIMI

Contribution a l'étude des Phénomènes de préclaquage dans une huile de transformateur sous champ alternatif divergent .

Thèse de magister ,ENP, Octobre 1997.

[6] A. BOUBAKEUR

Claquage des diélectriques liquides .

Cours (Haute tension , 4^{eme} année)

[7] S. BOUAZABIA

Contribution a l'étude de la génération des bulles gazeuses en champ divergent .
Thèse de magister ,ENP, mai 1991.

[8] F.GUERBAS

Étude de la génération des bulles gazeuses dans les diélectriques liquides et leur transition en steamer. Thèse de magister ,ENP, mai 1994.

[9] M.BROURI D. OUAKLI

Propriétés diélectriques de l'huile de transformateur en présence des gaz dissous
Projet de fin d'étude , Génie électrique , juillet 1997.

[10] A. BEROUAL

Phénomènes de propagation et de génération des streamers dans les diélectriques liquides en géométrie pointe- plan sous créneau de tension .
Thèse d'état , Grenoble , janvier 1987.

[11] N.GIAO TRINH A. SAKER

Interprétation of the direct breakdown mechanism in long gaps in transformer oil.
10^e symposium international d'ingénierie haute tension .

[12] M. KOSTEINKO L. PIETRONSKI

« Machines électriques T₁ » Ed Mir,1976 pp 370 .400.

[13] B. HOCHART

« Le transformateur de puissance » 2^{ème} Ed ,1988 pp,70,85 198-215.

[14] R. BACHR

Application de matériaux nouveaux au transformateur de puissance
CIGRE , 1986, vol 1,rapport 12-09.

[15] AR . VON HIPPEL

« Les diélectriques et leur applications » Dunod 1961 ,pp.192-197.

[16] P. VUARCHEX

Huiles et liquides isolants. Techniques de l 'ingénieur , D230

[17] R.FOURNIE

« Les isolants en électrotechnique, essais mécanismes de dégradation applications industrielles » , Ed Eyrolles ,paris ,1990.

[18] Circulaire interministérielle du 04/12/85. (suivie de décret de 1987 pour PCB)

[19] R. FOURNIE

« Les isolants en électrotechnique, concepts et théories » Eyrolles, 1986.

[20] P. VUARCHEX

Techniques de l'ingénieur D231

[21] J. VERDU

« vieillissement des plastiques » Eyrolles , 1984.

[22] SM. SEKHRI K. NOUASRI

Influence du vieillissement sur l'apparition des décharges partielle dans un câble MT isolé au PRC.

Projet de fin d'étude, ENP, juin 1995.

[23] M. NEDJAR A. BOUBAKEUR R. KHAILI

Étude des propriétés électriques du polychlorure de vinyle avant et après vieillissement thermique. Journal of technologie , Novembre 1994.

- [24] Recommandation CEI 250 : Méthodes recommandées pour la détermination de la permittivité et du facteur de dissipation des isolants électriques aux fréquences industrielles, audibles et radioélectriques Ed 1969.
- [25] Recommandation CEI 156 : Isolants liquides : détermination de la tension de claquage à fréquence industrielles, méthodes d'essai ,Ed 1995.
- [26] Recommandation CEI 247 : Cellules recommandées pour la mesure de la résistivité des liquides isolants et technique de nettoyage des cellule, Ed 1967.
- [27] Norme NFT 60-100
- [28] Recommandation ISO 2049 : Produits pétroliers - détermination de la couleur (échelle ASTM), 2^{ème} Ed 1996.
- [29] Norme ISO R 760.
- [30] Recommandation CEI 475.
- [31] J.Tranchant : Manuel pratique de chromatographie en phase gazeuse, 3^{ème} Ed. Masson, 1982.
- [32] NFC 27 221
- [33] NFC 27 101 : Spécification des huiles minérales.