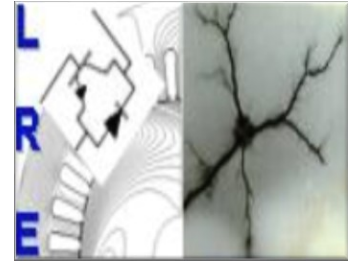


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Electrotechnique

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire de projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Intitulé :

Influence des impuretés sur le comportement de l'huile de transformateurs

Sous la direction de Pr.A.MEKHALDI et Pr.A.BOUBAKEUR

Réalisé par

BAKIR Naim & HAMOUCHE Toufik

Présenté et soutenu publiquement le 13 juin 2017

Devant le jury composé de :

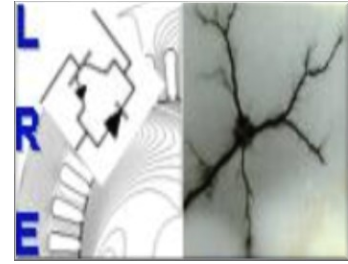
Président : A. TEGUAR, Professeur à l'ENP
Rapporteurs : A. MEKHALDI, Professeur à l'ENP
A. BOUBAKEUR, Professeur à l'ENP
Examineur : Y. BENMAHAMED, Doctorant à l'ENP

ENP 2017

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Electrotechnique

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire de projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Intitulé :

Influence des impuretés sur le comportement de l'huile de transformateurs

Sous la direction de Pr.A.MEKHALDI et Pr.A.BOUBAKEUR

Réalisé par

BAKIR Naim & HAMOUCHE Toufik

Présenté et soutenu publiquement le 13 juin 2017

Devant le jury composé de :

Président : A. TEGUAR, Professeur à l'ENP
Rapporteurs : A. MEKHALDI, Professeur à l'ENP
A. BOUBAKEUR, Professeur à l'ENP
Examineur : Y. BENMAHAMED, Doctorant à l'ENP

ENP 2017

ملخص

نتطرق في هذا العمل إلى التحليل الكروماتوغرافي في الطور الغازي للغازات المتحللة في الزيوت المعدنية المستعملة كعوازل في المحولات الكهربائية، الذي هو وسيلة فعالة وعملية لتحديد تركيز هذه الغازات التي تشكلت نتيجة للتغيرات التي تتعرض لها عوازل المحولات (الزيت والورق). هذا التحليل أثبت جدارته في كونه طريقة ذات مصداقية عالية في تشخيص مختلف أعطاب المحولات. قمنا أيضا في هذه المذكرة بمحاكاة بواسطة برنامج **COMSOL Multiphysics**® من أجل تمثيل ودراسة تأثير وجود الشوائب بمختلف أنواعها في الزيت (أو الهواء) على توزيع الحقل الكهربائي في واجهات عوازل المحركات الكهربائية.

كلمات مفتاحية: الغازات المتحللة، الزيوت المعدنية للمحولات الكهربائية، الحقل الكهربائي، **COMSOL Multiphysics**، الشوائب.

Abstract

Our work is based on the gas chromatographic analysis of gases dissolved in mineral oil of transformers, which is a practical and fast way to determine the concentration of these gases formed as a result of alterations that undergo insulators (oil and paper) transformers. This analysis, in fact, proves to be a powerful method for the diagnosis of transformer dysfunctions. We also carry out a simulation under the **COMSOL Multiphysics**® software to study the influence of the presence of impurities in the oil (or air) on the electric field at the interfaces of the insulation of electric motors.

Key words: Dissolved gases, transformer oil, **COMSOL Multiphysics**, electrical field, impurities.

Résumé

Notre travail se résume sur l'analyse chromatographique en phase gazeuse des gaz dissous dans l'huile minérale de transformateurs, qui est un moyen pratique et rapide pour déterminer la concentration de ces gaz formés à la suite des altérations que subissent les isolants (huile et papier) des transformateurs. Cette analyse, se révèle en effet, comme étant une méthode puissante pour le diagnostic des dysfonctionnements des transformateurs. Nous effectuons aussi dans ce présent mémoire, une simulation sous le logiciel **COMSOL Multiphysics**® afin d'étudier l'influence de la présence des impuretés dans l'huile (ou l'air) sur le champ électrique aux interfaces de l'isolation d'un moteur électrique.

Mots clés : Gaz dissous, huile de transformateurs, **COMSOL Multiphysics**, champ électrique, impuretés.

Remerciements

Nous remercions en premier lieu Dieu, le tout puissant de nous avoir donné la volonté, la santé et le courage de mener à terme ce mémoire.

Nous tenons à exprimer nos remerciements et notre obligeance à M. Abdlouhab MEKHLDI, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, et à M. Ahmed BOUBAKEUR, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique de nous avoir encadré et confié ce sujet et de l'aide précieuse qu'ils nous ont toujours apportée jusqu'à l'achèvement de ce travail. Nous leur sommes profondément reconnaissants pour tous les précieux conseils et leçons scientifiques, leur confiance qu'ils nous ont témoignée et leurs grandes qualités humaines.

Nos remerciements vont également à M. TEGUAR Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, pour avoir fait l'honneur de présider le jury, et à M. BENMAHAMED, Doctorant à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous désirons également remercier, M. TOUHAMI, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger et M. ZEBADJI, Docteur à l'Ecole Nationale Polytechnique pour leur sympathie, leur assistance et précieux conseils.

Nous voulons dire Merci à nos familles pour leurs prières constantes à notre égard et leur soutien tout au long de nos études.

Nous souhaitons exprimer nos sincères reconnaissances à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce modeste travail, trouvez ici le témoignage de notre profonde gratitude.

Dédicaces

A mes très chers parents, Que Dieu les protège.

A mes frères Zahir, Fahem et Karim.

A ma famille et mes chers amis.

A la mémoire des regrettés qui ne sont pas parmi nous aujourd'hui.

A tous ceux qui me sont très chers.

Toufik HAMOUCHE

A ma mère et mon père que Dieu les protège

A mes sœurs et mes frères

A tous mes amis

Naim

SOMMAIRE

Sommaire

Liste des figures

Nomenclatureur

Introduction générale 15

Chapitre I : Matériaux isolants pour transformateurs de puissance

I-1 Introduction 18

I-2 Isolants liquides 18

I-2-1 Rôle des isolants liquides 18

I-2-1-1 Fonction isolation 19

I-2-1-2 Fonction refroidissement 19

I-2-1-3 Autres fonctions..... 19

I-2-2 catégories des isolants liquides 19

I-2-2 -1 Les huiles végétales 20

I-2-2 -2 Les huiles de synthèse 21

I-2-2 -3 Les huiles minérales 21

I-2-3 Caractéristiques des huiles minérales isolantes 21

I-2-3-1 Les propriétés électriques 21

I-2-3-2 Les propriétés chimiques 23

I-2-3-3 Les propriétés physiques 24

I-3 Isolants solides 24

I-3-1 Rôle et principaux types des isolants solides 24

I-3-2 Papiers et carton 25

I-3-2-1 Propriétés 25

I-3-2-2 Complexe huile/Papier 26

I-3-2-3 Vieillessement du papier 26

I-4 Conclusion 26

Chapitre II : Claquage dans les diélectriques liquides

II-1 Introduction 29

II-2 Mécanismes de claquages des diélectriques liquides 30

II-2-1 Mécanisme électronique 30

II-2-2 Mécanisme de claquage avec phase gazeuse	30
II-2-2-1 Mécanisme thermique	30
II-2-2-2 Mécanisme de cavitation	30
II-2-2-3 Ecoulements Electrohydrodynamiques EHD	31
II-2-3 Mécanisme de claquage par pont	31
II-3 Paramètres influençant la tension de claquage	32
II-3-1 Influence de l'humidité relative	32
II-3-2 Influence du temps d'application de la tension	33
II-3-3 Influence de la géométrie des électrodes	33
II-3-4 L'influence de la polarité	34
II-3-5 Influence des écrans (une barrière isolante dans les intervalles d'huiles)	34
II-3-6 Influence du nombre de claquages	34
II-3-7 L'influence de la température	34
II-3-8 L'influence de la pression hydrostatique	35
II-3-9 L'influence des particules	35
II-3-10 Influence du vieillissement	35
II-4 Conclusion	36
Chapitre III : Analyse chromatographique des gaz dissous en phase gazeuse	
III-1 introduction	38
III-2 Dispositifs d'essais	38
III-2-1 Mesure de la tension de claquage et de la rigidité diélectrique	38
III-2-2 Mesure du facteur de dissipation diélectrique $\text{tg } \delta$ et de la permittivité relative.....	38
III-2-3 Mesure de l'indice de couleur	39
III-2-4 Mesure de la teneur en eau	40
III-2-5 Mesure de l'indice d'acidité	40
III-3 Essais expérimentaux	41
III-3-1 Introduction	41
III-3-2 Principe	41
III-3-3 Quelques composants du chromatographe.....	41
III-3-4 Pourquoi l'analyse des gaz dissous (AGD)	42

III-3-5 Mécanismes de formation des gaz	42
III-3-6 Conditions pour le calcul des rapports dans l'examen des gaz dessous	42
III-3-6-1 Définition des valeurs typiques	43
III-3-7 Procédure d'analyse des gaz dissous dans l'huile	43
III-3-7-1 Échantillonnage de l'huile.....	43
III-3-7-2 Extraction des gaz dissous dans l'huile	43
III-3-7-3 Analyse des gaz extraits de l'huile	44
III-3-8 Tableau d'interprétation des résultats	45
III-3-9 Analyses et interprétations des résultats	50
III-4 Conclusion	51
Chapitre IV : Simulation du champ électrique dans les machines électriques	
IV-1 Introduction	53
IV-2 Défauts dans l'isolation des machines électriques	53
IV-3 Description de la motorette	53
IV-4 Simulations de champs électriques maximaux	54
IV-5 Modèle 1 : Isolation entre spires	55
IV-5-1 Influence des impuretés sur le champ électrique	56
IV-5-1-1 Influence des cavités d'air	56
IV-5-1-2 Influence des vacuoles d'eau	60
IV-5-1-3 Influence des copeaux métalliques	65
IV-6 Modèle 2 : Isolation entre spires, l'émail est constitué de deux couches	66
IV-6-1 Influence des impuretés sur le champ électrique	66
IV-6-1-1 Influence des cavités d'air	66
IV-6-1-2 Influence des vacuoles d'eau	69
IV-7 Modèle 3 : Isolation entre phase et masse	71
IV-7-1 Influence de défauts dans l'isolation	72
IV-7-1-1 Influence de l'absence du papier isolant	72
IV-7-1-2 Influence de la rupture de 1/8 ^e du périmètre de l'émail	73
IV-8 Conclusion	74
Conclusion générale	76
Bibliographie	79

Liste des figures

Figure II.1 : variation de la rigidité diélectrique de différents liquides en fonction de la quantité de la teneur en eau	32
Figure II.2 : variation de la tension de claquage en fonction du temps d'application de la tension	33
Figure II.3 : variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrode	33
Figure II.4 : variation de rigidité diélectrique en fonction de la température d'après Adamczewski.....	34
Figure II.5 : variation de rigidité diélectrique en fonction du vieillissement Adamczewski ...	35
Figure III.1 : Spintermètre automatique du type DTA 100 E	38
Figure III.2 : Système de mesure du facteur de dissipation et de la permittivité relative de type BAUER DTL	39
Figure III.3 : Spectrophotomètre, de type Lovibond PFX 195 Automatic Colomiter	39
Figure III.4 : Titrimètre de type 756 Karl Fisher	40
Figure III.5 : Triangle de DUVAL programmé sous Matlab 2016b	46
Figure IV.1 : Motorette fabriquée selon la norme IEEE 117-1974	54
Figure IV.2 : Modèle de simulation du champ électrique entre spires	55
Figure IV.3 : Champ électrique entre spires : (a). L'isolant entre spires est l'air ; (b). La motorette est plongée dans l'huile	55
Figure IV.4 : Influence du rayon de la cavité d'air R sur le champ électrique : (a). $R = 20 \mu\text{m}$; (b). $R = 10 \mu\text{m}$; (c). $R = 5 \mu\text{m}$	56
Figure IV.5 : Influence de la distance « d » qui sépare les deux cavités d'air sur le champ électrique : (a). $d = 20 \mu\text{m}$; (b). $d = 10 \mu\text{m}$; (c). $d = 5 \mu\text{m}$	57
Figure IV.6 : Influence de la taille de l'ellipsoïde d'air sur le champ électrique : (a). x-semiaxix = $60 \mu\text{m}$, y-semiaxis = $20 \mu\text{m}$; (b). x-semiaxix = $40 \mu\text{m}$, y-semiaxis = $10 \mu\text{m}$; (c). x-semiaxix = $20 \mu\text{m}$, y-semiaxis = $5 \mu\text{m}$	58
Figure IV.7 : Influence du rayon du sommet de l'ellipsoïde d'air sur le champ électrique : (a). x-semiaxix = $20 \mu\text{m}$, y-semiaxis = $10 \mu\text{m}$; (b). x-semiaxix = $20 \mu\text{m}$, y-semiaxis = $5 \mu\text{m}$; (c). x-semiaxix = $20 \mu\text{m}$, y-semiaxis = $2.25 \mu\text{m}$	59

Figure IV.8 : Influence de la distance « d » qui sépare les deux ellipsoïdes d'air sur le champ électrique : (a). $d = 20 \mu\text{m}$; (b). $d = 10 \mu\text{m}$; (c). $d = 5 \mu\text{m}$	60
Figure IV.9 : Influence du rayon « R » de la vacuole d'eau sur le champ électrique : (a). $R = 20 \mu\text{m}$; (b). $R = 10 \mu\text{m}$; (c). $R = 5 \mu\text{m}$	61
Figure IV.10 : Influence de la distance « d » qui sépare les deux cavités d'air sur le champ électrique : (a). $d = 20 \mu\text{m}$; (b). $d = 10 \mu\text{m}$; (c). $d = 5 \mu\text{m}$	62
Figure IV.11 : Influence de la taille de l'ellipsoïde d'eau sur le champ électrique : (a). x-semiaxix = $60 \mu\text{m}$, y-semiaxix = $20 \mu\text{m}$; (b). x-semiaxix = $40 \mu\text{m}$, y-semiaxix = $10 \mu\text{m}$; (c). x-semiaxix = $20 \mu\text{m}$, y-semiaxix = $5 \mu\text{m}$	63
Figure IV.12 : Influence du rayon de courbure du sommet de l'ellipsoïde d'eau sur le champ électrique : (a). x-semiaxix = $20 \mu\text{m}$, y-semiaxix = $10 \mu\text{m}$; (b). x-semiaxix = $20 \mu\text{m}$, y-semiaxix = $5 \mu\text{m}$; (c). x-semiaxix = $20 \mu\text{m}$, y-semiaxix = $2.25 \mu\text{m}$	64
Figure IV.14 : L'influence des impuretés métalliques sur le champ électrique : (a). $L = 200 \mu\text{m}$, $l = 100 \mu\text{m}$; (b). $L = 80 \mu\text{m}$, $l = 40 \mu\text{m}$; (c). $L = 80 \mu\text{m}$, $l = 50 \mu\text{m}$; (d). $L=80 \mu\text{m}$, $l = 40 \mu\text{m}$	65
Figure IV.15 : Le champ électrique entre spires dans le cas où l'émail est constitué de deux couches : (a). L'isolant est l'air ; (b). L'isolant est l'huile	66
Figure IV.16 : L'influence de la présence d'une cavité d'air dans la couche externe de l'émail : (a). Rayon de la sphère = $10 \mu\text{m}$; (b). Rayon de la sphère = $5.7 \mu\text{m}$	67
Figure IV.17 : Influence de la distance « d » qui sépare les deux cavités d'air de même rayon ($R=5.7\mu\text{m}$) sur le champ électrique : (a). $d = 20 \mu\text{m}$; (b). $d = 10 \mu\text{m}$; (c). $d = 5 \mu\text{m}$	67
Figure IV.18 : L'influence de la position d'ellipsoïde d'air sur le champ électrique : (a). Position verticale (b). Position horizontale; (c). Rotation de 45°	68
Figure IV.19 : L'influence de la présence d'une cavité d'eau dans la couche externe de l'émail : (a). Rayon de la sphère = $10 \mu\text{m}$; (b). Rayon de la sphère = $5.7 \mu\text{m}$	69
Figure IV.20 : Influence de la distance « d » qui sépare les deux vacuoles d'eau de même rayon ($R=5.7\mu\text{m}$) sur le champ électrique : (a). $d = 20 \mu\text{m}$; (b). $d = 10 \mu\text{m}$; (c). $d = 5 \mu\text{m}$	70
Figure IV.21 : L'influence de la position d'ellipsoïde d'eau sur le champ électrique : (a). Position verticale (b). Position horizontale; (c). Rotation de 45°	70
Figure IV.22 : Modèle entre phase et masse	71
Figure IV.23 : Le champ électrique entre phase et masse, l'isolant est l'air : (a). L'émail est constitué d'une seule couche (b). L'émail est constitué de deux couches	71

Figure IV.24 : Le champ électrique entre phase et masse, l'isolant est l'huile :	
(a). L'email est constitué d'une seule couche (b). L'email est constitué de deux couches	72
Figure IV.25 : Influence de l'absence du papier isolant sur le champ électrique	72
Figure IV.26 : Influence de la distance entre les spires et la masse sur le champ électrique...	73
Figure IV.27 : Influence de la rupture de $1/8$ é du périmètre de l'email sur le champ électrique :	
(a). L'isolant est l'air, région 1 ; (b). L'isolant est l'air, région 2 ; (c). L'isolant est l'huile, région 1 ; (d). L'isolant est l'huile, région 2	74

Nomenclature

kV : kilo Volt.

V : Volt.

Hz : Hertz.

μm : Micro-mètre.

m : Mètre.

ϵ_r : La permittivité relative.

$\tan \delta$: Facteur de perte diélectrique.

ppm : Particule par million.

S/m : Siemens par mètre.

E_c : Intensité du champ électrique.

λ : l.p.m (libre parcours moyen) d'un électron dans le liquide.

$h\nu$: Quantum d'énergie perdu par un électron dans les processus non ionisants.

c : Constante liée aux conditions expérimentales.

h : Constante de Planck.

ν_{C-H} : Fréquence de vibration des liaisons C-H.

N : Nombre de particules par unité de volume.

n : Nombre de groupes (CH, CH₂, CH₃) dont la section efficace correspond à la collision avec un électron.

ν_{C-C} : Fréquence de vibration des liaisons chimiques C-C.

d : Distance moyenne entre les axes des molécules.

l : Longueur de la projection des liaisons C-C sur l'axe des molécules.

n : Nombre d'atomes de carbone dans la molécule.

ρ : Densité du liquide.

M : Masse moléculaire du liquide.

A : Nombre d'Avogadro.

P_{em} : Pression électromécanique.

P_h : Pression hydrostatique.

P_s : Pression due à la tension superficielle du liquide.

I : Intensité du courant.

ρ : Masse volumique du liquide.

v_{EHD} : Vitesse d'écoulements Electrohydrodynamiques.

K : Constante de Boltzmann.

T : Température du liquide.

r : Rayon des particules impures.

CPG : Chromatographique en phase gazeuse.

AGD : Analyse des gaz dissous.

PEI : Résine polyesterimide.

PAI : Résine polyamideimide.

x-semiaxix : Petit rayon de l'ellipsoïde.

y-semiaxix : Grand rayon de l'ellipsoïde.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Le domaine du génie électrique demeure l'un des principaux domaines scientifiques qui réclame actuellement de plus en plus d'investigations. En effet, la majorité des technologies, actuelles et futures, utilisées dans nos sociétés est dépendante de l'énergie électrique. On conçoit alors que la fiabilité des systèmes électriques, quelles que soient les contraintes auxquelles ils sont soumis, fasse l'objet de nombreux travaux de recherche [1].

Particulièrement, les transformateurs de puissance qui sont des équipements importants et coûteux dans les réseaux d'énergie électrique, ils sont continuellement exposés à diverses contraintes durant leur exploitation (électrique, thermique, mécanique, environnementales...). Or une fiabilité extrême est exigée pour la distribution d'énergie électrique. D'autre part, lorsque les pannes se produisent, elles mènent inévitablement à des coûts élevés associés à la réparation ou au remplacement d'équipements. De cet état de fait, les compagnies d'électricité sont par conséquent obligées de s'inquiéter de la maintenance des transformateurs de puissance. Pour arriver à une telle gestion des appareils, les techniques de diagnostic deviennent de plus en plus importantes pour évaluer au mieux l'état des transformateurs et prévenir les défaillances électriques naissantes en vue d'assurer leur bon fonctionnement et de prolonger leur durée de vie. L'analyse du complexe isolant, constitué d'huile et de papier cellulose, fournit des informations non seulement sur la qualité de ces isolants, mais permet également de détecter des signes avant-coureurs de défaillances [2].

Un choix judicieux des isolants électriques passe par la compréhension des phénomènes pouvant apparaître suite aux différentes contraintes auxquelles sont exposés les appareils électriques durant leur mise en service. Ces contraintes peuvent affecter les caractéristiques physico-chimiques des isolants. Il est donc important de connaître et de comprendre le mécanisme de claquage et de vieillissement des matériaux isolants, sous champ électrique, pour prédire avec plus de précision leur durée de vie et donc garantir une bonne isolation et un bon refroidissement des transformateurs et moteurs électriques.

Toutefois, dans le processus de mise en œuvre et d'usinage de ces matériaux, des impuretés d'origines diverses peuvent s'y introduire accidentellement et constituer ainsi des points de départ d'arborescences provoquant des décharges partielles conduisant ainsi, avec un temps relativement long, à la rupture diélectrique.

C'est dans ce contexte que nous allons, dans ce projet de fin d'études, présenter d'abord des résultats des investigations sur l'huile de transformateur, effectuées au laboratoire de contrôle, mesures et essais de la SONELGAZ, Alger. Par la suite, dans ce travail, nous nous intéresserons aussi à appliquer une des techniques de surveillance de l'isolation des équipements, par la simulation des champs électriques dans un les machines électriques.

Nous avons structuré ce travail en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente l'isolation mixte papier/huile et les différents diélectriques liquides en électrotechnique, en mettant l'accent en particulier sur les différentes propriétés des huiles minérales (électriques, chimiques, physiques, ...).

Le deuxième chapitre s'intéresse aux différents mécanismes de claquage et aux phénomènes de propagation des streamers dans les diélectriques liquides.

Dans le troisième chapitre seront présentés certains essais diélectriques, principalement l'analyse des gaz dissous par chromatographie en phase gazeuse dans l'huile des transformateurs que nous avons effectué au sein du laboratoire d'analyse et traitements des huiles de transformateurs de SONELGAZ, Alger. Nous exposerons le principe de fonctionnement ainsi que l'appareillage utilisé, suivi d'une interprétation des résultats relatifs à l'analyse.

Le dernier chapitre est consacré à la simulation des champs électriques dans les machines électriques en présence d'impuretés où de défauts au moyen du logiciel Comsol Multiphysics®. Nous présentons et discutons également l'ensemble des résultats obtenus.

Dans la conclusion générale, nous allons faire la synthèse des résultats obtenus et ressortir leurs intérêts et leur portée ainsi que les perspectives à donner à ce travail.

CHAPITRE I

MATÉRIAUX ISOLANTS

POUR TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE

Chapitre I : Matériaux isolants pour transformateurs de puissance

I.1 Introduction

Le rôle des isolants est de séparer deux points (conducteurs) mis à des potentiels différents.

Ils appartiennent aux trois grandes catégories suivantes :

- Les isolants gazeux : l'air, certains gaz électronégatifs (SF₆, N₂, ... etc.).
- Les isolants liquides : les huiles diélectriques : minérales, végétales, synthétiques.
- Les isolants solides : les matériaux synthétiques (PVC), le papier, ...etc. [3].

Les isolants diélectriques sont indispensables dans les équipements haute et moyenne tensions, ces derniers comportent le plus souvent des structures mixtes, combinant au moins deux phases : solide/liquide ou solide/gaz [4].

Ce type d'isolation est présent dans plusieurs appareillages comme les transformateurs de puissance qui contiennent deux types de matériaux majoritaires : l'huile minérale (liquide diélectrique qui permet l'évacuation de la chaleur) et matériaux ligno-cellulosiques. Parmi ces derniers figurent les papiers de guipage qui entourent les fils de cuivre des enroulements ainsi que les écrans de carton permettant le support mécanique des bobinage et l'isolation électrique entre les différentes phases du transformateur, et entre les bobines. De plus, leur porosité leur permet d'être imprégnés d'un liquide, essentiellement l'huile minérale qui circule dans le transformateur jouant une double fonction, l'isolation et le refroidissement. L'imprégnation confère à ces isolants une rigidité diélectrique remarquable, d'où leur large utilisation dans l'industrie [5].

Dans ce chapitre, nous nous intéressons principalement à l'isolation mixte papier / huile utilisées dans les transformateurs de puissance. Nous présentons les différents types d'huiles isolantes et leurs rôles dans les matériels électriques ainsi que les isolants solides auxquels elles sont associées pour assurer le bon fonctionnement des appareillages en particulier celui des transformateurs de puissance et moteurs.

I.2 Isolants liquides

I.2.1 Rôle des isolants liquides

Les huiles isolantes sont utilisées en électrotechnique comme imprégnant d'isolations cellulosiques (papiers et cartons qui ont été préalablement séchés et dégazés) ou comme produit de remplissage de matériels électriques très divers. Leur rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz qui peuvent être emprisonnés à l'intérieur des cavités dues aux défauts de fabrication, de façon à améliorer la tenue diélectrique de l'isolation ; la rigidité diélectrique des liquides étant nettement supérieure à celle des gaz.

En plus, dans beaucoup d'applications, elles servent à la fois à améliorer les propriétés diélectriques et à évacuer la chaleur d'un assemblage.

Dans un transformateur, les huiles isolantes assurent plusieurs fonctions :

I.2.1.1 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 [4].

I.2.1.2 Fonction refroidissement

Un appareil électrique ne peut jamais échapper à la perte d'énergie qui se dissipe sous forme de chaleur nécessitant ainsi le refroidissement de l'appareil (refroidissement des bobines pour les transformateurs et moteurs) qui se fait par convection et par conduction thermique.

La chaleur à évacuer est véhiculée vers les radiateurs extérieurs, par circulation naturelle ou forcée de l'huile à l'aide d'une pompe ou d'un ventilateur.

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.

I.2.1.3 Autres fonctions

En plus des deux fonctions capitales, les huiles peuvent être aussi utilisées pour leur pouvoir extingueur d'arcs électriques, en raison de leur pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement 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 aussi à ralentir l'oxydation directe de l'isolation cellulosique [6,7].

I.2.2 Catégories des isolants liquides

Les huiles isolantes sont classées selon leurs origines. On distingue trois catégories : les huiles végétales (produits naturels), les huiles minérales (à base de produits pétroliers raffinés) et les liquides de synthèse (utilisés lorsque des propriétés particulières sont recherchées) (Tableau I.1).

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 ont été fabriqués par la suite pour pallier aux lacunes de l'huile minérale dans certaines applications. Dans ce qui suit, nous présentons les trois types d'isolants liquides utilisés dans les transformateurs, en s'intéressant beaucoup plus aux huiles minérales.

Chapitre I : Matériaux isolants pour transformateurs de puissance

Types	Applications	Caractéristiques
- Huiles minérales	-Matériel à haute tension -Transformateurs de puissance	-Bas point d'écoulement -Stabilité à l'oxydation -Bon indice de viscosité
-Hydrocarbures de synthèse	- Câbles - Traversées - Condensateurs	-Faibles pertes diélectriques -Absorption gazeuse sous décharges partielles -Bonne rigidité diélectrique au choc de foudre -Biodégradabilité
-Hydrocarbures halogénés	-Transformateurs -Condensateurs	-Ininflammabilité -Biodégradabilité
-Esters organiques	-Condensateurs pour générateur de choc -Condensateurs au papier -Remplacement des PCB en mélange avec d'autres liquides -Transformateurs de distribution et de traction	-Faibles pertes diélectriques à fréquence > à 1000 Hz -Permittivité relative, à 20°C supérieure à 5 -Utilisés pour augmenter le point de feu des liquides Point de feu > à 300 °C
-Huiles silicones	-Transformateurs de distribution et de traction	-Bon indice de viscosité, point de feu > à 300 °C -Absorption gazeuse sous décharges partielles
-Liquides divers	-Condensateurs -Matériel cryogénique et supraconducteurs	-Permittivité relative, à 20°C, supérieure à 3 -Adaptabilité -Réduction ou suppression de pertes Joule

Tableau I-1 : Caractéristiques et applications des diverses catégories d'huiles diélectriques [6].

I.2.2.1 Les huiles végétales

Les huiles végétales ont été les premières huiles isolantes utilisées pour l'appareillage électrique, elles sont obtenues à partir de la récolte de graines et de fruits. Elles sont traitées par pressage puis par des opérations de raffinage relativement complexes [8,9].

Un des grands avantages de ces huiles est leur excellente biodégradabilité et leur faible inflammabilité. En plus de ces deux atouts, ce type d'huile est très peu toxique, et possède une grande capacité à absorber l'eau. Cependant, leur tenue diélectrique n'est pas très élevée, leur résistivité à l'oxydation est faible et elles présentent une viscosité élevée, ce qui limite le transfert de chaleur. Pour ces raisons, les huiles végétales sont relativement peu utilisées en électrotechnique bien que leur emploi dans les transformateurs ait été proposé récemment [10,11].

I.2.2.2 Les huiles de synthèse

Les huiles de synthèse sont toutes obtenues à partir des différents procédés chimiques, utilisées chaque fois que des propriétés particulières sont recherchées et qui ne sont pas satisfaites par les huiles minérales.

La haute concentration d'eau qu'elles peuvent contenir comparées aux autres huiles isolantes présente un point fort pour ce type d'isolants. En outre, elles possèdent une bonne biodégradabilité et une résistance au feu élevée. Par contre, leur viscosité un peu élevée et qui devient très importante aux basses températures, leur coût élevé, ont pour conséquence, une limitation de leurs utilisations [10,12].

I.2.2.3 Les huiles minérales

Les huiles minérales représentent 90 à 95% des liquides isolants, et sont les plus utilisées dans les équipements électriques. Elles sont obtenues facilement par raffinage de bruts de pétrole. Parmi les atouts de cette huile par rapport aux autres huiles, leur faible viscosité ce que leur procure une bonne évacuation de la chaleur et un démarrage à froid correct, leur disponibilité à des prix assez modérés et surtout leur bonne compatibilité avec les isolants celluloseux. En plus des propriétés diélectriques rentables qu'elles possèdent, les performances des huiles minérales n'ont pas cessé de s'améliorer grâce au développement de nouvelles techniques de traitement (séchage, purification, dégazage ...). C'est principalement pour ces raisons technico-économiques, que les huiles minérales sont les plus répandues dans l'industrie.

Il faut noter que même ce type d'huiles présente aussi des inconvénients tels que leur inflammabilité, du fait qu'elles possèdent un point d'éclair relativement bas [6,13].

I.2.3 Caractéristiques des huiles minérales isolantes

L'étude des propriétés des huiles diélectriques des équipements concerne essentiellement l'électrotechnique. Cependant, il s'agit d'un domaine qui se caractérise par sa pluridisciplinarité, puisqu'il fait appel à plusieurs sciences : la chimie, l'électricité, la mécanique des fluides ... etc. La connaissance globale de ces sciences est nécessaire afin de mieux comprendre les phénomènes qui s'y passent et faire le choix de l'huile pour une application donnée.

I.2.3.1 Les propriétés électriques

➤ La permittivité

La permittivité relative (ϵ_r) est définie comme étant le rapport de la capacité (C) d'une cellule remplie de liquide et la capacité (C_v) de la même cellule ayant le vide comme diélectrique ($\epsilon_r = C/C_v$). Elle est déterminée généralement pour une température de 90°C et une fréquence de 50Hz. Une bonne huile minérale possède une permittivité de 2.2 à 25 °C qui décroît avec la température [14,15]

➤ La rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique (V/m) d'une huile correspond à la valeur maximale du champ électrique que l'on peut lui appliquer sans décharge disruptive. La rigidité diélectrique est influencée par la présence des impuretés qui la réduit [16,17].

La norme CEI 296 [18] recommande, pour les huiles traitées, une tension de claquage qui soit supérieure à 50 kV.

➤ Le facteur de dissipation

Tout diélectrique soumis à une tension continue ou alternative est toujours le siège de pertes électriques qui se traduisent par un échauffement plus au moins important du liquide. La présence d'un courant de fuite qui traverse le liquide sous l'effet du champ électrique est évidemment la principale cause de ces pertes. Le facteur de dissipation ($\tan \delta$) d'un matériau est la tangente de l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée et ce courant de fuite (l'angle de perte). Elle permet d'apprécier la pureté d'une huile et dépend de la température et de la fréquence [3,6]. D'après la norme CEI 296 [18], le facteur de dissipation d'une huile neuve est au plus égal à 0.005.

➤ La conductivité, la résistivité

Tout liquide isolant est caractérisé par sa faible conductivité exprimée en (S/m). Cette dernière est due à la présence de charges libres positives et négatives (des ions) en quantités égales. Sous l'effet d'un champ électrique, ces ions se déplacent provoquant ainsi un courant de conduction [7].

Si la permittivité est une caractéristique de constitution, la conductivité des liquides est une propriété de conditionnement [11,17]. Elle est liée à la présence d'infimes quantités (en général, inférieures à 1 ppm) d'impuretés ionisables [8].

➤ Electrification de l'huile

Le problème de l'électrification de l'huile dans les grands transformateurs de puissance est apparu au début des années 1980, suite au claquage d'un certain nombre d'appareils peu de temps après leur mise en service. Des études ont montré que ces claquages étaient dus à l'apparition de charges électrostatiques créées par la circulation très rapide de l'huile à travers les enroulements. La séparation des charges entre l'huile et les surfaces isolantes (papier des enroulements) et leur accumulation en des zones distinctes (en général, les charges positives au sommet de l'appareil, les charges négatives dans le bas) conduisent à l'apparition d'un champ électrostatique qui se superpose au champ électrique alternatif de l'appareil. Des décharges partielles ou des décharges rampantes peuvent alors survenir, voire un arc électrique conduisant au claquage du transformateur.

Les principaux critères qui influent sur la tendance à l'électrification d'une huile sont [13] :

- ✓ La vitesse de circulation de l'huile ;
- ✓ Le niveau du champ électrique alternatif ;
- ✓ Les propriétés de l'huile telles que la viscosité et la conductivité (qui varient avec la température) ;

- ✓ La structure de l'isolation solide et la géométrie des canaux d'huile, la rugosité du papier ;
- ✓ La teneur de l'huile en impuretés (eau, boues d'oxydation, particules) ;
- ✓ L'humidité du papier.

I.2.3.2 Les propriétés chimiques

➤ La teneur en soufre

Une huile minérale peut contenir des traces de soufre, soit sous la forme de soufre libre, soit sous forme de composés sulfurés ; les premiers sont très corrosifs, les seconds le sont beaucoup moins, tant que la température ne dépasse pas 100°C environ.

Sa présence est détectée par la corrosion d'une lame de cuivre électronique immergée dans une huile à 140 °C pendant 19h (norme (CEI 296) et (NFT60-131)) [18,19] la coloration qu'elle prend permet de juger si les composés sulfurés sont corrosifs ou non. [6].

➤ L'oxydation

L'oxydation est un ensemble de réactions chimiques complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène.

L'oxydation de l'huile a des conséquences néfastes pour les isolations [17,20], on cite :

- ✓ Une mauvaise évacuation de la chaleur par suite de l'accroissement de la viscosité et de la présence de dépôts ;
- ✓ Une diminution des propriétés électriques de l'huile, sa conductivité et sa tangente de l'angle de pertes augmentent ;
- ✓ Une augmentation des pertes dans les isolations imprégnées qui peuvent entraîner le claquage thermique ;
- ✓ L'apparition de l'acidité dans l'huile.

➤ La stabilité

La stabilité d'une huile minérale aux effets conjugués de la température, du champ électrique et de l'oxygène dépend beaucoup de la composition de cette huile et de la présence ou non d'additifs, notamment antioxydants. Le vieillissement de l'huile et celui des matériaux solides avec lesquels elle est en contact (notamment la cellulose) peut engendrer [13] :

- ✓ Une augmentation des pertes diélectriques ;
- ✓ Une augmentation de la viscosité, d'où une diminution de la capacité à éliminer les calories ;
- ✓ Une augmentation de la corrosivité vis-à-vis de la cellulose et des parties métalliques.

➤ La teneur en eau

C'est l'ennemi numéro un des appareils électriques. Les huiles séchées peuvent avoir des teneurs en eau inférieures à 10 ppm [13]. Au contact d'une atmosphère humide, l'eau se dissout lentement dans l'huile, pouvant conduire à des teneurs élevées.

I.2.3.3 Les propriétés physiques

➤ La viscosité

La viscosité est le pouvoir caractéristique des fluides à résister au déplacement d'une partie de ce fluide par rapport à l'autre. Le choix d'une huile dépend essentiellement de la valeur de la viscosité, c'est un critère particulièrement important pour apprécier la qualité de l'huile. Une huile est d'autant meilleure que sa variation de viscosité en fonction de la température est faible.

Pour les transformateurs et les moteurs, le choix des huiles fluides est recommandé pour faciliter l'évacuation rapide de la chaleur et ainsi assurer un bon refroidissement des bobines [3, 7,21].

➤ Aspect. Couleur. Caractéristiques optiques

La coloration d'une huile neuve est une indication de son degré de raffinage : les huiles neuves possèdent un indice de couleur inférieur à 0.5 ; la couleur devient de plus en plus foncée après usage ce qui indique la détérioration de l'huile.

L'aspect est un test visuel de l'huile qui permet de détecter la présence des corps en suspension (poussière, eau) et d'évaluer la viscosité. Un bon état visuel de l'huile signifie un aspect limpide.

L'aspect, la couleur ainsi que l'odeur, nous permettent d'avoir une idée rapide de l'état général de l'huile. Par exemple : une mauvaise odeur renseigne sur la présence d'amorçages d'arcs électriques dans l'huile, et l'aspect trouble signifie la présence d'eau et d'impuretés [6,22].

➤ Le point d'éclair

Cette propriété renseigne sur la présence de certains hydrocarbures gazeux dissous dans l'huile suite à un défaut électrique ou thermique. Elle correspond à la température pour laquelle l'huile émet un flash, c'est-à-dire, la température critique maximale à ne pas dépasser au risque de provoquer un incendie dans le transformateur [13].

D'après la norme CEI 296 [18], le point éclair d'une huile diélectrique doit être supérieur à 130°C.

I.3 Isolants solides

I.3.1 Rôle et principaux types des isolants solides

Les isolants solides ont une vaste utilité dans l'électrotechnique notamment dans les dispositifs de production, de transport, de distribution et d'utilisation de l'énergie électrique. Dans les transformateurs et plus particulièrement dans les transformateurs de puissance, les solides isolants assurent plusieurs fonctions. Ils sont utilisés pour maintenir mécaniquement les bobinages et pour matérialiser les canaux de circulation du liquide de refroidissement.

Les isolants solides sont répartis en deux catégories selon leur nature : organique ou inorganique.

Chapitre I : Matériaux isolants pour transformateurs de puissance

Dans la catégorie des isolants inorganiques [23], on trouve essentiellement :

- ✓ **Les verres** : souvent utilisés pour l'isolement des lignes électriques aériennes et sous forme de fibres dans les isolations composites où ils améliorent les propriétés mécaniques de pièces isolantes plastiques ;
- ✓ **Les céramiques et oxydes** : considérablement répandus dans l'isolation haute ou basse tension, haute fréquence, sous vide et dans les condensateurs ;
- ✓ **Les micas et produits micacés** : spécialement rentables dans le secteur de l'isolation à la masse des bobinages des stators de machines tournantes de tension nominale comprise entre 1 et 30 kV.

Les isolants organiques sont amplement servis dans le domaine de la câblerie, des condensateurs, des alternateurs, des transformateurs et des moteurs.

Ils se subdivisent entre matériaux naturels (caoutchoucs, paraffine et papier) et synthétiques (élastomères, polymères et composites).

Dans ce qui suit, nous nous intéressons plus particulièrement aux papiers et cartons.

I.3.2 Papiers et cartons

Les papiers et les cartons sont des matériaux isolants disponibles à des prix bas, possédant des caractéristiques diélectriques excellentes. Obtenus par divers processus de fabrication et dont les propriétés sont choisies pour répondre aux contraintes imposées dans l'application. [24] [25].

Ils sont constitués principalement de fibres de cellulose (90 %), extraites de la pulpe du bois ou des fibres du coton, 6 à 7 % de lignine, 3 à 4 % d'hémicellulose [5].

Le papier Kraft, Manille, Japon et Presspahn sont les plus répandus en électrotechnique [26].

I.3.2.1 Propriétés

Pour caractériser les propriétés diélectriques du papier isolant, trois facteurs doivent être obligatoirement étudiés : la permittivité relative, la rigidité diélectrique et le facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$). La mesure de ce dernier évalue la qualité de l'isolation, plus le facteur de dissipation est faible, moins il y a des pertes dans l'isolant donc moins il y a d'énergie dissipée sous forme de chaleur. De plus, le papier est un mauvais conducteur de chaleur, donc il fait un bon isolant thermique [27].

Les papiers dont la structure est considérée comme convenable doivent présenter les particularités suivantes [28] :

- ✓ Une grande pureté (pas de corps durs, ni de particules métalliques ou charbonneuses) ;
- ✓ Une régularité d'épaisseur et une grande résistance mécanique ;
- ✓ Une bonne teneur en eau, ce qui lui permet d'absorber la vapeur de l'eau et d'air.

Les cartons cellulosiques à usages électriques sont traités dans la norme standard internationale CEI 554 [29] et la norme EN 60 641 [26]. Ces normes se réfèrent aux publications ISO et donnent un bref aperçu sur la méthode utilisée.

I.3.2.2 Complexe huile/Papier

L'huile assure avec le papier un complexe isolant très efficace. Ce complexe constitue une clé primordiale dans l'isolation électrique des bobines des transformateurs de puissance et moteurs.

Le couple huile-papier permet d'isoler les fils de cuivre conducteurs entre eux. Les cartons imprégnés d'huile permettent de séparer mécaniquement les enroulements les uns des autres. Ils isolent ces derniers ainsi que les connections des parties reliées à la terre. En outre, la tenue mécanique du complexe est assurée par le papier. Les phénomènes vibratoires dus aux parties actives du transformateur sont en partie atténués par la présence des cales [30].

I.3.2.3 Vieillessement du papier

La durée de vie d'un matériel électrique (spécifiquement les transformateurs et les moteurs) dépend essentiellement de celle de son isolation solide. La détérioration du papier résulte principalement de la détérioration de la cellulose. Cette détérioration est normalement associée à des réactions chimiques (la pyrolyse, l'oxydation et l'hydrolyse) qui se produisent dans les matériaux, causant ainsi la rupture des liaisons entre les unités des chaînes de la cellulose [5,31].

Le papier fait l'objet d'un vieillissement important lorsqu'il est soumis à un échauffement prolongé. Cela se traduit par une diminution de ses caractéristiques, en particulier sur le plan mécanique. Selon Green [32], la cellulose peut se dégrader rapidement aux températures supérieures à 90 °C.

En plus de la présence de l'oxygène qui a une influence exceptionnelle étant donné son implication dans le processus d'oxydation, l'humidité est également un paramètre influent à prendre en considération dans le vieillissement des papiers.

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les principales propriétés des huiles et isolants solides (papiers) utilisés dans l'appareillage électrique et plus particulièrement dans l'isolation des enroulements des transformateurs de puissance et moteurs. Le complexe huile/papier est copieusement probant pour assurer une isolation électrique des éléments actifs de ces derniers, un bon transfert de chaleur et pour servir aussi en qualité de support mécanique pour les bobines. Etant donné que la durée de vie d'un équipement électrique dépend aussi de la particularité de son isolation, un choix judicieux des isolants s'avère donc indiscutable afin de garantir un bon fonctionnement du dispositif électrique. Les principaux critères auxquels une huile doit répondre sont : une bonne tenue diélectrique, un faible facteur de pertes (ou de dissipation), un bon point d'écoulement (faible viscosité) pour assurer un bon transfert de chaleur, une bonne résistance au feu, une stabilité à l'oxydation et une faible tendance à la charge statique. Quant aux papiers cellulosiques, de leur côté, ils doivent faire preuve d'une grande pureté, une grande résistance mécanique et une bonne teneur en eau.

Au cours de la mise en service d'un appareil, il est soumis à plusieurs contraintes (électriques, chimiques, mécaniques, thermiques) qui altèrent son système d'isolation. La dégradation de l'imprégné provient d'autant plus de l'oxydation qui est accélérée par toute augmentation de la température, de la concentration en oxygène et du taux d'humidité.

Chapitre I : Matériaux isolants pour transformateurs de puissance

Les surtensions du réseau peuvent provoquer l'apparition de décharges partielles conduisant à la génération de gaz et autres sous-produits solubles ou insolubles. De même, un échauffement local prolongé sous l'effet d'un champ électrique intense peut provoquer le claquage dans l'imprégnant. Pour mieux comprendre ce phénomène, le claquage des diélectriques liquides fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE II

CLAQUAGE DES DIELECTRIQUES LIQUIDES

Chapitre II : Claquage dans les diélectriques liquides

II.1 Introduction

L'état général des connaissances sur la tension de claquage des diélectriques liquides est moins avancé que dans le cas des gaz ou même des solides. De nombreux aspects de la rupture des liquides ont été étudiés au cours des dernières décennies, mais les résultats et les conclusions des nombreux chercheurs ne peuvent être conciliés et donc produire une théorie générale applicable aux liquides, car ces résultats et observations sont en contradiction. La raison principale de cette situation est l'absence d'une théorie complète concernant la base physique de l'état liquide qui formerait la structure de base dans laquelle les observations pourraient être comparées et liées.

Des études complètes des travaux publiés sur le sujet ont été effectuées périodiquement et les plus récents incluent les revues de Lewis, Sharbaugh, Watson, Swann, Kok, Krasucki, Zaky et Hawley et Gallagher [33]. Le travail est abordé largement dans deux écoles de pensée, il y a ceux qui tentent d'expliquer la dégradation des liquides sur un modèle qui est une extension de la rupture gazeuse, en fonction de l'ionisation d'avalanche des atomes provoquée par une collision électronique dans le champ appliqué. Les électrons sont supposés être éjectés de la cathode dans le liquide par une émission de champ, auquel cas on suppose qu'ils s'écoulent à travers la surface aidée par le champ, ou par l'effet thermoïnique renforcé par le champ (Schottky). Ce type de claquage a été considéré comme applicable à des liquides homogènes de pureté extrême, et ne s'applique pas à l'isolation liquide commercialement exploitée. Les études de conduction dans des liquides hautement purs ont montré que, dans les champs bas, la conduction est largement ionique en raison de la dissociation des impuretés et augmente linéairement avec la force du champ. Cette conduction est saturée dans des champs intermédiaires. Pour des champs électriques élevés, à mesure que nous abordons la rupture diélectrique, la conduction augmente plus rapidement et tend à être instable. On pense que cette augmentation du courant résulte de l'émission d'électrons à la cathode par l'un ou l'autre des mécanismes ci-dessus, et éventuellement par la dissociation assistée par champ des molécules dans le liquide.

On reconnaît depuis longtemps que la présence de particules étrangères dans l'isolation liquide a un effet profond sur la rigidité diélectrique des liquides. Dans une approche, il a été postulé que les particules en suspension sont polarisables et ont une permittivité supérieure à celle du liquide. En conséquence, ils ont une force électrique dirigée vers le lieu de tension maximale. Avec des électrodes de champ uniformes, le mouvement des particules est supposé être initié par des irrégularités de surface sur les électrodes, ce qui donne lieu à des gradients de champs locaux. L'accumulation de particules continue et tend à former un pont à travers l'espace qui conduit à l'initiation de la rupture diélectrique.

Les impuretés peuvent également être des bulles gazeuses de tension de claquage inférieure à celle des liquides, auquel cas on peut déclencher la rupture totale du liquide lors de la rupture des bulles. Un modèle mathématique pour la dissolution des bulles a été proposé par Kao [33].

II.2 Mécanismes de claquages des diélectriques liquides

II.2.1 Mécanisme électronique

Ce mécanisme est semblable à celui observé dans les gaz. Les électrons sont accélérés sous un champ électrique et gagneraient une énergie suffisante pour éliminer un électron et ainsi déclencher le processus d'avalanche [34]. La condition de seuil pour le début de l'avalanche est obtenue lorsque l'énergie acquise par l'électron est égale à l'énergie perdue lors de l'ionisation (émission d'électrons) et est donnée d'après VON HIPPEL [35] par la formule :

$$e * E_c * \gamma = c * h * v$$

D'après Lewis [35], l'électron fournit son énergie principalement lors des vibrations des liaisons C-H et il a formulé la rigidité diélectrique comme suit :

$$E_c = \frac{c * h * v_{C-H}}{e} * N * \sum n_i * Q_i$$

Adamczewski [35] dit que les pertes d'énergies sont liées aux processus d'excitation lors des vibrations des liaisons C-C et la valeur du champ critique est obtenue par la formule :

$$E_c = \frac{h * v_{C-C}}{e} * d * l * (n-1) * N * \frac{\rho}{M} * A$$

II.2.2 Mécanisme de claquage avec phase gazeuse

II.2.2.1 Mécanisme thermique

Selon Watson et Sharbaugh [35], 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'espace et a la forme suivante :

$$I = A * V^n$$

Avec : $1.5 < n < 2$

L'inconvénient de ce modèle de ces deux auteurs est qu'ils utilisent une équation relative à l'état stationnaire, alors qu'il s'agit d'un régime transitoire d'échauffement. Un modèle plus élaboré et tenant compte du régime transitoire a été proposé par Kao. D'après cet auteur, si la densité de courant est suffisante pour ramener la température du liquide à son point d'ébullition, il y a claquage [35].

II.2.2.2 Mécanisme de cavitation

Une cavitation désigne toute la séquence de formation, d'expansion et de disparition de la cavité. Les processus par lesquels les bulles sont formées comprennent :

- Poches de gaz sur la surface de l'électrode ;
- Les changements de température et de pression ;
- La dissociation des produits par des collisions électroniques donnant lieu à des produits gazeux ;
- La vaporisation des liquides par des décharges de type corona à partir de points et d'irrégularités sur les électrodes [33].

Pour qu'il y ait formation d'une cavité, le critère de pression nulle doit être vérifié :

$$P_{em} = P_h + P_s$$

Un critère analogue a été proposé par Thomas [35], en supposant que la pression d'électrostriction s'oppose au décollement du liquide

II.2.2.3 Ecoulements Electrohydrodynamiques EHD

L'apparition d'une phase gazeuse peut résulter d'une variation de pression qui est proportionnelle au carré de la vitesse EHD du liquide [35] :

$$\Delta p = \frac{1}{2} * \rho v_{EHD}^2$$

II.2.3 Mécanisme de claquage par pont

Les liquides isolants techniques contiennent toujours des impuretés macroscopiques sous forme de particules fibreuses de cellulose, de coton ou d'autres matériaux. Un pont de fibres entre les électrodes peut résulter, ce qui représente un canal conducteur. Ce phénomène peut également être interprété comme un claquage thermique local provenant d'un canal faiblement conducteur [40].

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

- Formes et dimensions des impuretés ;
- Intervalles et formes des électrodes ;
- Permittivité et conductivité des impuretés ;
- Concentration des impuretés entre les électrodes ;
- Valeurs des charges libres existant à la surface des particules.

Si les particules sont **isolantes** donc une permittivité relative supérieur à celle du liquide, elles vont être attirées, sous l'action du champ électrique 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 effet Joule dans le pont qui est plus conducteur dans le liquide, soit par la grande intensité locale du champ qui apparaît juste avant l'achèvement du pont.

Dans le cas des particules **conductrices**, elles peuvent se décharger facilement au contact d'une électrode et transporter leur charge 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 s'amorce entre la particule et l'électrode déclenchant la rupture.

La formation du pont des particules entre les électrodes nécessite :

- Le temps d'application de la tension doit être long ;
- Une grande concentration des impuretés au voisinage des électrodes.

Un critère établi par Kok, définit une valeur critique du champ pendant le claquage par pont :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{k*T}{r^3}}$$

II.3 Paramètres influençant la tension de claquage

II.3.1 Influence de l'humidité relative

L'eau constitue un danger potentiel pour les isolations. Elle peut intervenir soit à court terme (par son action directe ou indirecte), soit à long terme (en favorisant certains processus de dégradation). L'eau peut être présente dans l'huile sous forme dissoute ou en émulsion. La solubilité de l'eau dans l'huile dépend de la température, du type d'huile et de son degré de vieillissement. L'influence de l'eau sur la rigidité diélectrique de l'huile est très visible particulièrement pour des intervalles inter électrodes faibles (< 1 cm) dans un champ uniforme ou peu divergent. L'eau dissoute conduit à une diminution de la rigidité diélectrique.

Lorsque l'eau est sous forme d'émulsion (humidité importante), la diminution de la rigidité est plus importante. En présence d'humidité ou d'impuretés hygroscopiques comme par exemple les fibres de cellulose, la rigidité diélectrique de l'huile diminue de manière très significative [22]. Dans ce cas, si l'intervalle inter électrodes est faible et le temps d'application de la tension longue, le claquage de l'huile résultera de la formation d'un pont entre les électrodes.

Avec l'augmentation de l'espace inter électrodes, l'influence de l'humidité et des autres impuretés diminue. Lorsque l'intervalle inter électrodes est de quelques dizaines de centimètres, cette influence devient négligeable. L'influence de l'humidité et des autres impuretés est aussi faible si le temps d'application de la tension est court (cas des tensions impulsionnelles), même si l'intervalle est faible [4].

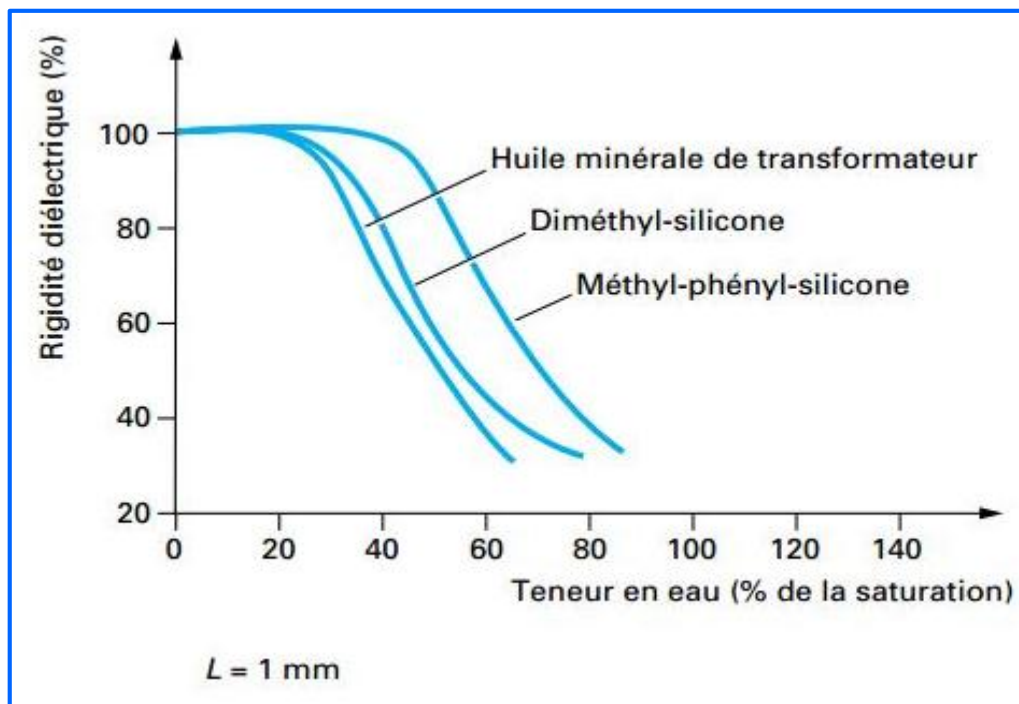


Fig.II.1 : variation de la rigidité diélectrique de différents liquides en fonction de la quantité de la teneur en eau [37]

II.3.2 Influence du temps d'application de la tension

La tension de claquage d'huile diminue avec l'augmentation du temps d'application de la tension. Cette diminution est d'autant plus importante que la concentration des impuretés dans l'huile est grande. La diminution de la tension de claquage pour des temps >1 ms est liée à l'augmentation de l'influence des impuretés. Pour les temps inférieurs à $10\mu\text{s}$, le claquage a un caractère électrique et pour les longues durées, il a un caractère thermoélectrique [35].

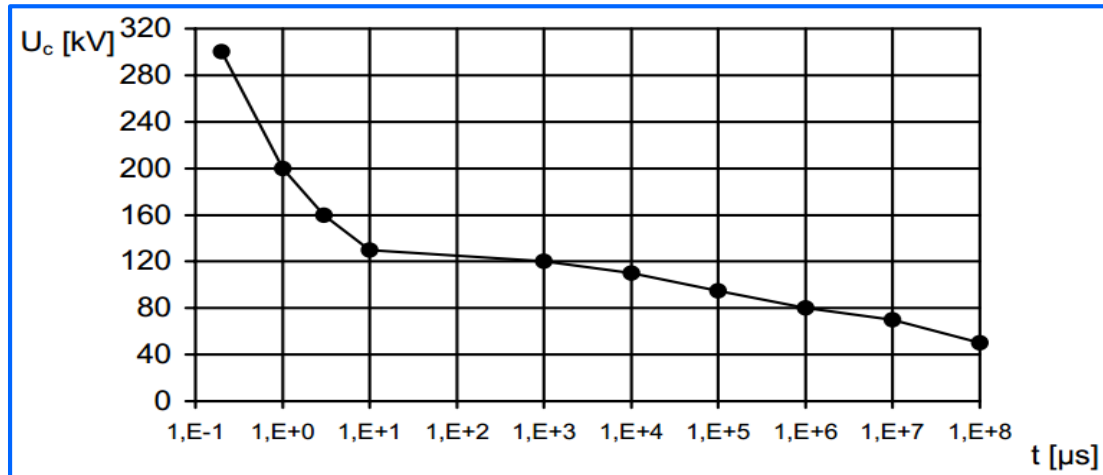


Fig.II.2 : variation de la tension de claquage en fonction du temps d'application de la tension [35]

II.3.3 Influence de la géométrie des électrodes

La tension de claquage d'une huile donnée diminue avec l'augmentation de l'intervalle inter électrodes et le degré de non uniformité du champ. Pour un intervalle inter électrodes donné, la tension de claquage diminue avec l'augmentation de la surface des électrodes. Les études ont montré que la tension de claquage de l'huile dépend du volume de l'huile sous contrainte [4]. L'influence des dimensions sur la tension de claquage de l'huile est liée à l'existence d'impuretés dans l'espace inter électrodes dont le nombre croît avec l'augmentation du volume d'huile.

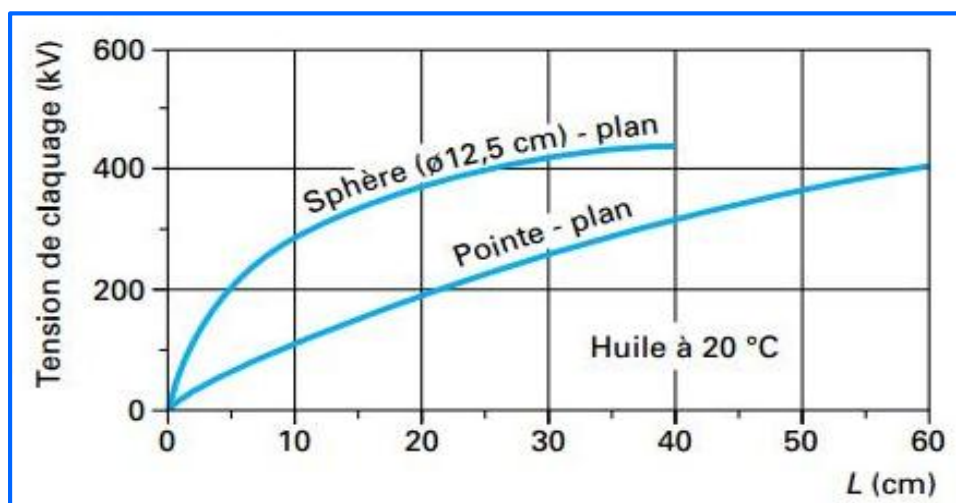


Fig.II.3 : variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes [37]

II.3.4 L'influence de la polarité

La tension de claquage en polarité négative est plus grande qu'en polarité positive pour un rayon de courbure d'électrode faible. Cette influence est liée à la différence dans le mécanisme d'évolution des streamers positifs et négatifs [38].

II.3.5 Influence des écrans (une barrière isolante dans les intervalles d'huiles)

L'insertion d'une barrière représente à la fois un obstacle électrostatique et géométrique, donc soit qu'on recouvre les électrodes avec une couche mince isolante, soit qu'on introduit une barrière isolante entre les électrodes, la rigidité diélectrique s'améliore et cette amélioration serait due surtout à l'uniformisation du champ dans l'espace barrière - plan, et elle dépend aussi d'un certains paramètres telle que la position de la barrière, le dimension et le nombre des barrière, la perforation et la nature de la matière des barrières [38].

II.3.6 Influence du nombre de claquages

Il a été observé par plusieurs chercheurs, que la tension de claquage de l'huile, dans un système de configuration donné, augmentait en fonction du nombre d'essais, restait ensuite constante et puis diminuait. Le nombre d'essais variait de 20 à 40. Ceci peut être expliqué par l'élimination des bulles de gaz par les premiers claquages, cependant des claquages répétés et nombreux détériorent le liquide [35].

II.3.7 L'influence de la température

La tension de claquage de l'huile, sèche et bien filtrée, ne dépend pas généralement de la température dans l'intervalle allant de 00 C° – 80 C° environ [36]. En augmentant la température, la concentration de gaz et de l'humidité diminuent dans le liquide, ce qui améliore la rigidité diélectrique. Cependant, les conditions pour avoir un claquage thermoélectrique s'améliorent. Cette influence de double effet, fait apparaître un maximum local dans la caractéristique représentant la variation de la tension de claquage en fonction de la température [35].

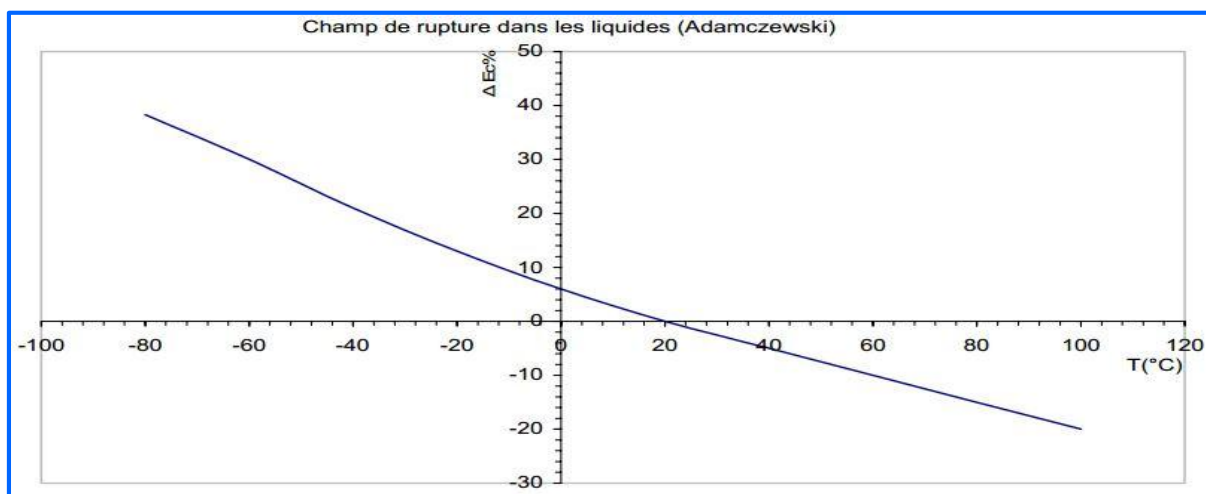


Fig.II.4 : variation de rigidité diélectrique en fonction de la température d'après Adamczewski [39]

II.3.8 L'influence de la pression hydrostatique

La tension de claquage de l'huile augmente énormément avec l'augmentation de la pression. Cette dépendance montre l'implication des phénomènes gazeux dans le mécanisme de claquage. En plus, l'influence de la pression sur la rigidité diélectrique diffère selon la polarité. Dans certains liquides, il semble qu'en polarité négative la tension de claquage augmente avec la pression, alors qu'en polarité positive la tension de claquage augmente relativement peu. Cependant, il faut beaucoup plus de pression pour les streamers rapides filamenteux que pour les streamers lents en forme de buisson. Des effets similaires ont été également observés sur les courants associés aux streamers ; l'augmentation de la pression réduit la fréquence et l'amplitude des courants associés aux streamers. Au-dessus d'une pression seuil (ou pression de disparition) liée à l'énergie du streamer, les impulsions de courants et de lumière correspondants disparaissent. Aucun effet appréciable n'a été cependant relevé lorsque la pression est diminuée en dessous de la pression atmosphérique [4] [14].

II.3.9 L'influence des particules

Les particules provoquent un renforcement local du champ électrique. De ce fait, elles jouent un rôle important dans les phénomènes tels que le seuil d'apparition des décharges partielles et la rigidité électrique [40] [29] [30]. L'influence des particules conductrices est beaucoup plus importante que celle des particules isolantes. Pour éliminer un maximum de particules, les liquides sont en général filtrés avant de les utiliser pour l'imprégnation des appareils. Certains équipements (notamment les condensateurs) sont également préparés en atmosphère d'air filtré pour éviter de récupérer des poussières [40].

II.3.10 Influence du vieillissement

Après vieillissement, la tension de claquage de l'huile diminue [39] ; les huiles esters naturels gardent généralement une bonne tension de claquage et deviennent pour certaines meilleures que les huiles minérales.

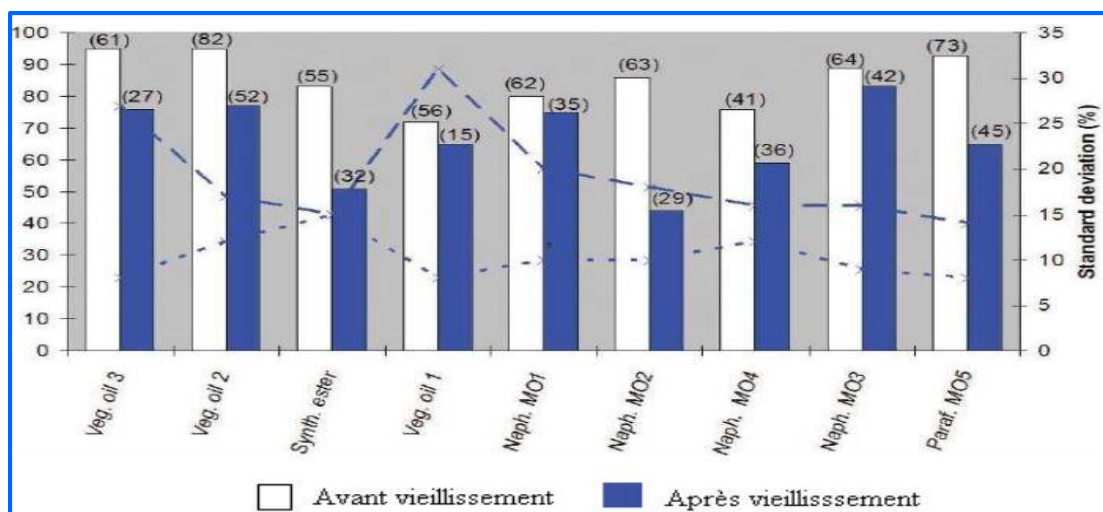


Fig.II.5 : variation de rigidité diélectrique en fonction du vieillissement Adamczewski [39]

Conclusion

Il ressort de cette analyse bibliographique que les différents travaux et études réalisés sur le claquage des diélectriques liquides, ont permis d'accumuler une quantité très importante d'informations bien que les processus fondamentaux conduisant au claquage sont toujours mal connus. Ceci est lié en grande partie au fait que la connaissance des propriétés physiques de l'état liquide est encore moins développée. Donc le claquage des huiles isolantes est parmi les phénomènes les plus observés qui affecte son état lors du fonctionnement des appareils (ouverture et fermeture des disjoncteurs, transformateurs, etc. ...). Les mécanismes de préclaquage et de claquage dans les diélectriques liquides sont complexes et ils dépendent de plusieurs paramètres que nous avons déjà cité tels que : la géométrie et la distance inter électrodes, la durée de la tension appliquée, la pression hydrostatique, la température, l'humidité et la présence d'impuretés.

Il faut ajouter quelques paramètres qui peuvent modifier la rigidité des huiles d'une manière ou d'autre ; le degré de pureté des huiles, le type de signal de la tension, la composition des huiles et dans quelques cas, le mélange des huiles différentes.

CHAPITRE III

ANALYSE CHROMATOGRAPHIQUE DES GAZ DISSOUS EN PHASE GAZEUSE

Chapitre III : Analyse chromatographique des gaz dissous en phase gazeuse

III.1 introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons d'abord les différents éléments et les dispositifs expérimentaux utilisés dans nos essais. Dans ce qui suit, nous parlerons des méthodes et caractéristiques du calcul et terminerons par les résultats et les interprétations concernant l'analyse des gaz dissous dans les huiles de transformateurs à l'aide d'un chromatographe. Pour cela, nous avons effectué un stage pratique au sein de laboratoire du GRTE d'El Hamma, où il existe tout le matériel nécessaire pour réaliser les différents essais. Cependant, nous n'avons pas effectué les essais électriques à cause du manque des quantités suffisantes d'huiles.

III.2 Dispositifs d'essais

III.2.1 Mesure de la tension de claquage et de la rigidité diélectrique

Pour mesurer la tension de claquage, nous utilisons un spintermètre entièrement automatique de type DTA 100 E (Fig.III.1) équipé d'une cellule (Fig. III-1. b) pouvant contenir 250 ml d'huile avec un système d'électrodes sphériques de diamètre 12,5 mm et de distance 2,5 mm La tension maximale étant de 100 kV (50 Hz). Le spintermètre est programmé pour des claquages avec un temps de repos de 30 secondes. Ce temps de repos est largement suffisant pour permettre à l'huile de se stabiliser



FigIII.1 : Spintermètre automatique du type DTA 100 E

III.2.2 Mesure du facteur de dissipation diélectrique $\text{tg } \delta$ et de la permittivité relative

Pour mesurer le facteur de dissipation diélectrique $\text{tg } \delta$ et la permittivité relative, on utilise un pont de Scherring de type BAUER DTL (Fig.III.2) complètement automatisé, et programmé pour

Chapitre III : Analyse chromatographique des gaz dissous en phase gazeuse

afficher 06 mesures et leur moyenne à la température de 90°C, sous une tension de 2kV et une fréquence de 50 Hz, selon la norme CEI 247 [41].

On peut aussi varier la température entre 30 et 150°C pour d'autres essais bien particuliers.



Fig.III.2 : Système de mesure du facteur de dissipation et de la permittivité relative de type BAUER DTL

III.2.3 Mesure de l'indice de couleur

L'indice de couleur est mesuré selon la norme ASTM D1500 [42]. L'appareil utilisé pour cette mesure est un spectrophotomètre, de type Lovibond PFX 195 Automatic Colometer (FigIII.3).

La couleur de l'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 correspondant, ou celui dont la couleur est juste supérieure, est pris comme valeur de cet indice.



Fig.III.3 : Spectrophotomètre, de type Lovibond PFX 195 Automatic Colometer

III.2.4 Mesure de la teneur en eau

La teneur en eau est mesurée selon la norme CEI 422[43]. L'appareil utilisé pour cette mesure est un titrimètre de type 756 Karl Fisher (Fig.III.4).

Les réactions qui se développent au cours d'un titrage de Karl Fisher sont complexes, mais il s'agit essentiellement de la réaction de l'eau avec l'iode, en présence de dioxyde de soufre, d'une base organique, et d'un alcool dans un solvant organique [43]. Ainsi, une mole d'iode réagit stochiométriquement avec une mole d'eau, de sorte que 1 mg d'eau correspond à 10,72 C (quantité d'électricité en coulombs). La valeur de la teneur en eau est exprimée en ppm (partie par million) soit mg d'eau/ kg d'huile.



Fig.III.4 : Titrimètre de type 756 Karl Fisher

III.2.5 Mesure de l'indice d'acidité

L'indice d'acidité ou de neutralisation dans certaines références, est mesuré selon la norme CEI 296 [46]. Cette mesure est effectuée par un titrage acido-basique. En effet, 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 un gramme d'huile.

L'indice d'acidité est calculé au moyen de l'expression :

$$IA = 0.1 M V / m$$

Où :

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

M : masse moléculaire de la solution KOH (56.1 g/moles).

m : masse de l'huile (g).

V : volume en ml de KOH, nécessaire pour l'obtention de la neutralisation.

III.3 Essais expérimentaux

III.3.1 Introduction :

Pour déterminer les qualités des huiles minérales et leurs capacités de supporter les différentes contraintes lors de l'exploitation, et pour éviter tout endommagement des appareils, des essais périodiques doivent être appliqués sur ces huiles pour assurer la continuité de fonctionnement. Le premier type des essais consiste à déterminer les caractéristiques électriques des huiles déjà mentionnés ci-dessus (la tension de claquage, la permittivité relative, le facteur de dissipation diélectrique etc...)

Le deuxième type et qui est aussi important et qui donne des résultats très précis et qui ont fait l'objet de notre stage, concerne les analyses des gaz dissous dans l'huile à l'aide du chromatographe.

Bien qu'il existe différents types d'analyses à l'aide du chromatographe, nous nous intéressons dans ce travail à l'analyse chromatographique en phase gazeuse (CPG)

III.3.2 Principe

La chromatographie en phase gazeuse (CPG) est une méthode physique qui permet de séparer les constituants d'un mélange gazeux par suite d'équilibres entre une phase mobile gazeuse et une phase stationnaire, qui peut être liquide (partage) ou solide (adsorption).

III.3.3 Quelques composants du chromatographe

- **La colonne :** elle constitue le cerveau du chromatographe, car c'est d'elle que dépend le succès de la séparation. C'est généralement un tube sous forme hélicoïdale plongé dans un thermostat soigneusement régulé (le temps de rétention dépend considérablement de la température).
- **Gaz vecteur :** le gaz vecteur doit être pur et inerte, son choix est lié au détecteur utilisé
- **Un four :** (type chaleur tournante) qui permet une programmation de température ajustable de 20 °C (-100 °C pour certains systèmes) à 450 °C et qui est également équipé d'un système de refroidissement rapide.
- **Un système d'injection :** qui va permettre d'introduire et de rendre volatil l'échantillon à analyser. L'injection peut se faire d'une manière manuelle ou automatique à l'aide d'un échantillonneur.
- **La cathétomètre (TCD) :** Son principe basé sur une comparaison continue entre le flux de chaleur emporté par le gaz vecteur seul et le flux de chaleur emporté par le gaz vecteur chargé molécules de soluté. Ces flux de chaleur sont produits par des thermistances, filaments incandescents à base de tungstène ou de platine le plus souvent, très conducteur et sensible à la température.
- **L'ionisation de flamme (FID) :** Son principe : Une flamme produite par combustion de l'hydrogène dans l'air, ionise partiellement le soluté injecté, les ions formés sont collectés par une électrode engendrant un courant électrique que l'on amplifie et enregistre.

III.3.4 Pourquoi l'analyse des gaz dissous (AGD)

L'apparition des gaz au sein des huiles est une indication dangereuse pour les transformateurs surtout lorsqu'elle dépasse certaines valeurs à cause de la faible rigidité des gaz par rapport aux huiles ce qui provoque des décharges partielles dégradant fortement la qualité des huiles.

III.3.5 Mécanismes de formation des gaz

➤ Décomposition de l'huile

Pour des températures très élevées et selon l'énergie mise en jeu il y aura rupture des liaisons chimiques telles que (C-C C-H C=C ...etc.) (l'apparition de C_2H_2 C_2H_6 C_2H_4 ...) [44].

➤ L'oxydation de l'huile

Ce qui provoque la formation du O_2 et CO_2

➤ Décomposition de l'isolation cellulosique

Par rupture des chaînes polymériques de l'isolation solide cellulosique (papier, carton, bois de calage) [44].

➤ Autres sources

Dans certains cas, des gaz peuvent se former, non pas à la suite de défauts dans le matériel, mais à cause de réactions chimiques de corrosion ou autres impliquant l'acier, les surfaces non peintes ou les peintures de protection. De l'hydrogène peut être produit par réaction de l'acier avec l'eau tant que l'oxygène est présent dans l'huile qui est à proximité.

De l'hydrogène peut aussi être formé par la décomposition du mince film d'huile entre les lamelles du noyau à des températures supérieures ou égales à 140 °C, et peut aussi être présent dans de l'acier inoxydable neuf, absorbé pendant le procédé de fabrication, ou produit pendant le soudage, et libéré lentement dans l'huile.

Des gaz peuvent aussi être produits par exposition de l'huile à la lumière solaire ou se former au cours de travaux de réparation du matériel.

Des peintures internes du transformateur, comme les résines alkydes et les polyuréthanes modifiés, contenant des acides gras dans leur formulation, peuvent aussi former des gaz [44].

III.3.6 Conditions pour le calcul des rapports de concentration dans l'examen des gaz dessous

Il convient d'effectuer l'échantillonnage et l'analyse par AGD conformément aux recommandations de la CEI 60567 [45]. Les rapports de gaz ne sont significatifs et ne seront calculés que si au moins un des gaz est à une concentration supérieure aux valeurs typiques et au-dessus des vitesses typiques d'accroissement de gaz.

III.3.6.1 Définition des valeurs typiques

Les valeurs typiques de concentration sont les quantités acceptables de gaz en dessous desquelles l'expérience en service montre qu'il n'y a pas de défaut en formation possible ou détectable.

La probabilité d'avoir une défaillance peut s'accroître de façon significative pour des valeurs très supérieures aux valeurs typiques de concentration. La situation est alors considérée comme critique car, même si une défaillance peut ne jamais se produire à ces niveaux élevés, les risques d'en avoir une sont élevés. De telles défaillances peuvent être divisées en deux catégories :

- les défaillances qui se développent en un temps très court (et qu'on ne peut donc détecter par prélèvement d'huile et analyse en laboratoire, mais seulement par des détecteurs en continu).
- les défaillances qui se développent sur une durée très longue. Seule cette deuxième catégorie peut être détectée par analyse d'AGD en laboratoire [44].

III.3.7 Procédure d'analyse des gaz dissous dans l'huile

La procédure d'analyse des gaz dissous comporte trois phases successives :

III.3.7.1 Échantillonnage de l'huile

Il faut prélever et transporter l'échantillon de telle manière que les gaz dissous dans l'huile ne subissent aucune modification, ou bien seulement des modifications que l'on sache évaluer. Dans ce but, il est recommandé [45], d'utiliser des récipients opaques en verre ou en métal, étanches ou vide. Mieux encore, la méthode de prélèvement par seringue convient quel que soit le mode de transport des échantillons. Il convient de prélever des échantillons lorsque le matériel est en fonctionnement normal ; cela est important pour déterminer la vitesse de formation des gaz. [47]

III.3.7.2 Extraction des gaz dissous dans l'huile

L'extraction des gaz dissous de l'huile à analyser peut-être obtenue soit sous vide, soit par entraînement avec un gaz barbotant dans l'huile [48]. Cette dernière méthode est réalisée par barbotage du gaz vecteur (dans notre cas, nous avons utilisé l'argon) lui-même dans un faible volume d'huile. Des volumes d'huile compris entre 0.25 ml et 5 ml ont été généralement employés. Il est possible que l'on ne puisse pas atteindre les sensibilités et fidélités exigées pour l'analyse des hydrocarbures pendant les essais en usine, en utilisant moins de 5 ml d'huile. Des volumes d'huile plus importants exigeraient des temps d'entraînement plus grands pour extraire les gaz dissous et conduiraient à des chromatogrammes inacceptables [49], à moins de concentrer les gaz extraits à l'aide d'un piège à froid [45].

III.3.7.3 Analyse des gaz extraits de l'huile

Plusieurs méthodes d'analyse des gaz sont proposées [48]. Cependant, la chromatographie en phase gazeuse fournit un moyen plus efficace d'analyser ces gaz et d'en déterminer les concentrations avec une bonne précision. Elle nécessite un appareillage plus élaboré et ne peut donc être utilisé qu'en laboratoire, mais elle fournit une analyse qualitative et quantitative complètes des gaz. Le résultat de l'analyse chromatographique quantitative des échantillons de gaz obtenus par une extraction complète des gaz dissous dans l'huile fournit automatiquement la composition des gaz dissous dans l'huile. Par contre, dans le cas d'une extraction partielle, il faut ramener le résultat de l'analyse quantitative à la composition initiale des gaz dissous dans l'huile

Types de défauts

DP	Décharges partielles provoquant des perforations carbonisées en forme de trou d'épingle dans le papier, qui, cependant, peuvent être difficiles à détecter
D1	Décharges de faible énergie manifestées par de plus larges perforations carbonisées à travers le papier
D2	Décharges de forte énergie en dessous de 300 °C, ou décharges de puissance, manifestées par une destruction et une carbonisation importantes du papier, la fusion du métal aux extrémités de la décharge, une carbonisation importante de l'huile et, dans certains cas, le déclenchement du matériel, confirmant la forte intensité du courant de décharge ;
T1	Défaut thermique $T \leq 300 \text{ C}^0$
T2	Défaut thermique $300 \leq T \leq 700 \text{ C}^0$
T3	Défaut thermique $T > 700 \text{ C}^0$

Tab.III.1 : Tableau de type de défauts adopté dans les laboratoires de GRTE

Chacune des six grandes classes de défauts donne naissance à une composition caractéristique en hydrocarbures gazeux, qu'on peut mettre sous la forme d'une table d'interprétation d'AGD.

III.3.8 Tableau d'interprétation des résultats

Cas	Défaut caractéristique	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/ C_2H_6
DP	Décharges partielles provoquant des perforations carbonisées en forme de trou d'épingle dans le papier, qui, cependant, peuvent être difficiles à détecter	Non significatif (NS)	≤ 0.1	≤ 0.2
D1	Décharges de faible énergie manifestées par de plus larges perforations carbonisées à travers le papier	≥ 1	0.1-0.5	≥ 1
D2	Décharges de forte énergie en dessous de 300 °C, ou décharges de puissance, manifestées par une destruction et une carbonisation importantes du papier, la fusion du métal aux extrémités de la décharge, une carbonisation importante de l'huile et, dans certains cas, le déclenchement du matériel, confirmant la forte intensité du courant de décharge ;	0.6-2.5	0.1-1	≥ 2
T1	Défaut thermique $T \leq 300 C^0$	NS	≥ 1 mais NS	≤ 1
T2	Défaut thermique $300 \leq T \leq 700 C^0$	≤ 0.1	≥ 1	1-4
T3	Défaut thermique $T > 700 C^0$	0.2	≥ 1	≥ 4

Tab.III.2 : Tableau d'interprétation utilisé dans GRTE, CEI 60599 [44]

On peut utiliser pour l'AGD la méthode du triangle de DUVAL au lieu de celle des rapports des gaz qui a une grande plage de variation ce qui permet une analyse plus précise et qui est fortement utilisée dans le laboratoire du GRTE, bien que pour les deux méthodes la concentration des gaz doit atteindre les valeurs typiques et les résultats ne doivent pas être en contradiction.

Gammes des valeurs typiques utilisées dans le laboratoire de GRTE en ppm

Gaz	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CH ₄	H ₂	CO	CO ₂
Concentration	2-20	60-280	20-90	30-130	50-150	400-600	3800-
Typique							14000

Tab.III.3 : Gammes des concentrations typiques des gaz

Triangle du DUVAL

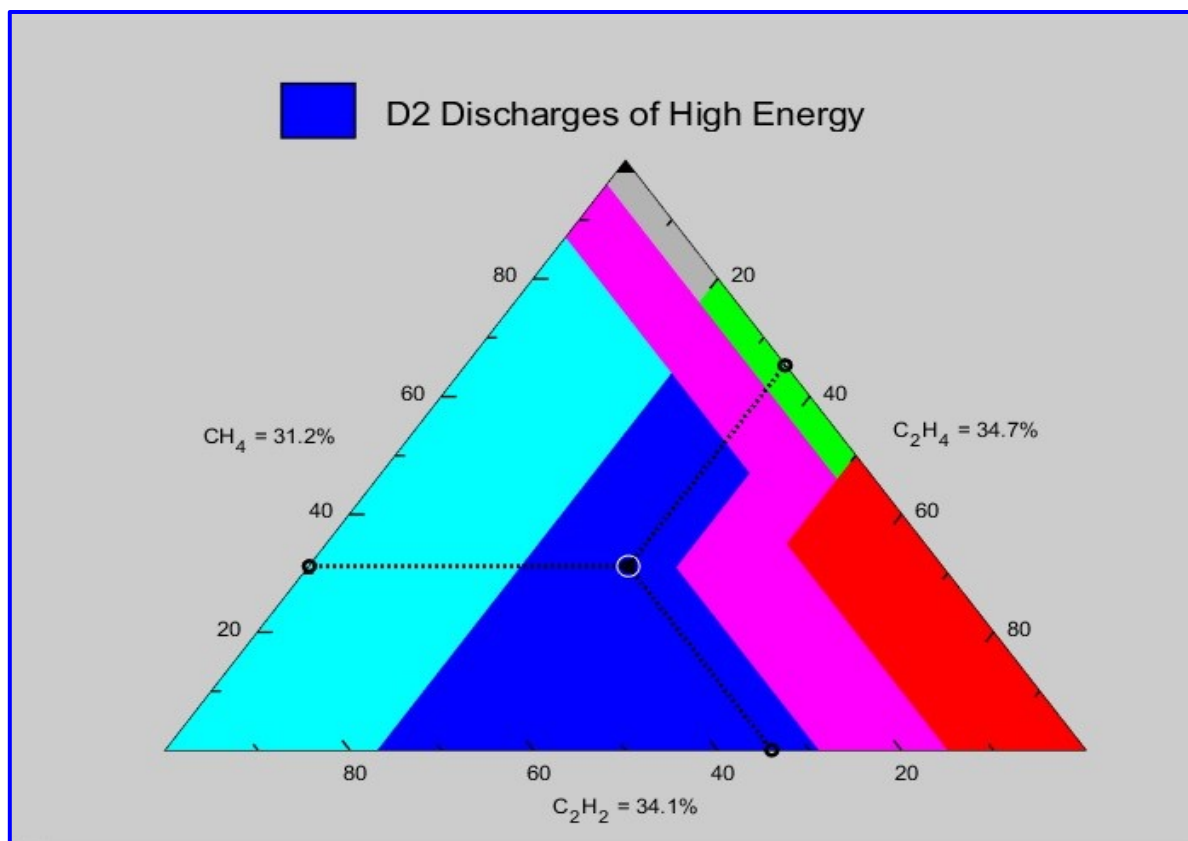


Fig.III.5 : Triangle de DUVAL programmé sous Matlab 2016b

Cette méthode consiste à mesurer la quantité d'acétylène, de méthane et d'éthylène. On additionne les trois quantités afin de déterminer le pourcentage de chaque élément par rapport aux autres. Une fois ce pourcentage connu, on représente le point défini par ceux-ci sur le triangle de Duval. Selon la zone dans laquelle se trouve le point, on en déduit le type de défaut. Chaque couleur représente l'un des six défauts (la septième représente un mélange d'un défaut mixte électrique et thermique qu'on peut le négliger), les rapports sont calculés suivant la norme CEI 60599 [44] en trouvant le point d'intersection des trois valeurs des concentrations des gaz, on peut déterminer le type de défaut. Nous avons utilisé ces deux méthodes pour analyser des huiles de différents postes de GRTE en effectuant l'analyse chromatographique dans le cadre d'une vérification périodique de 10 postes répartis sur différentes régions.

Chapitre III : Analyse chromatographique des gaz dissous en phase gazeuse

Tous les résultats que nous avons obtenus sont résumés dans les tableaux ci- dessous :

Le tableau (Tab.III.4) contient la concentration des différents gaz en partie par million (ppm) dans dix (10) échantillons d'huile de transformateur de différents postes.

Nous avons suivi la procédure proposée par notre promotrice et déjà utilisée dans le laboratoire pour introduire les échantillons dans le chromatographe, chaque échantillon doit être à part et étiquetée le long de l'analyse pour éviter tout résultat erroné vue que chaque échantillon nécessite un temps d'environ une heure pour une analyse complète (le chromatographe offre l'avantage de lancer une deuxième analyse ce qui permet de gagner du temps).

L'ensemble des appareils qui compose le chromatographe et connectés avec un logiciel et un calculateur permettent de calculer ces concentrations avec haute précision.

Les concentrations les plus élevées sont celles du CO₂ et O₂ vue que le phénomène le plus rencontré est l'oxydation de l'huile.

Le chromatographe est alimenté par le réseau de distribution de SONELGAZ et équipé d'un onduleur pour assurer un fonctionnement sans interruption.

Comme il existe certains gaz qui ont une concentration dépasse les valeurs typiques (en gras), on effectue le calcul des rapports.

Item	Postes	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	O ₂	N ₂	Diagnostic
1	BIR OULD KHLIFA CM/420	99	535	7757	43	32	12	44	2155	5	D2
2	CM LEGHROUS TR /933	163	361	2194	82	39	192	57	3687	6	T1
3	KSER EL BOUKHARI TR3646	16	157	2636	121	18	539	0,1	369	55617	T1
4	AIN SKHOUNA TR2 332	65	401	3746	15	16	8	26	2170	44954	D1
5	MEFTAH TR1/711	198	302	3976	0,1	5	0,1	0,1	733	5	T3
10	OULED FAYET TR1/232	181	459	3270	107	600	53	5	3566	6	D2
32	PS SKHOUNA TR2/332	65	401	3746	15	8	16	26	2170	4	T1
39	SIDI AICH TR1/770	26	86	1966	7	32	74	30	2	5	T1
41	CM LEGHROUS TR993	163	361	2194	82	192	39	57	3687	6	D2
49	AKBOU TR4/803	234	211	3105	11	30	40	6	4968	6	T1

Tab.III.4 : Résultats de diagnostic de quelques postes

Chapitre III : Analyse chromatographique des gaz dissous en phase gazeuse

Le tableau (Tab.III.5) représente le résultat de calcul des rapports des concentrations des gaz, après le calcul on situe les concentrations dans le tableau d'interprétations (tab.III.2) pour déterminer la nature de défaut.

C_2H_2 / C_2H_4	CH_4 / H_2	C_2H_4 / C_2H_6
1,3750	0,4343	2,6667
1,4615	0,5031	0,2031
0,0056	7,5625	0,0334
1,6250	0,2308	2,0000
0,0200	0,0005	50,0000
0,0083	0,5912	11,3208
3,2500	0,2308	0,5000
0,9375	0,2692	0,4324
0,2969	0,5031	4,9231
0,2000	0,0470	0,7500

Tab.III.5 : Rapport des concentrations des gaz, CEI 60599

Dans le tableau (Tab.III.6), les rapports des concentrations des gaz sont calculés par la méthode de triangle de DUVAL, après le calcul nous situons les concentrations dans le triangle pour déterminer la nature de défaut.

% C_2H_2	% C_2H_4	% CH_4
36,9748	26,8908	36,1345
32,0225	21,9101	46,0674
0,0719	12,9403	86,9878
45,6140	28,0702	26,3158
1,9231	96,1538	1,9231
0,7022	84,2697	15,0281
53,0612	16,3265	30,6122
43,4783	46,3768	10,1449
17,2205	58,0060	24,7734
12,7660	63,8298	23,4043

Tab.III.6 : Rapport des gaz, méthode de triangle Duval CEI 60599

Dans les trois tableaux ci-dessous, il s'agit d'une analyse d'un seul poste déjà effectuée dans le laboratoire de GRTE, où la concentration des gaz a dépassé les valeurs typiques, nous avons juste comparé les résultats.

Ces analyses périodiques permettent de remarquer la progression et l'évolution des défauts qui aide à déterminer la qualité d'huile, de diagnostic et la prédiction de la durée d'exploitation des équipements.

Chapitre III : Analyse chromatographique des gaz dissous en phase gazeuse

ANALYSE [ppm]	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
30/04/2014	381	2893	32	5222	0,1
06/05/2015	285	990	13	1233	0,1
24/06/2015	5	24	0,8	36	0,1
02/07/2015	320	603	68	629	0,1
16/07/2015	522	584	197	697	0,1
28/06/2016	605	672	227	757	0,1
29/03/2017	21	156	43	527	195

Tab.III.7 : Concentration des gaz

RAPPORT	C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆	DEFAULT
30/04/2014	0,01	7,59	52220,00	T3
06/05/2015	0,01	3,47	12330,00	T3
24/06/2015	0,02	4,80	360,00	T3
02/07/2015	0,11	1,88	6290,00	T3
16/07/2015	0,28	1,12	6970,00	T3
28/06/2016	0,30	1,11	7570,00	T3
29/03/2017	0,08	7,43	2,70	T2

Tab.III.8 : Les rapports de concentration, CEI 60599

Duval	% C ₂ H ₂	% C ₂ H ₄	% CH ₄	DEFAULT
11/02/2014	0,39	64,10	35,51	T3
30/04/2014	0,58	55,14	44,28	T3
06/05/2015	1,32	59,21	39,47	T3
24/06/2015	5,23	48,38	46,38	DT
02/07/2015	13,33	47,16	39,51	DT
16/07/2015	13,71	45,71	40,58	DT
28/06/2016	5,92	72,59	21,49	T3

Tab.III.9 : Rapport des gaz, méthode de triangle de Duval CEI 60599

DT : mélange d'un défaut électrique et thermique (c'est un défaut qui n'existe pas dans tab.III.2, il apparaît seulement dans la méthode de triangle de Duval, et généralement on ne le prend pas en considération)

III-3-9 Analyses et interprétations des résultats

Les rapports de gaz ne sont significatifs et ne seront calculés que si au moins un des gaz est à une concentration supérieure aux valeurs typiques et au-dessus des vitesses typiques d'accroissement de gaz (Tab.III.3). Néanmoins, tant que la formation de gaz reste en dessous des valeurs typiques, il convient de ne pas la considérer comme indication d'un « défaut », mais plutôt comme une « formation typique de gaz » [44].

Si les rapports de gaz sont différents de ceux obtenus lors de l'analyse précédente, un nouveau défaut peut se superposer à un ancien ou à un vieillissement normal.

La plupart des défauts est de nature thermique à cause des échauffements par effet Joule dus aux enroulements des transformateurs.

On peut constater un recouvrement entre D1 et D2, ce qui signifie une double attribution de ces deux défauts dans ce cas.

Nous avons trouvé que pour le même type d'huile et pour la même durée de fonctionnement mais le résultat de diagnostic se diffère d'un poste à l'autre, et c'est principalement à cause des facteurs extérieurs de la température et de la pression.

La présence d'air seul ou de l'un de ses constituants (oxygène et azote) n'est pas dangereuse en soi, les transformateurs sont à respiration libre, il est donc normal que ces gaz se trouvent dissous dans l'huile.

La présence d'éthylène C_2H_4 traduit l'existence d'un point chaud ce qui favorise l'apparition d'un défaut thermique [51].

Si CO_2 est seul avec éventuellement 10% de CO , il s'agit du vieillissement thermique normal du papier [50] et si le CO_2 est accompagné d'hydrogène H_2 , de méthane CH_4 et d'éthane C_2H_6 , il s'agit de petites décharges partielles dans le papier [51].

Les conséquences d'air dégagé sous forme de bulles peuvent être très graves (décharges partielles, formation de points chauds localisés sous des bulles piégées) [51].

La présence de C_2H_2 à partir de quelques fractions de micromoles par litre d'huile, est toujours caractéristique d'un défaut électrique grave (dégageant une forte énergie) [51].

S'il y a seulement de l'hydrogène (H_2), il peut être due à de très faibles décharges partielles dans l'huile ou être le prélude à un défaut électrique plus grave. Il faut savoir aussi que ce gaz est peu soluble dans l'huile et diffuse très vite. L'absence de ce corps n'est pas toujours significative.

Les deux méthodes (DUVAL et rapport des concentrations), malgré qu'il y ait quelques nuances (des concentrations différentes mais on reste dans le même domaine de défaut), mènent vers les mêmes résultats, ce qui rend le diagnostic fiable bien qu'il existe d'autres méthodes d'analyse n'est pas utilisées dans le laboratoire de GRTE.

On remarque pour les trois derniers tableaux que l'analyse est effectuée pour le même poste dans des dates différentes, pour cela on doit s'assurer que la comparaison est faite entre des

Chapitre III : Analyse chromatographique des gaz dissous en phase gazeuse

valeurs d'AGD provenant d'échantillons prélevés au même endroit et, de préférence, dans de l'huile en mouvement. Il convient également que l'interprétation tienne compte des traitements effectués précédemment sur le matériel, tels que réparations, dégazage ou filtration de l'huile, qui peuvent influencer le niveau de gaz dans l'huile.

Recommandation

Pour s'assurer de la qualité du diagnostic et pour éviter tout endommagement des équipements, il est préférable :

- D'accroître la fréquence des prélèvements (trimestrielle, mensuelle ou autre) quand les concentrations de gaz et leurs vitesses d'accroissement dépassent les valeurs typiques.
- De considérer une action immédiate (régénération, filtrage changement d'huile...) quand les concentrations de gaz et les vitesses d'accroissement de gaz dépassent les valeurs d'alarme [51]

III.4 Conclusion

L'analyse des huiles minérales des transformateurs est indispensable dans l'industrie, les résultats obtenus ont des significations très importantes sur les décisions adoptées lors des travaux de maintenance pour assurer la continuité du fonctionnement de ces appareils coûtant très cher.

Lors de ce stage, nous avons effectué l'analyse chromatographique des gaz dissous dans les huiles et où les prélèvements des échantillons doivent être effectués avec soin.

Les différents appareils de mesure disponibles dans le laboratoire permettent d'avoir des résultats fiables et de façon automatique ce qui permet un bon diagnostic des huiles.

Sur le plan pratique, l'application de la méthode des rapports de concentration (CEI 60599) des gaz et de triangle de Duval ne s'appliquent que lorsque la concentration des gaz dépasse les valeurs typiques précisées dans la norme CEI 599 [44] dans le cas contraire on parle d'une formation typique de gaz.

Le gaz qui cause des maux de tête est l'acétylène, qui se forme à des températures très élevées et pour des énergies importantes provoquant la rupture des liaisons chimiques, donc sa présence en quantité supérieure à la valeur typique est un signe évident d'un défaut.

Pour nous, ce stage qui rentre dans le cadre de notre préparation du projet du fin d'études, nous a permis d'élargir et d'approfondir notre connaissance sur les diélectriques liquides et faire la liaison entre la théorie et la pratique.

CHAPITRE IV

SIMULATION DU CHAMP ELECTRIQUE DANS LES MACHINES ELECTRIQUES

Chapitre IV : Simulation du champ électrique dans les machines électriques

IV.1 Introduction

La machine électrique en général occupe une place primordiale dans les applications industrielles. L'un des constituants les plus critiques de ces machines et aussi l'une des principales sources de leur défaillance est l'isolation de leurs enroulements [52]. Plus de 30 % des défaillances dans les machines électriques sont dues aux problèmes liés à l'isolation [53]. L'isolation des machines électriques de traction est essentiellement composée de fils émaillés assemblés pour réaliser des bobines qui sont imprégnées avec une résine afin d'augmenter leurs propriétés mécaniques, électriques et chimiques [54].

Diverses contraintes peuvent être à l'origine de la rupture de l'isolation ; les principales sont, thermiques, électriques, mécaniques et environnementales [55].

La contrainte électrique peut conduire à une rupture de l'isolation pour différentes raisons dont les problèmes liés au matériau diélectrique lui-même, aux tensions transitoires ainsi qu'aux décharges partielles auxquelles la machine est exposée [56].

Avec le développement technologique du calcul, la simulation des champs électriques est devenue un outil incontestable dans la conception des isolants des équipements électriques de haute tension. De même, elle est de plus en plus utilisée afin d'estimer le risque de voir apparaître ou non des décharges partielles dans les machines électriques en général [57].

IV.2 Défauts dans l'isolation des machines électriques

Au cours des différentes phases de l'élaboration d'un isolant, des impuretés de taille microscopiques et de formes diverses peuvent être incorporées à l'isolant ou créées à l'interface des zones conductrices malgré les précautions prises par les fabricants de matières premières que par les constructeurs. Des inhomogénéités peuvent donc apparaître dans la structure de l'isolant au cours de l'extrusion ou du refroidissement de la couche isolante. Ces hétérogénéités induisent des perturbations dans la distribution du champ électrique ainsi qu'un renforcement de ce dernier pouvant conduire à l'apparition des décharges partielles et à la génération, à plus ou moins long terme, d'arborescences électriques. Le développement de ces arborescences peut avoir une issue fatale sur l'isolation [58].

IV.3 Description de la motorette

La motorette, que nous considérons comme modèle d'application dans notre travail, est une maquette décrite dans la norme IEEE 117-1974 [59]. Elle est utilisée dans la procédure d'évaluation des systèmes de matériaux isolants de moteurs électriques à bobinage aléatoire alimentés en courant alternatif. Elle est composée de deux ensembles de deux bobines séparées par un papier isolant (Figure 1). Pour notre cas, le fil émaillé a un diamètre sur cuivre de 1,25 mm et une épaisseur d'émail de 40 μm . L'ensemble peut être ensuite imprégné par une résine ou un vernis. Deux familles de résines ont été utilisées dans cette étude : une résine polyamideimide et une résine polyesterimide [57].

La résine époxy est largement utilisée comme matériau d'isolation électrique, pour ses excellentes propriétés physiques, chimiques et électriques [60].

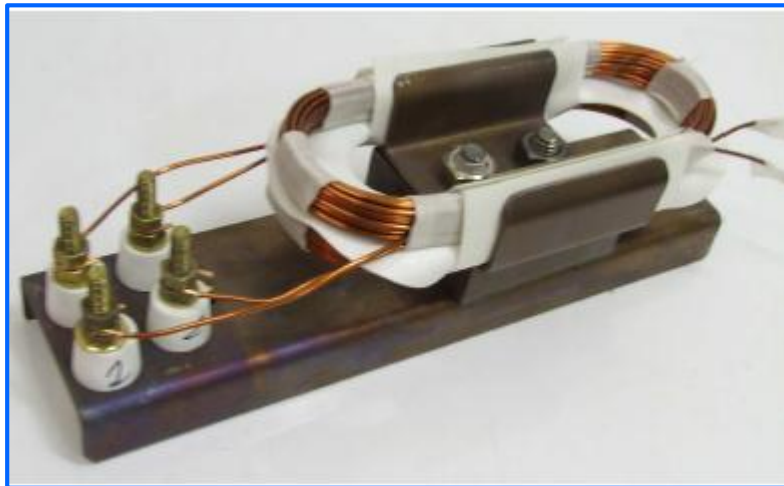


Fig.IV.1 : Motorette fabriquée selon la norme IEEE 117-1974.

IV.4 Simulations de champs électriques maximaux

Les décharges partielles entre spires et entre spires et masse constituent une cause significative du vieillissement des isolants, ce phénomène est soutenu par la présence des impuretés.

Pour situer le problème d'influence d'impureté sur la distribution du champ électrique, il importe de définir les paramètres caractéristiques de cette impureté. Une hétérogénéité est caractérisée par la nature de la substance occlue, sa forme géométrique, ses dimensions, sa position dans l'isolant et sa présence avec ou sans d'autres cavités.

Cependant, si l'on doit tenir compte de tous ces paramètres et envisager une étude qui traite tous les cas qu'on peut imaginer de se produire dans l'industrie, il serait inconvenable du point de vue pratique. Alors, on devrait choisir les imitations qui soient représentatives des cas réels les plus probables ou qui représentent les cas les plus défavorables [61].

Pour cela, nous nous intéressons principalement à la simulation du champ électrique entre spires et entre phase et masse. Nous allons introduire dans un premier temps des impuretés d'air et d'eau sous forme de sphère et d'ellipsoïde, et des copeaux rectangles en métal au niveau de l'espacement qui sépare deux spires. Ensuite, nous incorporons des inclusions d'air et d'eau dans la couche externe de l'émail. Une étude détaillée sera faite afin d'évaluer l'effet de la nature, la forme de la géométrie, les dimensions de l'impureté sur le champ électrique.

Enfin, des simulations sur des fils de cuivre nus, et sur l'absence du papier isolant séparant la spire de la masse seront réalisées afin d'avoir une estimation des risques en absence d'isolation.

Toutes les simulations seront effectuées en utilisant le logiciel Comsol Multiphysics®, et sous une tension V_0 égale à 1V.

Le champ électrique maximal entre deux fils parallèles mis sous tension V_0 , de rayons R et distants de a , sur lequel nous nous baserons, est donné par Harper et O-Dwyer [62] (Equation 1).

Équation 1 : $E_{\max} = \frac{V_0}{a} * \sinh\left(\frac{V_0/2C}{V_0/2C}\right)$.

Avec C tel que : $\frac{a}{R} = 4\sinh^2[V_0/4C]$.

IV.5 Modèle 1 : Isolation entre spires

Le modèle de la motorette est composé de deux rangées de spires entourées par un émail de permittivité relative égale à 3.5 (Fig.IV.2). Nous nous intéressons au champ électrique entre spires et nous considérons deux cas ; l'isolant entre spires est constitué juste par l'air dans le premier cas, le deuxième cas nous prenons l'huile comme isolant (Fig.IV.3).

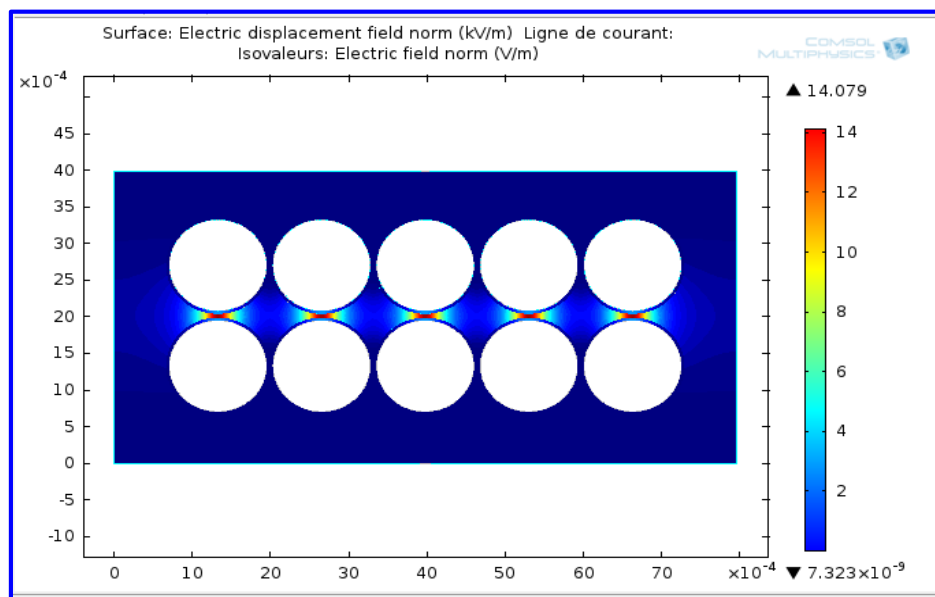
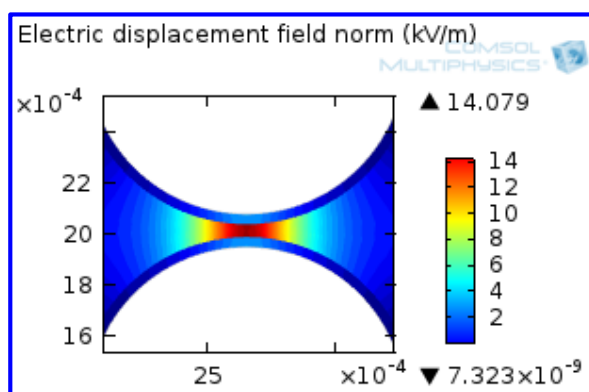
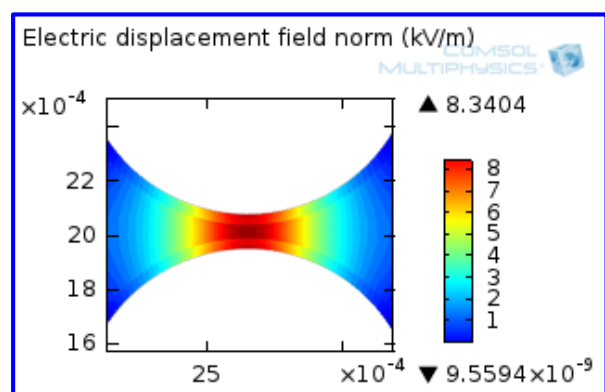


Fig.IV.2 : Modèle de simulation du champ électrique entre spires.



(a)



(b)

Fig.IV.3 : Champ électrique entre spires :

(a). Isolant entre spires est l'air ; (b). Motorette est plongée dans l'huile.

Le champ électrique entre spires est d'autant plus important que l'espacement entre ces spires est faible. Il atteint sa valeur maximale pour un espacement de 50 μm , voire 14 kV/m lorsque

Chapitre IV : Simulation du champ électrique dans les machines électriques

la motorette n'est pas imprégnée d'huile et 8.34 kV/m lorsqu'elle est plongée dans l'huile. Cet écart de l'intensité du champ électrique est logique vu la supériorité de la permittivité relative de l'huile ($\epsilon_r = 3.2$) par rapport à celle de l'air ($\epsilon_r = 1$).

Cependant, pour le premier cas (Fig.IV.3-a), le champ électrique est de 4 kV/m au niveau de l'émail, et il est de 8 kV/m pour le deuxième cas (Fig.IV.3-b). Cela est dû peut-être au fait que la permittivité relative de l'huile est plus faible que celle de l'émail ($\epsilon_r = 3.5$).

IV.5.1 Influence des impuretés sur le champ électrique

Afin d'évaluer l'influence de la nature, les dimensions ainsi que la forme des impuretés sur le champ électrique, nous introduisons dans ce qui suit, des cavités d'air, des vacuoles d'eau (sphériques et ellipsoïdales) et des rectangles métalliques de différentes dimensions et positions entre les spires.

IV.5.1.1 Influence des cavités d'air

✓ Influence de la cavité sphérique d'air en fonction de son rayon

Dans le but d'estimer l'influence du rayon de la cavité d'air sphérique introduite entre deux spires (Fig.IV.4), nous prenons comme rayons de la sphère R : (a). $R = 20 \mu\text{m}$; (b). $R = 10 \mu\text{m}$; (c). $R = 5 \mu\text{m}$.

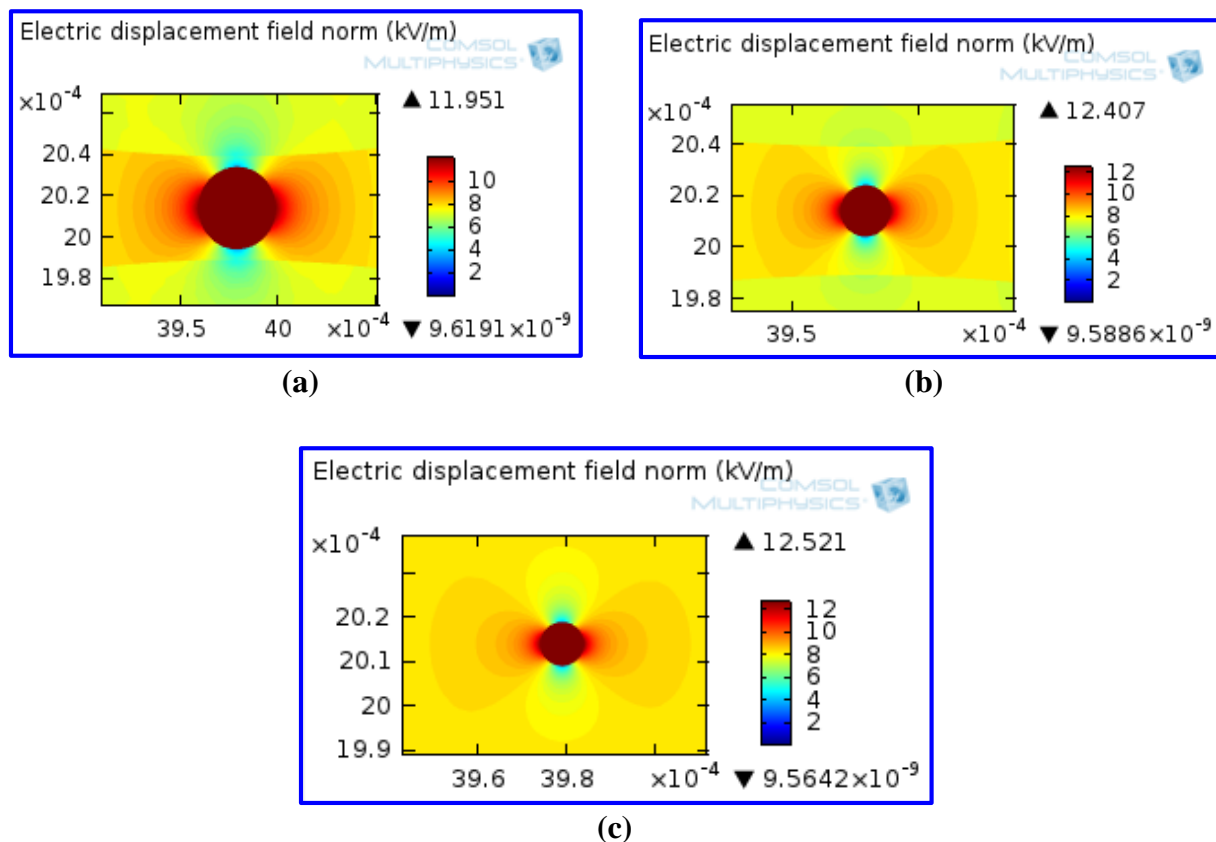


Fig.IV.4 : Influence du rayon de la cavité d'air R sur le champ électrique :
(a). $R = 20 \mu\text{m}$; (b). $R = 10 \mu\text{m}$; (c). $R = 5 \mu\text{m}$.

Chapitre IV : Simulation du champ électrique dans les machines électriques

Sur toutes les configurations ci-dessus, nous remarquons une augmentation du champ électrique maximum à cause des perturbations dues à la cavité. En raison de la valeur de la permittivité relative de la cavité d'air ($\epsilon_r = 1$) qui est inférieure à celle de l'huile, le champ électrique est plus intense à l'intérieur de la bulle d'air.

Le rayon de la cavité d'air n'a pas une grande influence sur le champ électrique maximum.

✓ Influence de deux cavités d'air sphériques en fonction de la distance qui les sépare

Pour étudier l'influence mutuelle de deux cavités d'eau, nous insérons deux sphères d'air de même rayon ($R = 20 \mu\text{m}$) entre les spires, puis nous varions la distance « d » qui sépare ces deux bulles (Fig.IV.5).

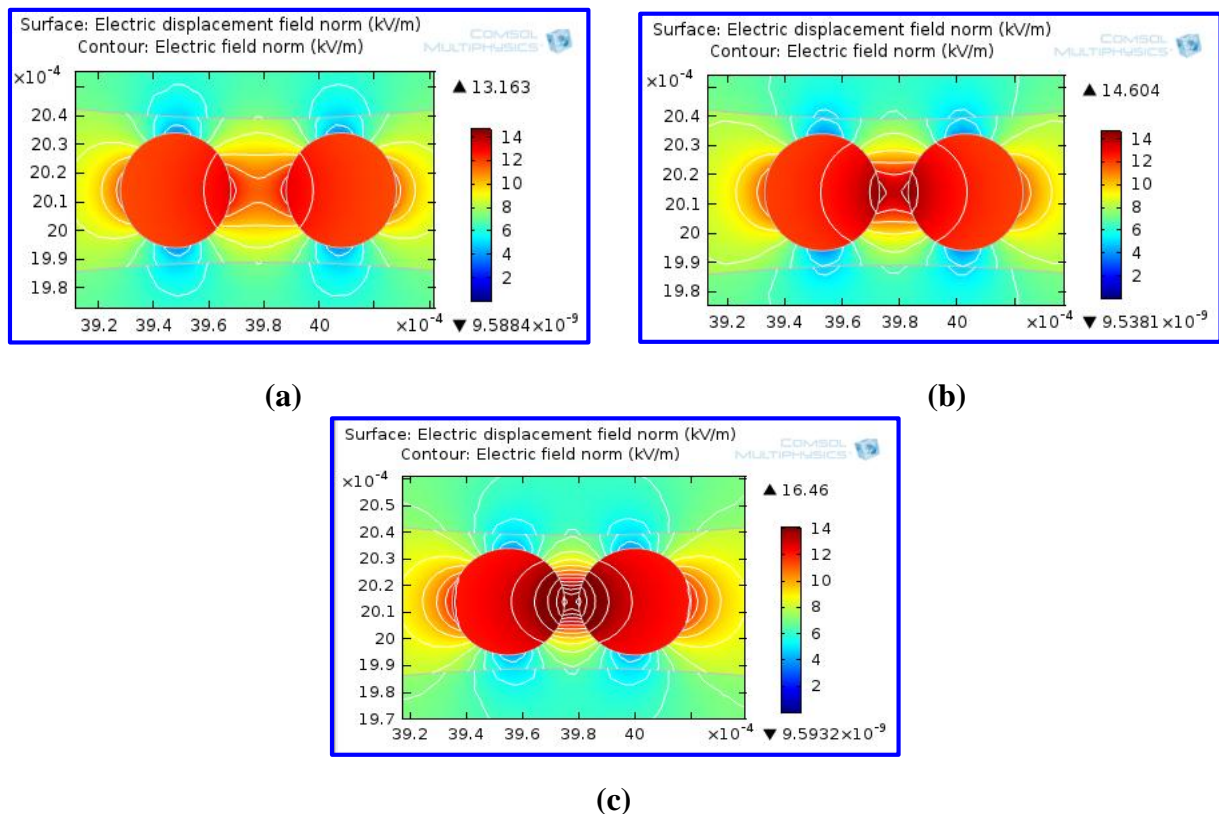


Fig.IV.5 : Influence de la distance « d » qui sépare les deux cavités d'air sur le champ électrique :

(a). $d = 20 \mu\text{m}$; (b). $d = 10 \mu\text{m}$; (c). $d = 5 \mu\text{m}$.

Nous constatons une légère intensification du champ électrique entre les deux bulles d'air avec la diminution de la distance qui sépare les deux sphères de mêmes dimensions ($R = 20 \mu\text{m}$). Le champ électrique est surtout accentué au niveau de l'interface des deux milieux l'huile isolante/cavités d'air.

✓ Influence de la cavité ellipsoïdale d'air en fonction de sa taille

Nous prenons trois tailles différentes de l'ellipsoïde d'air incorporé horizontalement entre les deux spires comme le montre la figure suivante (Fig.IV.6).

Le petit rayon de l'ellipsoïde est symbolisé par x-semiaxix, tandis que y-semiaxix représente le grand rayon. En modifiant ces deux paramètres, le rayon du sommet de l'ellipsoïde change aussi.

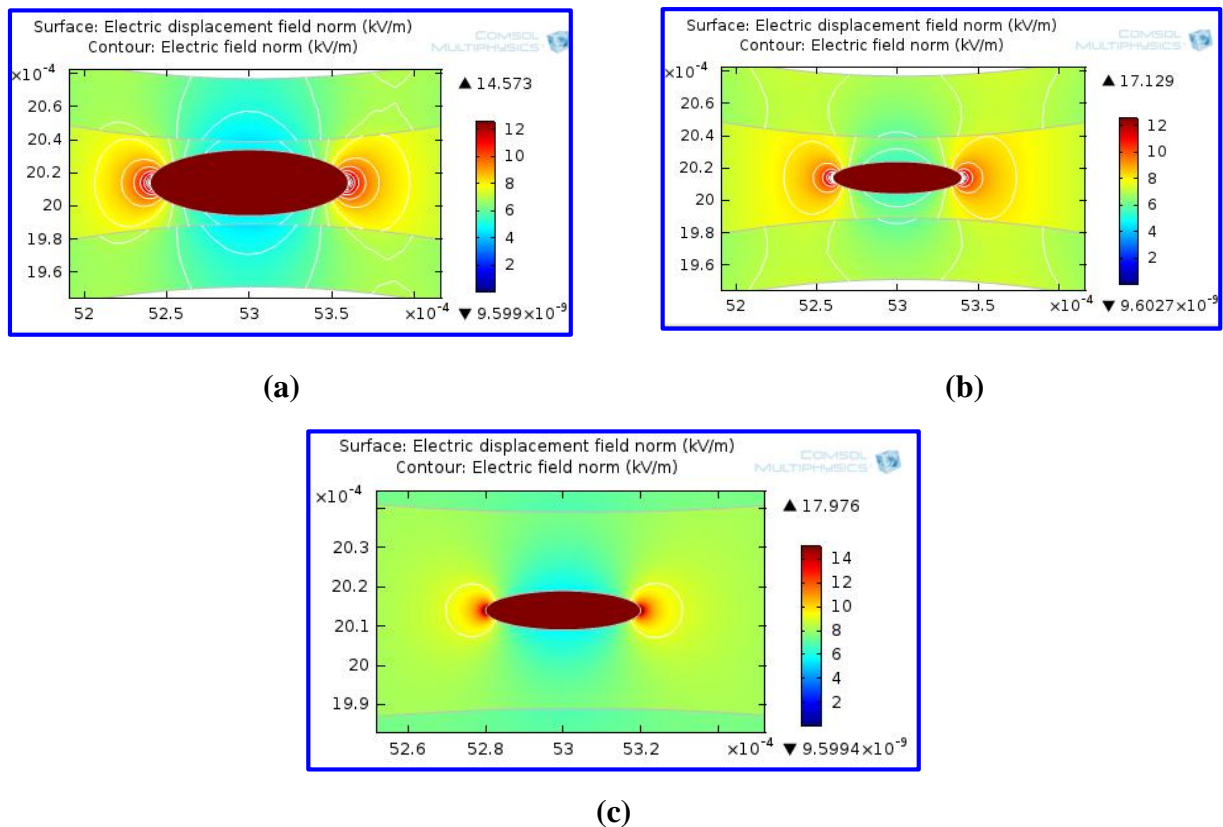


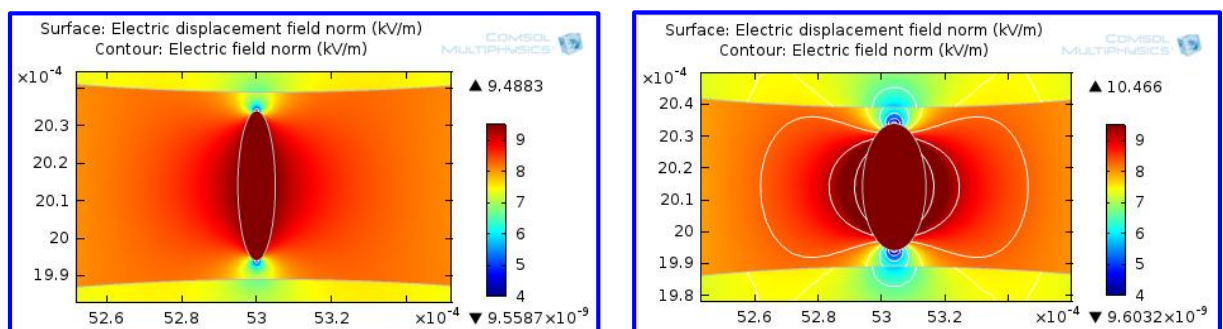
Fig.IV.6 : Influence de la taille de l'ellipsoïde d'air sur le champ électrique :

- (a). x-semiaxis = 60 μm , y-semiaxis = 20 μm ;
- (b). x-semiaxis = 40 μm , y-semiaxis = 10 μm ;
- (c). x-semiaxis = 20 μm , y-semiaxis = 5 μm .

Lorsque l'ellipsoïde d'air est présent horizontalement dans l'huile, le champ électrique est accentué sur ses parois latérales, et il est au maximum à l'intérieur de la cavité. Lorsque la taille de l'ellipsoïde est réduite, on remarque une petite augmentation du champ électrique qui est dû au rétrécissement du rayon des deux sommets latéraux de l'ellipsoïde.

✓ Influence de la cavité d'air ellipsoïdale en fonction du rayon de son sommet

Afin de relever l'influence de la position (verticale ou horizontale) de l'ellipsoïde et l'effet de son rayon du sommet sur le champ électrique, nous introduisons verticalement entre les deux spires un ellipsoïde et nous varions son rayon du sommet (Fig.IV.7).



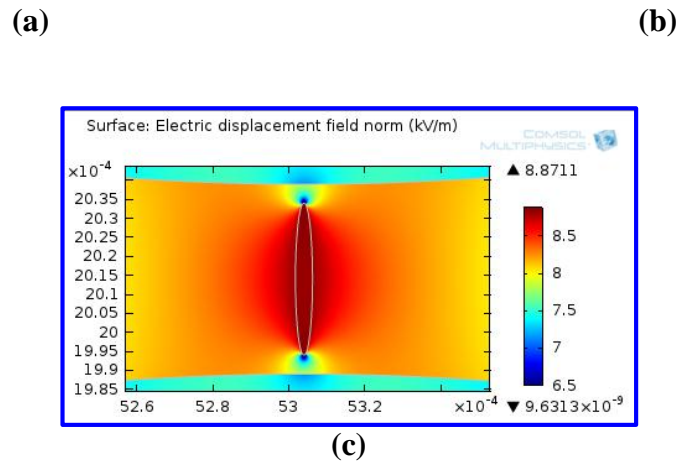


Fig.IV.7 : Influence du rayon du sommet de l'ellipsoïde d'air sur le champ électrique :

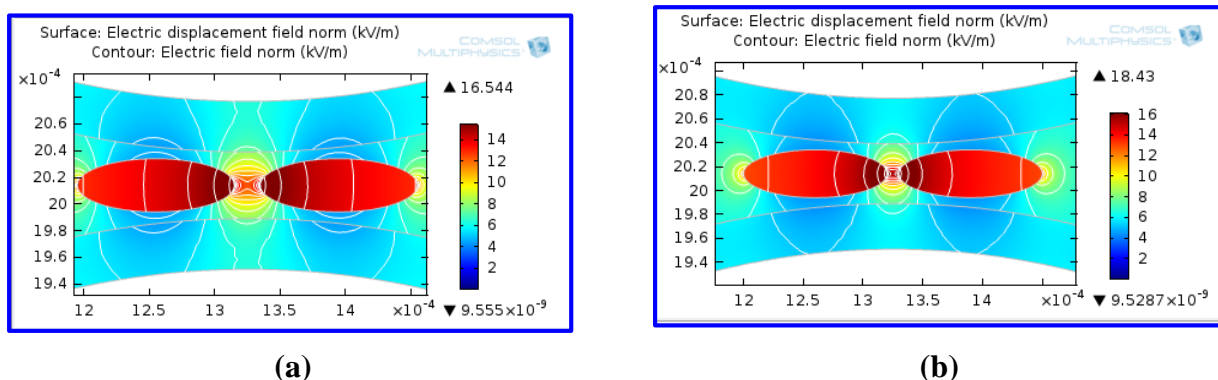
- (a). x-semiaxis = 20 μm , y-semiaxis = 10 μm ;
- (b). x-semiaxis = 20 μm , y-semiaxis = 5 μm ;
- (c). x-semiaxis = 20 μm , y-semiaxis = 2.25 μm .

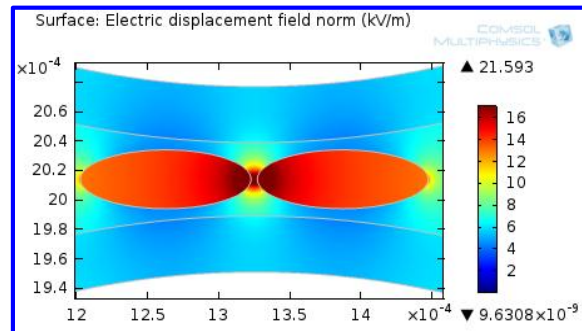
Le champ électrique est intense au niveau des parois latérales de l'ellipsoïde et il est quasiment nul au niveau des deux sommets même si la position de l'ellipsoïde est verticale et que ces deux sommets sont très proches des fils du cuivre émaillés. Ainsi, la variation du rayon du sommet de l'ellipsoïde n'a pas d'incidence sur l'intensification du champ électrique.

D'après les résultats présentés sur les deux figures précédentes (Fig.IV.6) et (Fig.IV.7), le champ électrique prend des valeurs plus importantes lorsque l'ellipsoïde d'air se trouve en position horizontale dans l'huile par rapport à la position verticale.

✓ Influence de deux cavités ellipsoïdales d'air en fonction de la distance qui les sépare

Pour constater l'influence mutuelle de deux cavités d'air sur le champ électrique, nous insérons horizontalement deux ellipsoïdes d'air de même taille (x-semiaxis = 60 μm , y-semiaxis = 20 μm) entre les deux spires, puis nous varions la distance « d » qui sépare ces deux dernières (Fig.IV.8).





(c)

Fig.IV.8 : Influence de la distance « d » qui sépare les deux ellipsoïdes d'air sur le champ électrique : (a). $d = 20 \mu\text{m}$; (b). $d = 10 \mu\text{m}$; (c). $d = 5 \mu\text{m}$.

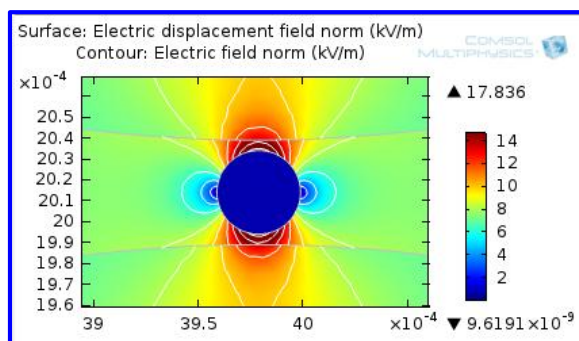
L'intensité du champ électrique s'accroît d'autant plus que les deux cavités d'air sont proches. Le champ atteint sa valeur maximale au niveau des deux sommets latéraux des deux ellipsoïdes et dans la zone comprise entre ces deux derniers.

D'après les résultats présentés, les cavités ellipsoïdales d'air ont un effet un peu plus remarquable sur l'intensité du champ électrique que leurs homologues sphériques.

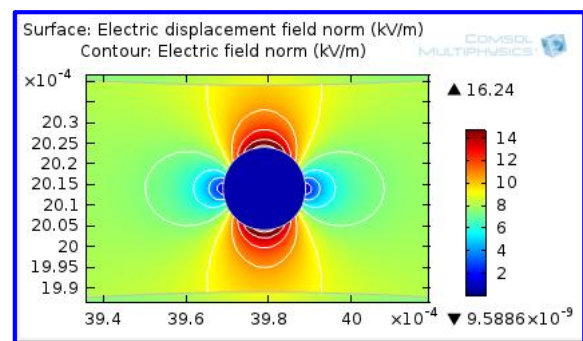
IV.5.1.2 Influence des vacuoles d'eau

✓ Influence de la vacuole d'eau sphérique en fonction de son rayon

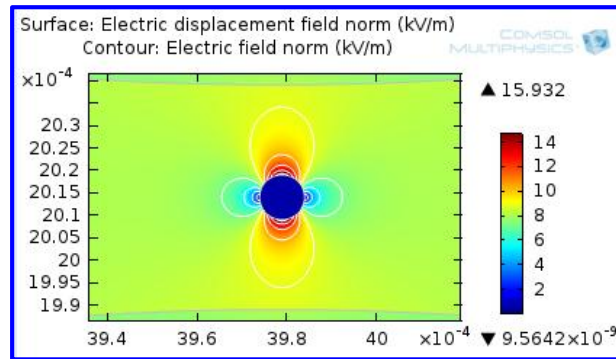
On inclut une vacuole d'eau sphérique entre deux spires (Fig.IV.9), nous prenons pour rayons de la sphère R : (a). $R = 20 \mu\text{m}$; (b). $R = 10 \mu\text{m}$; (c). $R = 5 \mu\text{m}$.



(a)



(b)



(c)

Fig.IV.9 : Influence du rayon « R » de la vacuole d'eau sur le champ électrique :

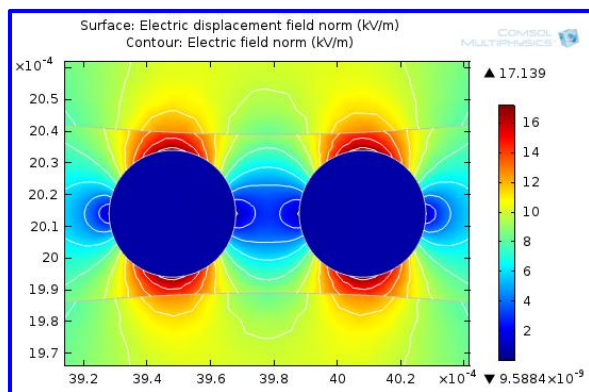
(a). $R = 20 \mu\text{m}$; (b). $R = 10 \mu\text{m}$; (c). $R = 5 \mu\text{m}$.

La permittivité très élevée à l'intérieur de la vacuole d'eau ($\epsilon_r=80$) provoque une perturbation sur la distribution du champ électrique ramenant ce dernier à des valeurs importantes dans l'isolation. La présence de la sphère d'eau donne lieu à un renforcement du champ électrique au niveau de la surface de l'isolant entourant la particule d'eau. La valeur du champ est d'autant plus accentuée que le rayon de la vacuole d'eau est grand.

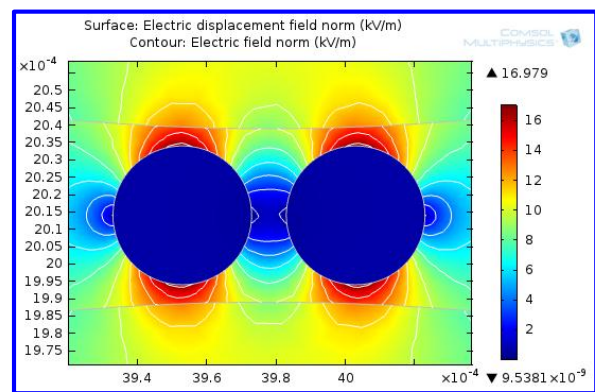
Le champ électrique est nul à l'intérieur de la vacuole d'eau.

✓ Influence de deux vacuoles d'eau sphériques en fonction de la distance qui les sépare

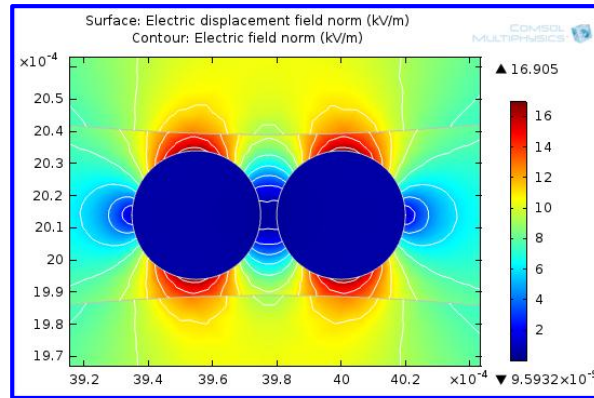
Nous insérons deux vacuoles d'eau de même rayon ($R = 20 \mu\text{m}$) entre les spires, puis nous varions la distance « d » qui sépare ces deux dernières (Fig.IV.10).



(a)



(b)



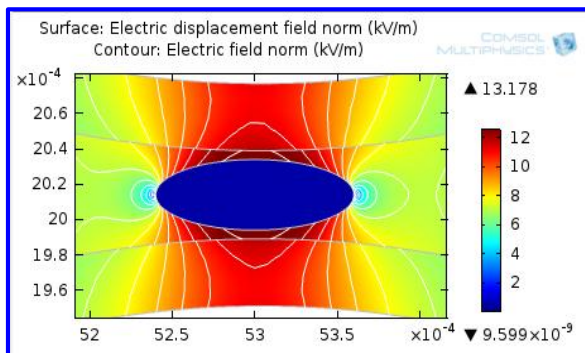
(c)

Fig.IV.10 : Influence de la distance « d » qui sépare les deux cavités d’air sur le champ électrique : (a). $d = 20 \mu\text{m}$; (b). $d = 10 \mu\text{m}$; (c). $d = 5 \mu\text{m}$.

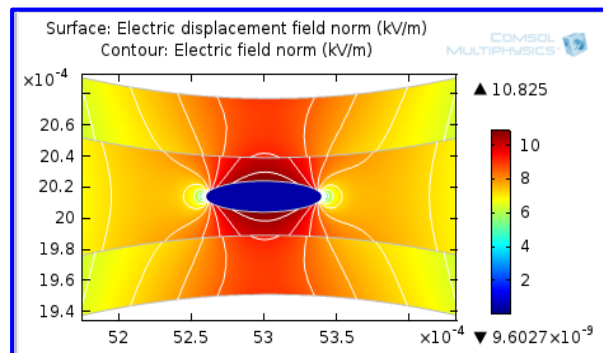
Puisque le champ électrique est très faible sur les parois latérales des vacuoles d’eau, la réduction de la distance qui sépare deux bulles d’eau n’influe d’aucune manière la valeur du champ électrique.

✓ **Influence de la vacuole d’eau ellipsoïdale en fonction de sa taille**

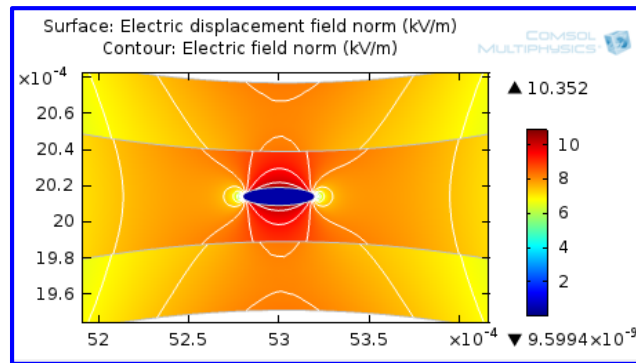
Nous considérons trois tailles différentes de l’ellipsoïde d’eau incorporé horizontalement entre les deux spires (Fig.IV.6), soient les cas suivants : (a). x-semiaxis = $60 \mu\text{m}$, y-semiaxis = $20 \mu\text{m}$; (b). x-semiaxis = $40 \mu\text{m}$, y-semiaxis = $10 \mu\text{m}$; (c). x-semiaxis = $20 \mu\text{m}$, y-semiaxis = $5 \mu\text{m}$.



(a)



(b)



(c)

Fig.IV.11 : Influence de la taille de l'ellipsoïde d'eau sur le champ électrique :

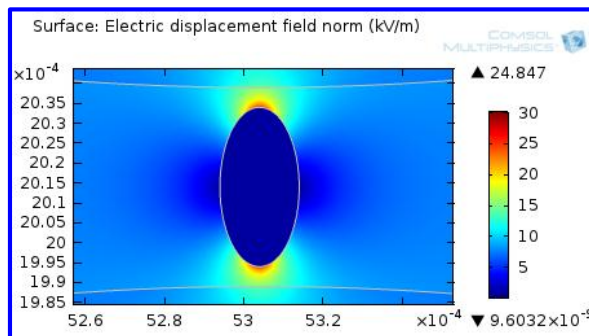
- (a). x-semiaxis = 60 μm , y-semiaxis = 20 μm ; (b). x-semiaxis = 40 μm , y-semiaxis = 10 μm ;
 (c). x-semiaxis = 20 μm , y-semiaxis = 5 μm .

La réduction de la taille de l'ellipsoïde entreposé en position horizontale entre les spires réduit la valeur du champ électrique vu l'éloignement de la particule d'eau du fil du cuivre.

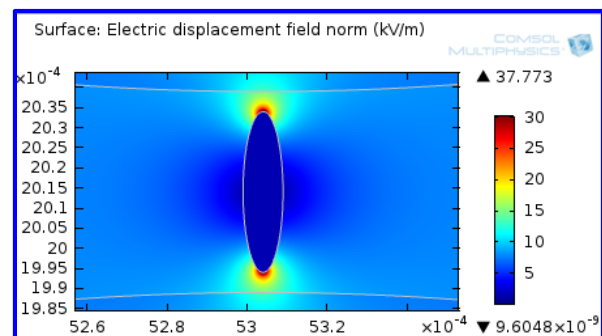
Pour les ellipsoïdes d'eau incorporés horizontalement entre les spires, le champ est faible au niveau des deux sommets, contrairement aux ellipsoïdes d'air pour la même disposition.

✓ Influence de la vacuole d'eau ellipsoïdale en fonction du rayon de son sommet

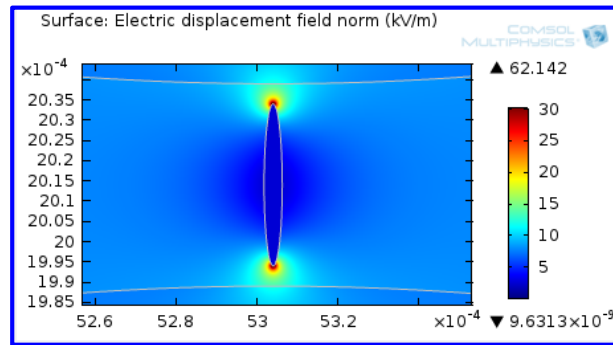
Nous implantons une ellipsoïde d'eau verticalement entre deux spires comme l'indique la figure ci-dessous (Fig.IV.12), puis nous varions le rayon du sommet de l'ellipsoïde afin d'observer l'influence de ce dernier sur le champ électrique.



(a)



(b)



(c)

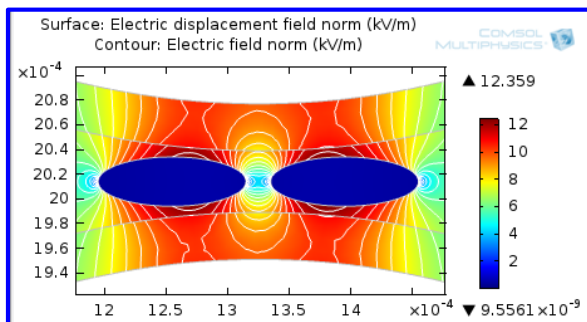
Fig.IV.12 : Influence du rayon de courbure du sommet de l'ellipsoïde d'eau sur le champ électrique :
 (a). x-semiaxis = 20 μm , y-semiaxis = 10 μm ; (b). x-semiaxis = 20 μm , y-semiaxis = 5 μm ;
 (c). x-semiaxis = 20 μm , y-semiaxis = 2.25 μm .

Lorsque la vacuole ellipsoïdale d'eau est en position verticale entre les deux spires, le champ électrique se focalise sur les deux sommets de l'ellipsoïde, et s'accroît avec la réduction du rayon du sommet.

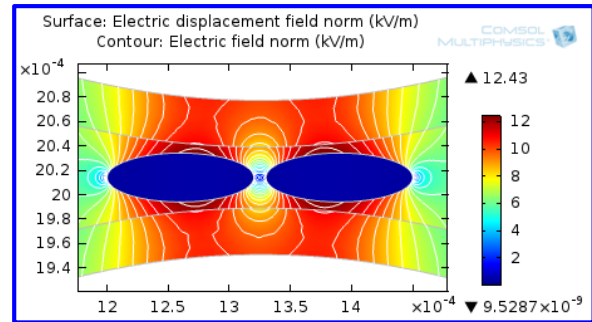
Conformément aux résultats présentés sur les deux figures (Fig.IV.11) et (Fig.IV.12), la position verticale de l'ellipsoïde d'eau provoque des valeurs du champ plus intenses par rapport à la position horizontale.

✓ **Influence de deux vacuoles d'eau ellipsoïdales en fonction de la distance qui les sépare**

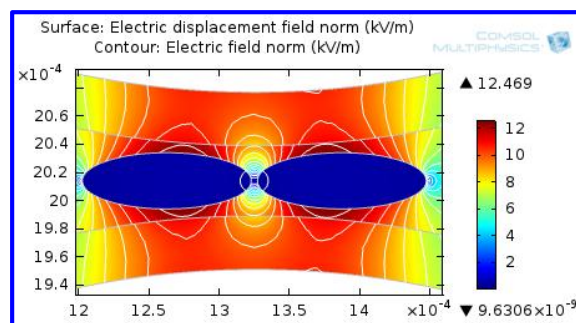
Deux ellipsoïdes d'eau de même taille (x-semiaxis = 60 μm , y-semiaxis = 20 μm) sont insérés horizontalement entre les deux spires, puis nous varions la distance « d » qui sépare les deux vacuoles (Fig.IV.13).



(a)



(b)



(c)

Fig.IV.13 : Influence de la distance « d » qui sépare les deux ellipsoïdes d'eau sur le champ électrique : (a). $d = 20 \mu\text{m}$; (b). $d = 10 \mu\text{m}$; (c). $d = 5 \mu\text{m}$.

Comme dans le cas des vacuoles sphériques d'eau, la distance qui sépare les deux ellipsoïdes d'eau n'a aucune influence sur le champ électrique.

IV.5.1.3 Influence des copeaux métalliques

Nous implantons maintenant des rectangles métalliques entre les spires de manière à ce qu'ils soient coincés sur les parois de l'émail. Les rectangles ont une longueur L et une largeur l . La figure ci-dessous illustre quatre cas qui peuvent se produire réellement dans la pratique (Fig.IV.14).

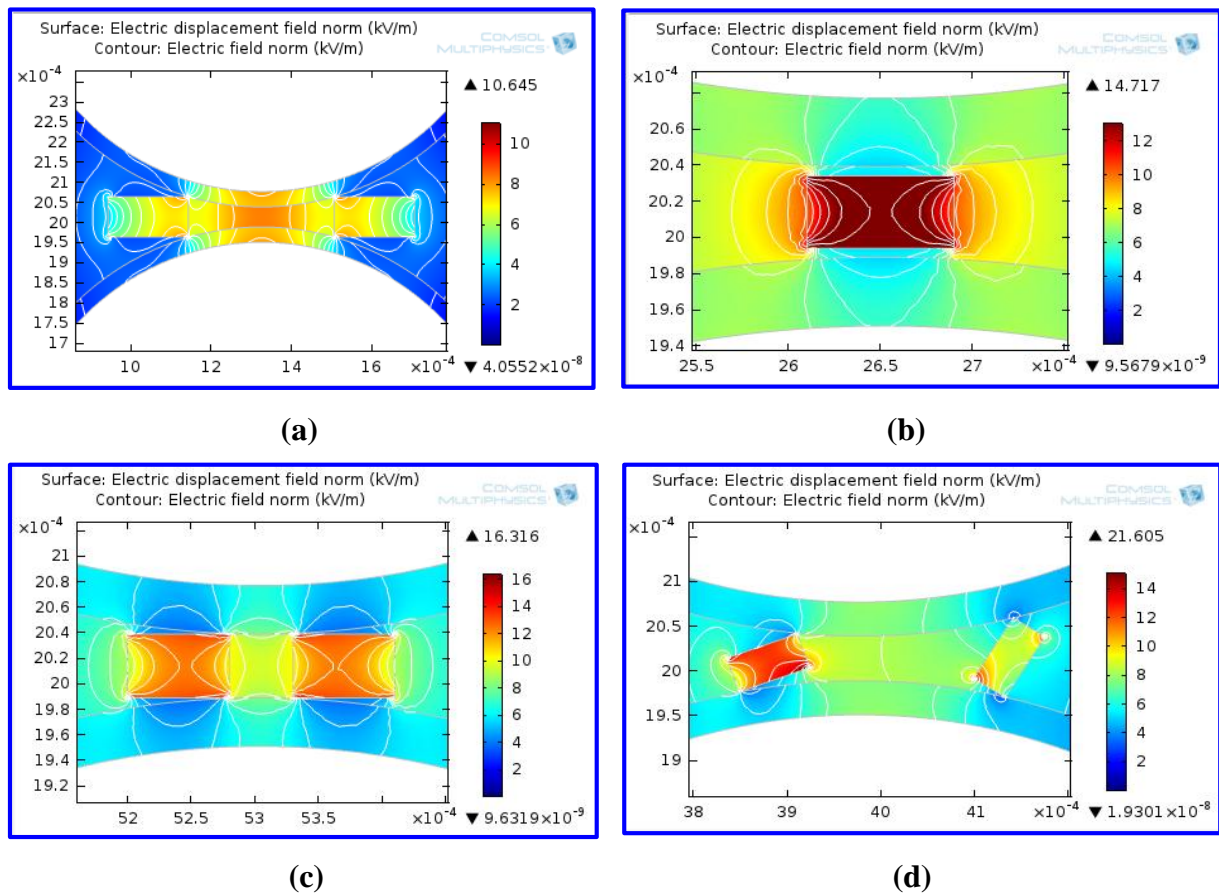


Fig.IV.14 : Influence des impuretés métalliques sur le champ électrique :

- (a). $L = 200 \mu\text{m}$, $l = 100 \mu\text{m}$; (b). $L = 80 \mu\text{m}$, $l = 40 \mu\text{m}$;
 (c). $L = 80 \mu\text{m}$, $l = 50 \mu\text{m}$; (d). $L = 80 \mu\text{m}$, $l = 40 \mu\text{m}$.

On perçoit clairement que la présence de particules métalliques dans l'huile donne lieu à un renforcement local du champ électrique, notamment sur les pointes des rectangles. Parmi les quatre combinaisons proposées sur cette figure (Fig.IV.14), la dernière configuration est la plus néfaste en raison de la valeur très élevée du champ électrique sur les pointes des rectangles coincés sur les parois de l'émail. Un échauffement local au niveau de l'émail peut être provoqué sous l'effet du champ intense, entraînant ainsi la dégradation et le vieillissement de l'émail.

IV.6 Modèle 2 : Isolation entre spires, l'émail est constitué de deux couches

La simulation des champs électriques entre spires est similaire au modèle 1, la seule différence est que dans ce modèle, l'émail est composé de 2 matériaux superposés : du polyesterimide côté cuivre et du polyamideimide côté extérieur (Fig.IV.15). La constante diélectrique du PEI est de 3,35 et celle du PAI de 4.

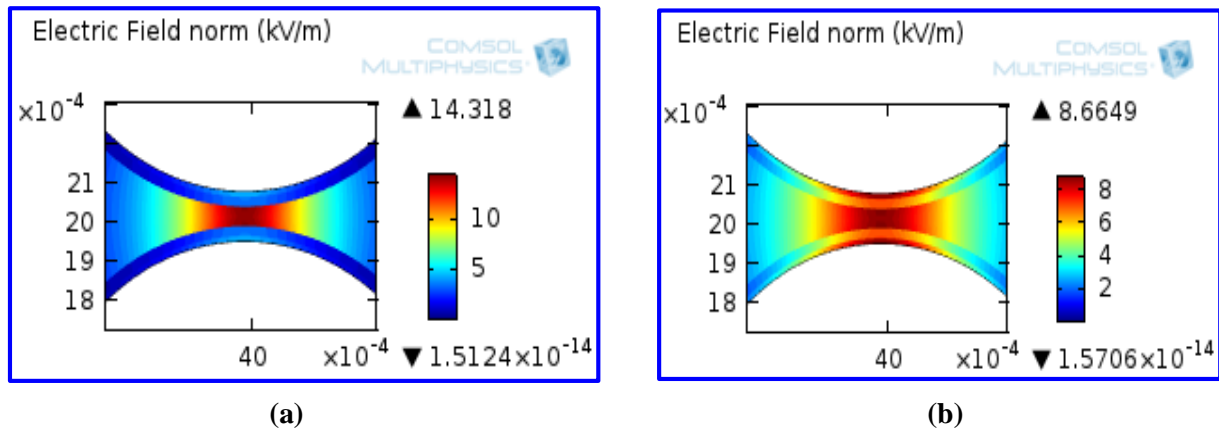


Fig.IV.15 : Champ électrique entre spires dans le cas où l'émail est constitué de deux couches :
(a). Isolation avec l'air ; (b). Isolation avec l'huile.

Il est certain, même dans le modèle où l'émail est constitué de deux couches, que le champ électrique est beaucoup plus intense pour une isolation avec l'air (Fig.IV.15 -a) que pour une isolation avec l'huile (Fig.IV.15 -b).

La valeur du champ électrique est moins importante sur le côté extérieur de l'émail que dans l'huile et côté cuivre (la couche interne de l'émail), car la permittivité du polyamideimide ($\epsilon_r = 4$) est supérieure à celle de l'huile ($\epsilon_r = 3.2$) et le polyesterimide ($\epsilon_r = 3.35$).

Signalons que l'intensité du champ maximum est approximativement la même dans le cas où l'émail est constitué juste d'une seule couche de résine ayant une constante diélectrique de 3.5 (Fig.IV.3), et dans le cas où l'émail est une superposition de deux matériaux (polyamideimide et polyesterimide) (Fig.IV.15).

IV.6.1 Influence des impuretés sur le champ électrique

Dans ce qui suit, nous allons simuler la présence de cavités d'air et de vacuoles d'eau dans la couche externe de l'émail.

IV.6.1.1 Influence des cavités d'air

✓ Influence d'une cavité d'air sphérique

Nous introduisons une sphère d'air au milieu de la couche externe de l'émail (Fig.IV.16), nous prenons comme rayons de la cavité R : (a). $R = 10 \mu\text{m}$; (b). $R = 5.7 \mu\text{m}$.

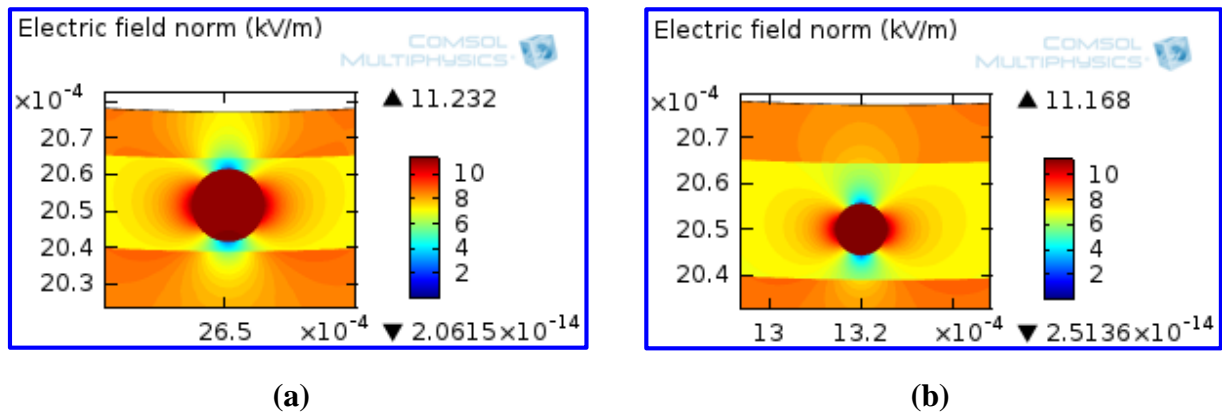


Fig.IV.16 : Influence de la présence d'une cavité d'air dans la couche externe de l'émail :
 (a). Rayon de la sphère = 10 μm ; (b). Rayon de la sphère = 5.7 μm .

A cause de la valeur de la permittivité relative de la cavité d'air ($\epsilon_r = 1$) qui est inférieure à celle du polyamideimide ($\epsilon_r = 4$), le champ électrique est intense à l'intérieur de la cavité. En effet, la variation de la taille de la cavité d'air n'a pas une incidence sur l'intensité du champ électrique.

✓ Influence de deux cavités d'air sphériques en fonction de la distance qui les sépare

Nous insérons deux cavités d'air sphériques de même rayon ($R=5.7\mu\text{m}$) dans la couche externe de l'émail comme le montre la figure ci-dessous (Fig.IV.17), nous varions la distance d qui sépare les deux sphères afin d'évaluer son influence sur la valeur du champ électrique.

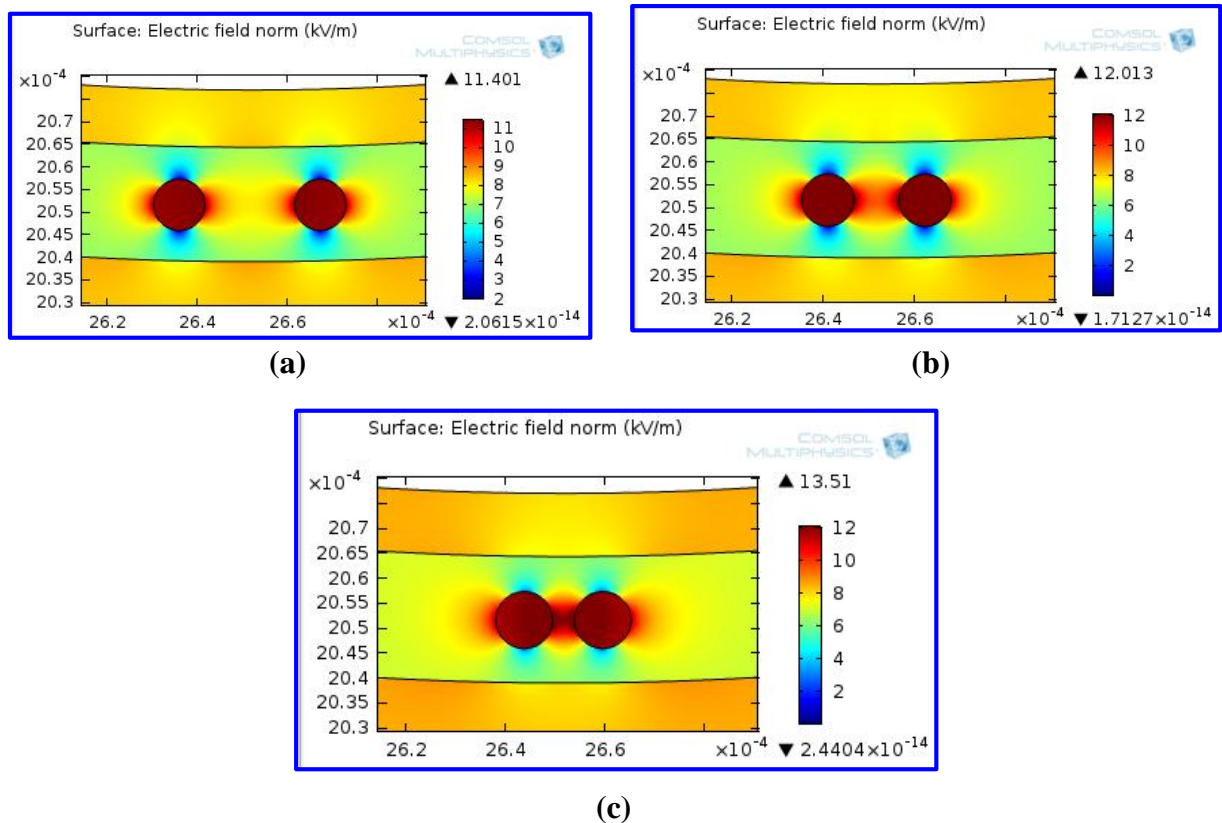


Fig.IV.17 : Influence de la distance « d » qui sépare les deux cavités d'air de même rayon ($R=5.7\mu\text{m}$) sur le champ électrique : (a). $d = 20\ \mu\text{m}$; (b). $d = 10\ \mu\text{m}$; (c). $d = 5\ \mu\text{m}$.

Le champ électrique est maximum à l'intérieur de la cavité, et vu qu'il se focalise aussi sur les parois latérales des bulles d'air, la diminution de la distance qui sépare les deux cavités d'air amplifie la valeur du champ entre ces deux dernières.

✓ Influence de la cavité ellipsoïdale d'air en fonction de sa position

Dans le but d'estimer l'effet de la position de la cavité ellipsoïdale sur le champ électrique, nous allons insérer un ellipsoïde d'air au niveau de la couche externe de l'émail sur trois positions différentes, ces dernières sont représentées sur la figure suivante (Fig.IV.18).

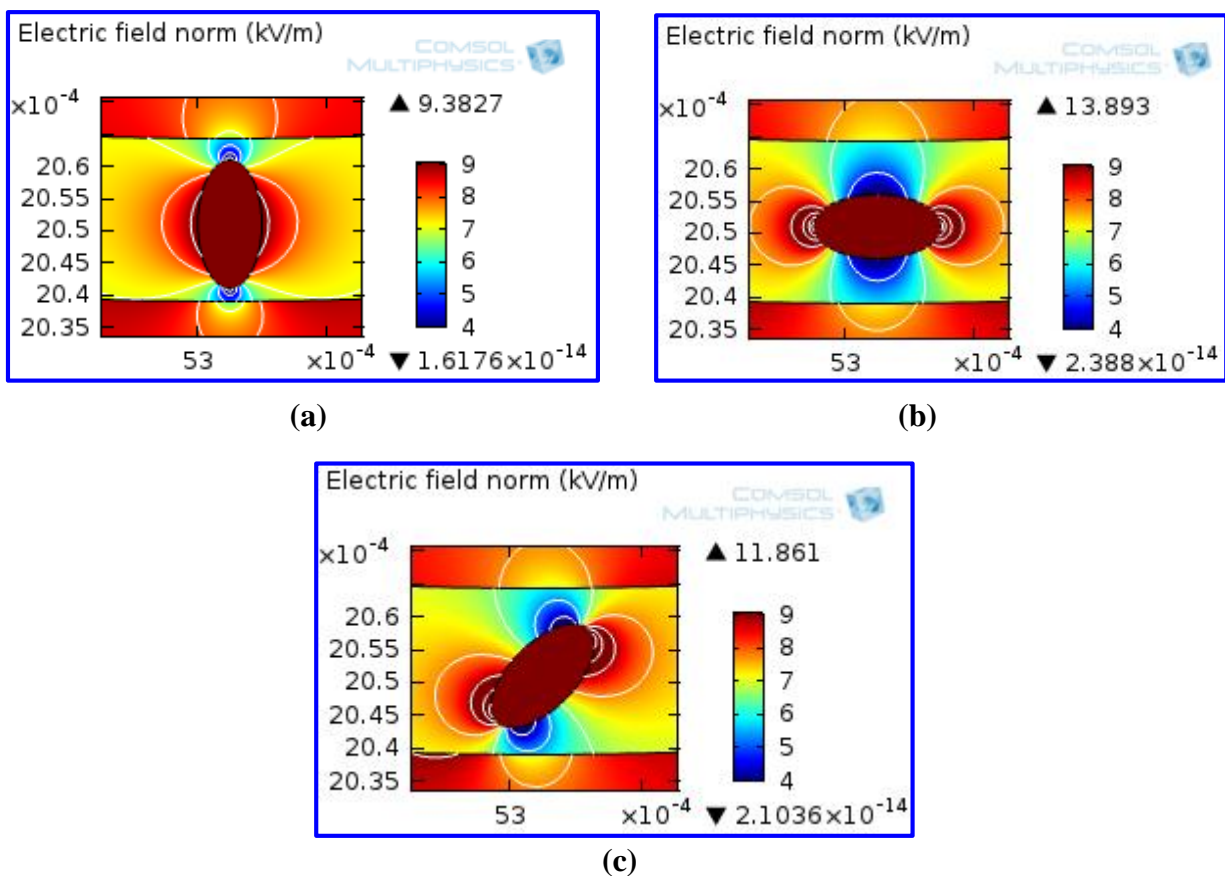


Fig.IV.18 : Influence de la position d'ellipsoïde d'air sur le champ électrique : (a). Position verticale (b). Position horizontale ; (c). Rotation de 45° .

Nous constatons clairement que le champ est intense aux extrémités latérales de la cavité d'air, et la position la plus défavorable est lorsque l'ellipsoïde est déposé horizontalement dans l'émail (Fig.IV.18-b), où on note une intensité du champ remarquable par rapport aux deux autres positions. Cette intensification peut prendre de l'ampleur si le rayon de courbure du sommet de l'ellipsoïde est plus restreint, comme nous l'avons déjà observé précédemment dans le contexte de l'influence du rayon du sommet de l'ellipsoïde d'air présent dans l'huile sur le champ électrique (Fig.IV.6).

IV.6.1.2 Influence des vacuoles d'eau

✓ Influence de la vacuole sphérique d'eau

Nous introduisons une sphère d'eau au milieu de la couche externe de l'émail (Fig.IV.19), nous prenons comme rayons de la vacuole R : (a). $R = 10 \mu\text{m}$; (b). $R = 5.7 \mu\text{m}$.

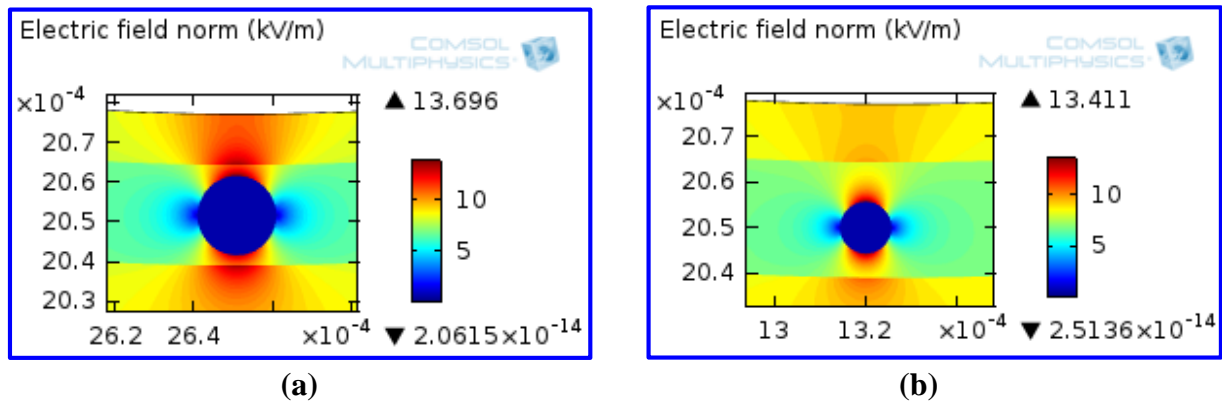
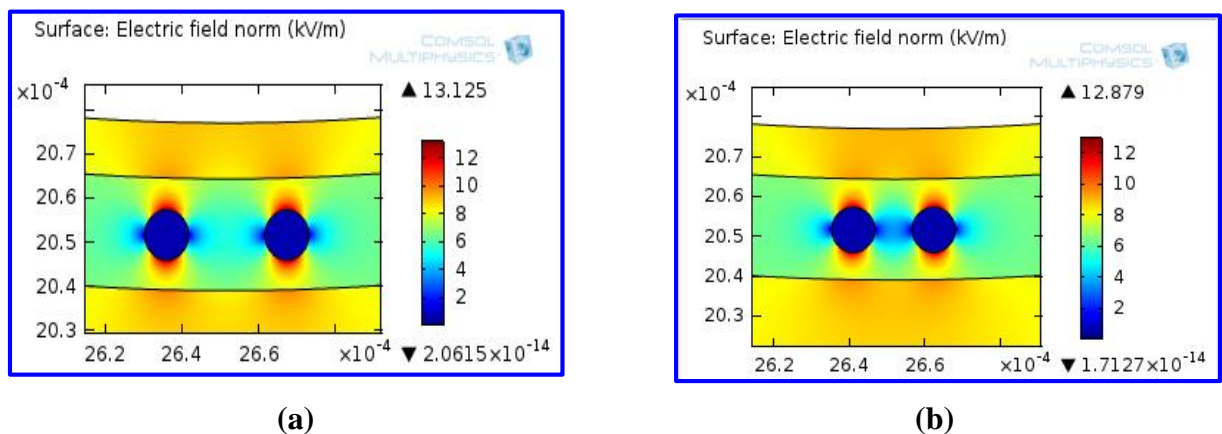


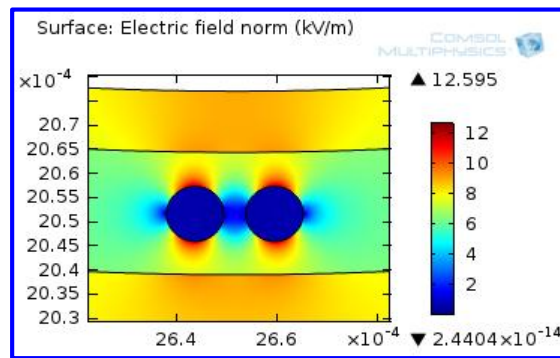
Fig.IV.19 : Influence de la présence d'une cavité d'eau dans la couche externe de l'émail :
(a). Rayon de la sphère = $10 \mu\text{m}$; (b). Rayon de la sphère = $5.7 \mu\text{m}$.

L'augmentation du rayon de la vacuole sphérique ne présente pas un effet marquant sur l'intensité du champ électrique.

✓ Influence de deux vacuoles sphériques d'eau en fonction de la distance qui les sépare

Nous insérons deux vacuoles d'eau sphériques de même rayon ($R=5.7\mu\text{m}$) dans la couche externe de l'émail comme le montre la figure ci-dessous (Fig.IV.17), puis nous varions la distance d qui sépare les deux sphères : (a). $d = 20 \mu\text{m}$; (b). $d = 10 \mu\text{m}$; (c). $d = 5 \mu\text{m}$.





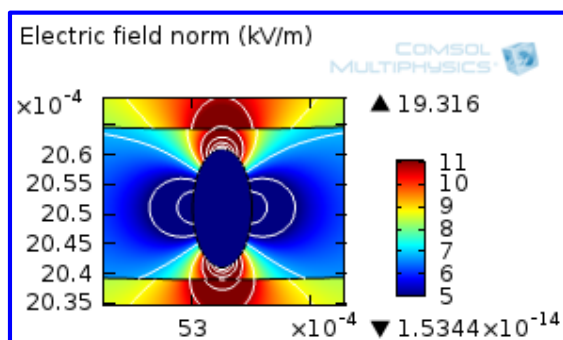
(c)

Fig.IV.20 : Influence de la distance « d » qui sépare les deux vacuoles d'eau de même rayon ($R=5.7\mu\text{m}$) sur le champ électrique : (a). $d = 20 \mu\text{m}$; (b). $d = 10 \mu\text{m}$; (c). $d = 5 \mu\text{m}$.

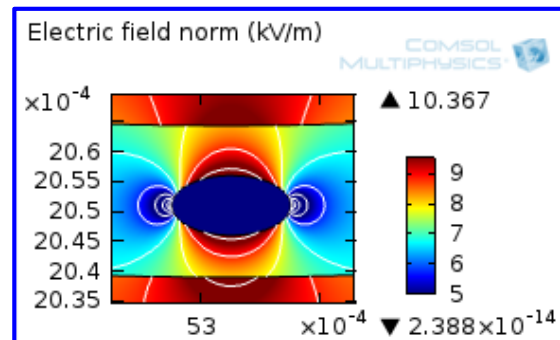
De la même façon que pour les résultats trouvés dans le cas où l'émail est composé d'un seul matériau, le champ électrique est renforcé sur les surfaces entourant la vacuole d'eau qui sont traversées par un champ radiale. Pour cela, la décroissance de la distance entre les deux vacuoles n'a pas de conséquence sur la valeur du champ électrique.

✓ Influence de la vacuole ellipsoïdale d'eau en fonction de sa position

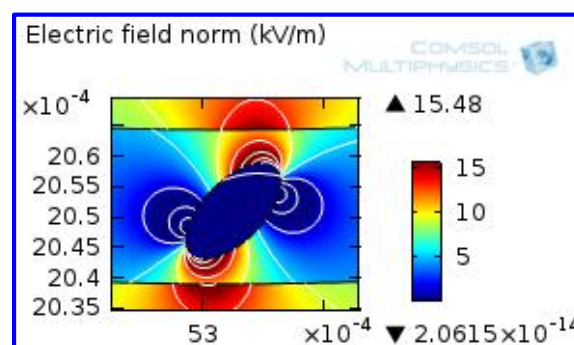
Afin d'évaluer l'influence de la position de l'ellipsoïde d'eau sur le champ électrique, nous insérons un ellipsoïde dans la couche externe de l'émail sur la position verticale, horizontale et enfin sur une position où l'ellipsoïde subit une rotation de 45° (Fig.IV.21).



(a)



(b)



(c)

Fig.IV.21 : Influence de la position d'ellipsoïde d'eau sur le champ électrique : (a). Position verticale (b). Position horizontale ; (b). Rotation de 45° .

Chapitre IV : Simulation du champ électrique dans les machines électriques

Le champ électrique se concentre sur les deux sommets de l'ellipsoïde, son intensification est d'autant plus accentuée lorsque le sommet de la vacuole d'eau est exposé verticalement par rapport au fil du cuivre émaillé (Fig.IV.21-a).

IV.7 Model 3 : Isolation entre phase et masse

Dans cette partie, nous nous intéressons à la simulation du champ électrique entre phase et masse pour une tension appliquée V_0 égale à 1 V. Le modèle est constitué de trois spires en cuivre imprégnées par une résine époxy ; elles sont séparées de la masse par un papier ayant une épaisseur de 380 μm et une permittivité relative de 3.6, celui-ci est espacé de la masse de 50 μm . la figure suivante illustre le modèle de simulation (Fig.IV.22).

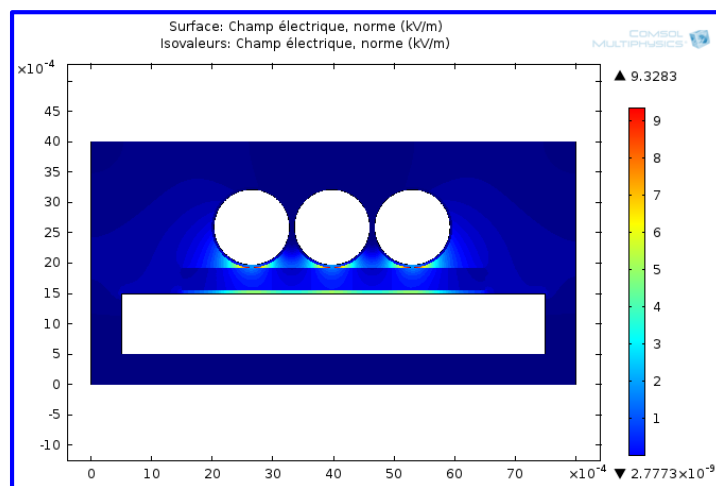


Fig.IV.22 : Modèle entre phase et masse.

Les deux figures (Fig.IV.23) et (Fig.IV.24) représentent respectivement le champ électrique entre phase et masse dans le cas où l'isolant est l'air, et le cas où la motorette est plongée dans l'huile. Une première simulation est réservée pour le cas où l'émail est constitué seulement d'une couche et une deuxième pour l'émail constitué de deux couches. Nous précisons que ces deux simulations sont réalisées sans la présence de défauts dans l'isolation (papier ou émail).

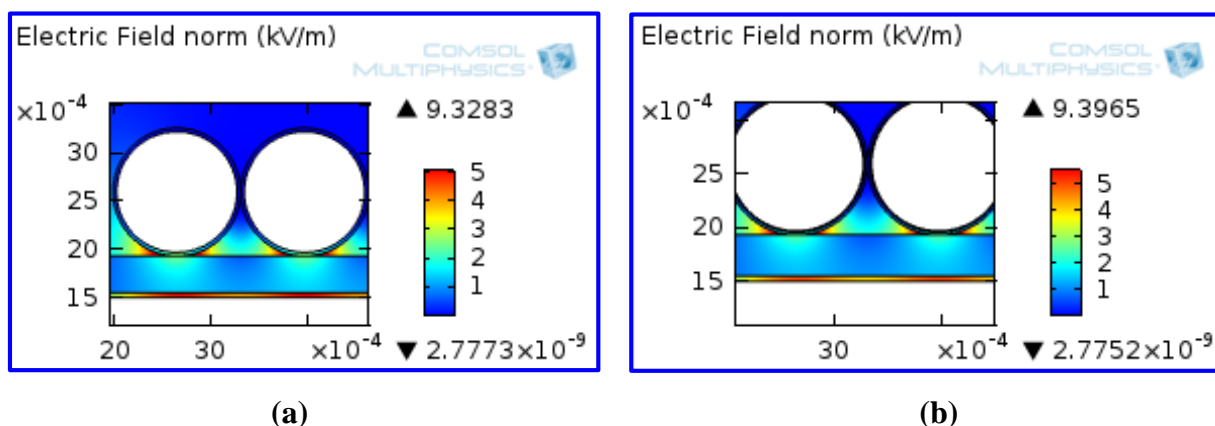


Fig.IV.23 : Champ électrique entre phase et masse, l'isolant est l'air :

(a) Email constitué d'une seule couche (b). Email est constitué de deux couches.

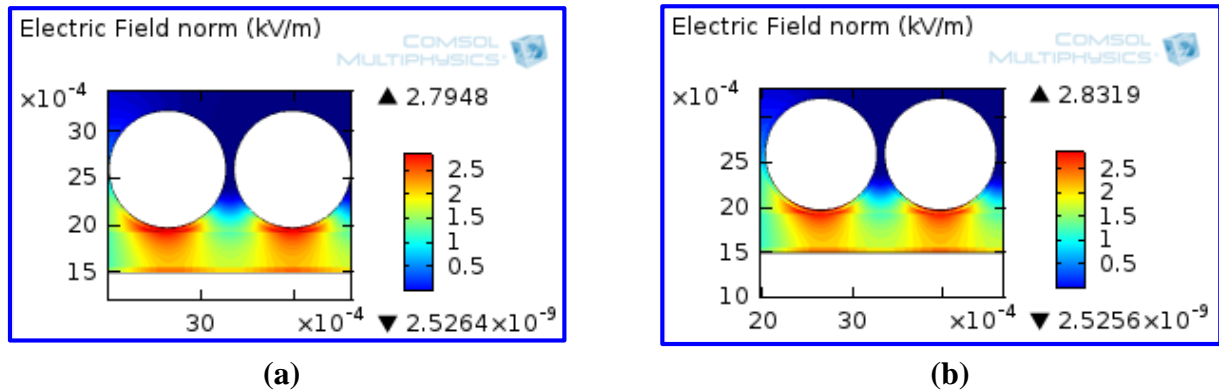


Fig.IV.24 : Champ électrique entre phase et masse, l'isolant est l'huile :
 (a). Email constitué d'une seule couche (b). Email constitué de deux couches.

Pour l'isolation phase/masse, nous ne remarquons pas de différence en terme de valeur du champ électrique maximum entre le cas où l'émail est composé d'un seul matériau de permittivité relative égale à 3.6 et le cas où l'émail est constitué de deux matériaux superposés, PEI coté cuivre et PAI coté extérieur dont les constantes diélectriques sont respectivement égales à 3,35 et 4. Pour cela, nous nous contentons d'étudier juste le modèle où l'émail est constitué d'une seule couche.

Il est évident que le champ électrique maximum est moins intense pour une isolation avec l'huile qu'une isolation juste avec l'air.

IV.7.1 Influence de défauts dans l'isolation

Dans ce qui suit, nous allons simuler deux types de défauts dans l'isolation ; le premier réside dans l'absence du papier isolant entre la phase et la masse, le second repose sur la rupture de 1/8^e du périmètre de l'émail.

IV.7.1.1 Influence de l'absence du papier isolant

Ce défaut consiste à supposer que le papier isolant entre les spires sous tension $V_0 = 1V$ et la masse est complètement absent, donc il n'y a que la distance $d = e_{\text{air}} = 50 \mu\text{m}$ qui sépare la phase de la masse (Fig.IV.25). Ensuite, nous allons analyser l'influence de la distance entre la phase et la masse pour une isolation avec l'air et pour l'isolation avec l'huile (Fig.IV.26).

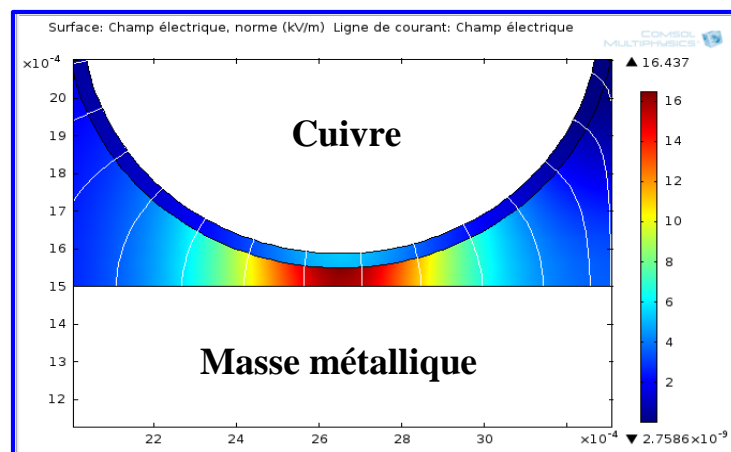


Fig.IV.25 : Influence de l'absence du papier isolant sur le champ électrique

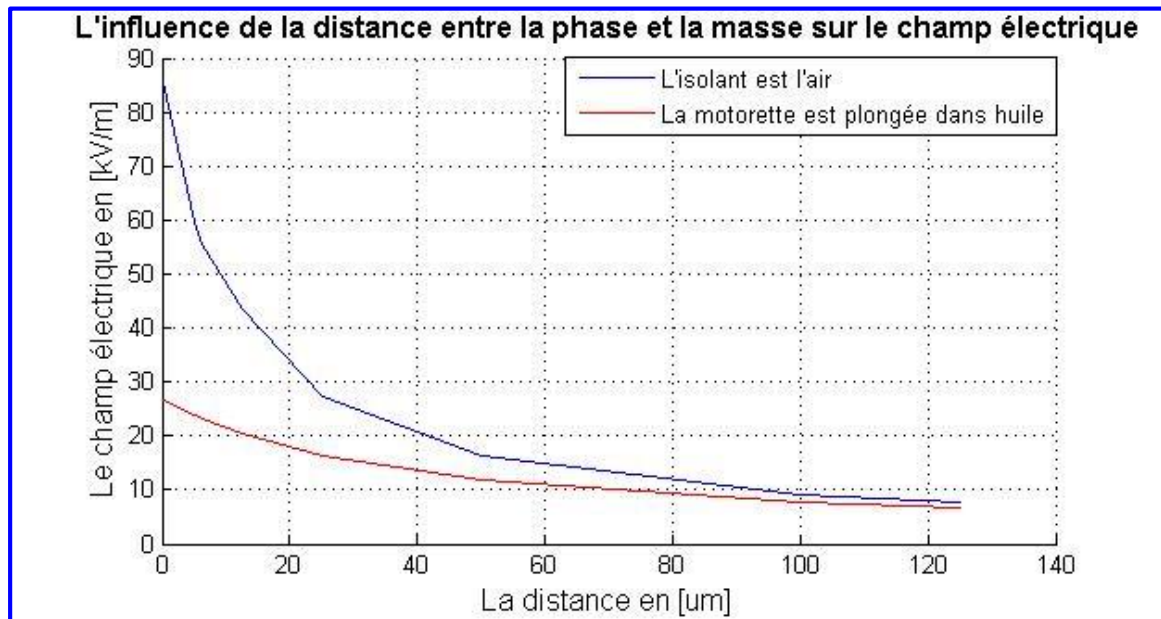
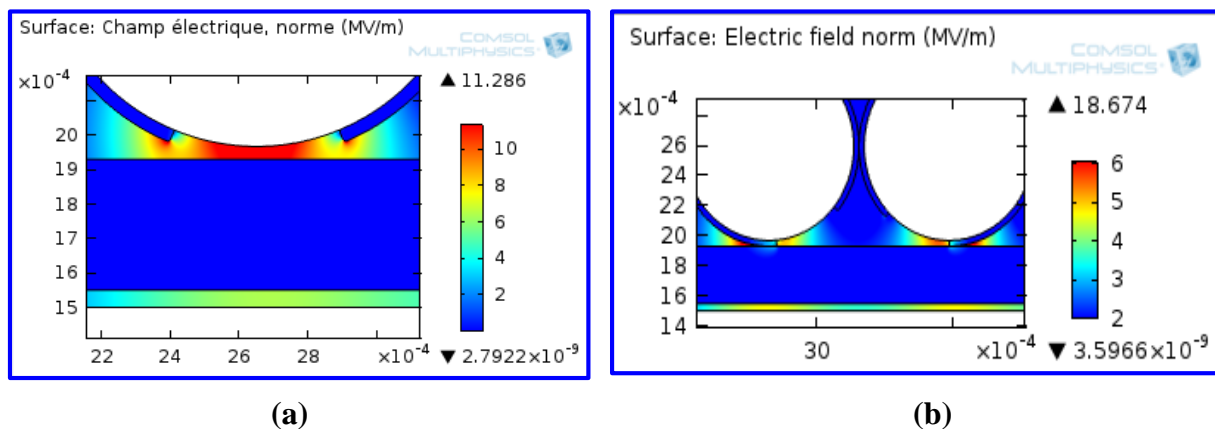


Fig.IV.26 : Influence de la distance entre les spires et la masse sur le champ électrique

L'absence du papier isolant situé entre les spires et la masse métallique provoque une accentuation du champ électrique au niveau de l'interface fil du cuivre émaillé/masse métallique, cette intensification du champ est de plus en plus accentuée avec la réduction de la distance d'espacement d entre le fil émaillé/paroi de la masse métallique. Le champ électrique atteint sa valeur maximale lorsque le fil émaillé est totalement collé à la masse, 86.3 kV/m pour une isolation avec l'air et presque trois fois plus cette valeur pour une isolation avec l'huile. Cependant, à partir de la distance 40 μm , l'intensité du champ en fonction de la distance est à peu près la même pour les deux isolations (que ce soit pour l'air où pour l'huile).

IV.7.1.2 Influence de la rupture de 1/8^e du périmètre de l'émail

Afin d'évaluer les risques que la motorette peut encourir en cas de la rupture d'une partie de l'émail, nous allons enlever 1/8^e du périmètre de l'émail dans deux régions différentes de ce dernier et discerner ensuite les zones où règne un champ électrique intense (Fig.IV.27).



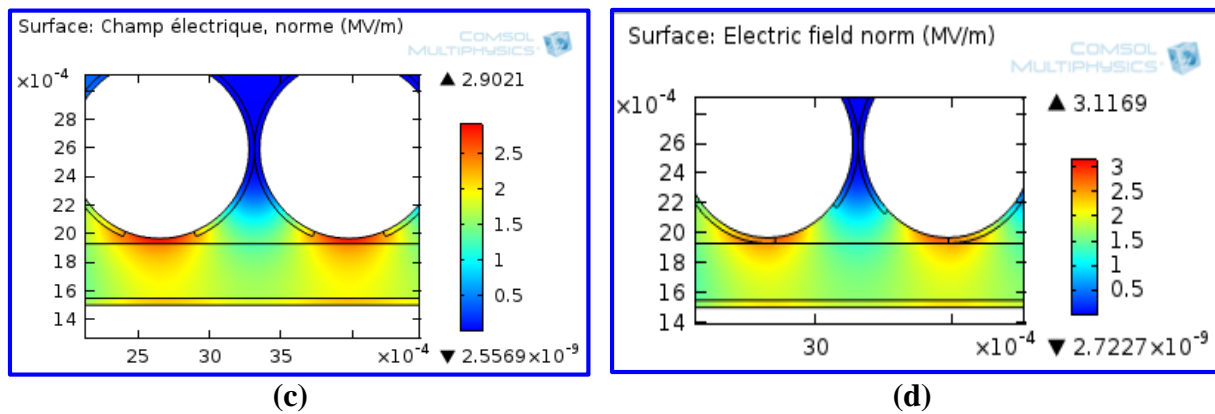


Fig.IV.27 : Influence de la rupture de 1/8^e du périmètre de l'émail sur le champ électrique :

- (a). L'isolant est l'air, région 1 ; (b). L'isolant est l'air, région 2 ;
(c). L'isolant est l'huile, région 1 ; (d). L'isolant est l'huile, région 2.

Le retranchement de 1/8^e du périmètre de l'émail engendre une augmentation considérable du champ électrique, plus particulièrement dans la zone comprise entre le fil démaillé et le papier isolant, pour la région 2 ($E_{\max} = 11.286$ MV/m pour une isolation avec l'air et $E_{\max} = 2.9$ MV/m pour une isolation avec l'huile), et également sur l'interface émail très proche du fil nu/papier isolant, pour la région 1 ($E_{\max} = 18.674$ MV/m et $E_{\max} = 3.12$ MV/m respectivement pour une isolation avec l'air et une isolation avec l'huile).

IV.8 Conclusion

Les simulations des champs électriques maximaux de différentes configurations ; isolation entre spires et isolation entre phase et masse revêt une grande importance pour l'appréciation du champ électrique en présence d'impuretés et de défauts.

Au cours de notre simulation, nous avons donné aux impuretés des géométries simples (sphères, ellipsoïdes, rectangles) ayant des dimensions différentes, et une nature distincte (air, eau, métal) afin d'estimer l'influence des paramètres caractéristiques de l'inclusion sur le champ électrique. De plus, nous avons essayé d'imiter des défauts d'isolation qui soient représentatifs des cas pratiques.

D'après les résultats que nous avons obtenus à l'égard de l'effet d'une seule impureté sur le champ électrique, il s'est avéré que ce dernier prend une intensité élevée lorsqu'il s'agit d'une vacuole ellipsoïdale d'eau présente verticalement dans l'isolant, notamment pour un rayon réduit des deux sommets de l'ellipsoïde. La valeur du champ électrique est aussi considérable sur les pointes des rectangles métalliques. Quant à l'étude de l'influence mutuelle de deux impuretés, elle a montré que le champ électrique devient important quand il est question de deux ellipsoïdes d'air, surtout lorsque l'écart entre elles est faible.

En ce qui concerne les défauts d'isolation, une amplification du champ électrique a été constatée en absence du papier isolant entre la phase et la masse. Cette amplification est au maximum au moment où le fil du cuivre émaillé est collé à la masse métallique. Cependant, le défaut le plus défavorable réside dans la rupture d'une région de l'émail, ainsi le cuivre devient nu et provoque une forte intensification du champ électrique dans l'isolant qui est de l'ordre du MV/m.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

La recherche bibliographique que nous avons entreprise lors de ce sujet sur les diélectriques liquides, nous a aidé à bien comprendre et avoir une meilleure connaissance sur ce type d'isolateurs.

Le but principal des deux premiers chapitres est de connaître les caractéristiques de base des huiles minérales qu'on peut diviser en propriétés physiques, chimiques et électriques, ainsi que les différents mécanismes qui mènent au claquage des isolants liquides et les différents facteurs affectant la rigidité diélectrique des huiles.

Les travaux antérieurs qui abordent ce sujet ne sont pas nombreux, et le point commun entre eux est la complexité des phénomènes intervenant dans le claquage des diélectriques liquides. En effet, une bonne compréhension de ces derniers, fait appel à des notions de base sur la matière et des connaissances de disciplines diverses telles que : la chimie, l'électrochimie, la mécanique des fluides, ...etc.

L'influence de quelques paramètres sur la rigidité diélectrique des liquides isolants tel que le nombre de claquages a été déjà abordée dans des travaux antérieurs, et a permis d'élargir les connaissances sur le domaine ; l'étude de l'influence d'autres paramètres restent des sujets à entreprendre dans le futur ce qui permettra d'améliorer la compréhension du phénomène du claquage dans les huiles et pourquoi pas de retrouver une formule théorique valable quelles que soient les conditions d'exploitation de l'huile.

Pour donner l'aspect pratique à notre travail, nous avons effectué un stage au niveau du laboratoire d'analyse et traitements des huiles de transformateurs de SONELGAZ, que nous avons présenté dans le chapitre III, le diagnostic des huiles isolantes par la méthode des gaz dissous en phase gazeuse à l'aide du chromatographe. Cette étude est primordiale pour assurer la sécurité des personnes et des biens et la continuité du service.

Outre l'étude des propriétés électriques, l'analyse physico-chimique des huiles minérale est une méthode très répandue dans le milieu industriel pour le bon diagnostic des huiles de transformateurs en particulier. L'existence des gaz dans les huiles est inévitable à cause des différents facteurs extérieurs dans le lieu de l'exploitation. L'analyse de ces gaz est effectuée selon des méthodes exigées par des normes telle que la CEI. Dans le laboratoire de GRTE on suit généralement la méthode des rapports des concentrations des gaz dissous et le triangle de DUVAL. Le calcul des rapports pour les deux méthodes ne se fait que si et seulement si la concentration de l'un des gaz dépasse une certaine concentration typique.

La présence des gaz dû à l'oxydation peut être l'origine des décharges partielles qui peuvent être à leur tour l'origine de la création d'autres gaz dû à la rupture des chaînes qui composent l'huile ce qui affecte fortement la qualité des huiles. L'analyse des gaz d'une manière régulière et périodique sert à améliorer la qualité de diagnostic.

Dans n'importe quel sujet de recherche, l'outil numérique reste indispensable pour bien comprendre les différents phénomènes et pour avoir une idée générale sur les résultats à l'aide des simulations surtout lorsqu'il s'agit d'outils de grande fiabilité ; ce que nous avons fait dans le dernier chapitre en utilisant le logiciel Comsol Multiphysics® où nous avons simulé la distribution du champ électrique à l'intérieur d'une machine électrique quelconque, entre spires, avec et sans l'inclusion d'impuretés de différentes natures, formes géométriques et dimensions, et entre phase et masse, en présence ou non de défauts.

Il ressort de notre simulation que le champ électrique est considérablement élevé sur les deux sommets de l'ellipsoïde d'eau entreposée verticalement dans l'isolant, la valeur de ce champ prend de l'ampleur quand le rayon du sommet est réduit. En générale, l'influence des particules conductrices est beaucoup plus importante que celle des particules isolantes, ce qui est effectivement vérifié par la présence des copeaux métalliques qui donnent naissance à un renforcement local du champ électrique. A l'égard de l'effet simultané de deux impuretés sur le champ électrique, l'intensité de ce dernier a été remarquable pour deux ellipsoïdes d'air présentes horizontalement dans l'isolant, cette intensification du champ est de plus en plus importante quand ces deux cavités d'air sont proches. Concernant les résultats obtenus pour la simulation des défauts qui peuvent s'y produire dans l'isolation, nous avons trouvé que la rupture d'une région de l'émail présente le défaut le plus nuisible pour la machine, vu qu'il mène le champ électrique dans l'isolant à des valeurs excessivement grandes qui sont de l'ordre du MV/m.

Par ce présent travail, nous avons contribué à l'étude de l'influence des impuretés et de défauts sur le champ électrique dans les isolants des machines électriques. Mais il reste à noter que nous n'avons pas mis en évidence tous les paramètres qui interviennent dans le processus de cette étude, et nous avons juste traité des cas qui sont éventuellement représentatifs de certains cas pratiques que nous considérons comme les plus importants. Pour cela, ce travail demande à être amélioré et approfondi davantage dans des travaux futurs.

En perspective et pour une meilleure maîtrise de ce sujet, nous souhaitons que d'autres cas de défauts soient pris en considération, et nous suggérons également de traiter d'autres natures, formes géométriques et dimensions des impuretés qui occupent des positions bien définies dans les isolants des machines électriques.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] N.Rouha, « Caractérisation Electrique et Physico-chimique des Arborescences Electriques dans l'EPDM », Thèse de Doctorat en Sciences, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Octobre 2014.
- [2] J.S. N'Cho « Développement de Nouvelles Méthodes de Diagnostic et de Régénération des Huiles pour Transformateurs de Puissance », Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Ecole Doctorale Électronique, Électrotechnique, Automatique de Lyon.
- [3] N.Aouchar, C.Bekhaled, « Application des systèmes hybrides neuro-flous au diagnostic des huiles de transformateurs », Projet de Fin d'Etude, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d' Alger, Juin 2005.
- [4] V.H. DANG « Étude des Phénomènes de Préclaquage et de Claquage des Huiles Végétales, Minérales et Synthétiques – Caractérisation des Décharges aux Interfaces », Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Ecole Doctorale Électronique, Électrotechnique, Automatique de Lyon.
- [5] R. Fournié, « Les Isolants en Electrotechnique, Essais, Mécanisme de Dégradation, Application Industrielle », Collection de la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France, Eyrolles, Paris, 1990.
- [6] S.Bouazabia, « Liquides diélectriques », cours de graduation, Ecole Nationale Polytechnique et Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene, Alger, 2001.
- [7] S.Abdi, S.Zelmat, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile de transformateur », Projet de Fin d'Etude, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Juin 1998.
- [8] N.Berger, « Liquides isolants en électrotechnique : Présentation générale », Technique de l'ingénieur, D2470, 2002.
- [9] R. Bartnikas, « Engineering dielectrics », Vol.3, 1994.
- [10] D. Cherry, « Insulating Fluids: An Overview of Dielectric Fluids Used in Transformers », Principal Consulting Scientist for Dielectric Fluids, October 29, 2009.
- [11] A.Bouhageb, « Produit de graissage et de protection », Edition Année 2000.
- [12] C. Perrier and A. Beroual, “Experimental Investigations on Insulating Liquids for Power Transformers: Mineral, Ester, and Silicone Oils”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 25, No. 6, pp. 6 – 13, November/December 2009.
- [13] N.Berger, « Liquides isolants en électrotechnique : Caractéristiques des Produits », Technique de l'ingénieur, D2471, 2002.
- [14] Fournie, R., Les isolants en électrotechnique. Concepts et théories. Vol. 63. 1986.

- [15] S.Boudraa, « Analyse de gaz dissous dans les huiles des transformateurs en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle », Thèse de Magister, Département d'Electrotechnique, Université de Batna, 2005.
- [16] L.Mokhnache, « Application des réseaux de neurones dans le diagnostic et la prédiction des isolations de hautes tension », Thèse de Doctorat d'Etat, Département d'Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Janvier 2004.
- [17] D.Ouakli, H.Brouri, « Propriétés diélectriques de l'huile de transformateur à la présence de gaz dissous », Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Département de Génie Electrique, 1997.
- [18] Norme Internationale CEI 60296, « Fluides pour applications électrotechniques –Huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillages de connexion », Troisième édition, 2003.
- [19] NF T 60-131, « Produits pétroliers : Soufre corrosif dans les huiles minérales isolantes », Mai 1970.
- [20] S.Abdi, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile de transformateur », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2002.
- [21] O.Bedja, A.Rahim, « Utilisation des réseaux de neurones artificiels dans le vieillissement de l'huile de transformateur », Projet de Fin d'Etude, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Juin 2002.
- [22] K.Djazia, Z,Sounia « Etude des Phénomènes de Décharge Electrique dans la Borak 22 sous Tension Alternative », Projet de Fin d'Etude, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Juin 2006.
- [23] C. Laurent, “Diélectriques solides et charge d'espace”, Techniques de l'ingénieur, D 2305.
- [24] Heathcote, M.J., The J& P Transformer Book. A Practical Technology of the Power transformer, éd. 12. 1998: Newnes.
- [25] Norme CEI 641-1, « Spécifications pour le carton comprimé et le papier comprimé à usage électrique », Définitions et prescriptions générales, Juin 1995.
- [26] Norme CEI 641-2, « Spécifications pour le carton comprimé et le papier comprimé à usage électrique », Méthodes d'essais, Juin 1996.
- [27] Y.Hadjadj, « Contribution au développement de nouveaux outils permettant de prolonger la durée de vie des transformateurs de puissance », Mémoire de la maîtrise en ingénierie, Université du Québec, Juin 2010.
- [28] B.Djamal, « Etude des caractéristiques des matériaux isolants pour transformateur », Thèse de Magister, Département d'Electrotechnique, Université UMMTO, Juin 2012.

- [29] Norme Internationale CEI 60554, « Spécification pour papiers cellulés à usages électriques », Première édition, 1977.
- [30] J. Vergne, « Etude du vieillissement physico-chimique du complexe papier-huile dans les transformateurs électriques » Thèse INPT, 1992.
- [31] Working Group 09 of CIGRE Study Committee 12. Lifetime Evaluation of Transformers. Electra 150:38-52, October 1993.
- [32] G. Breen, on the behalf of Study Committee 12, « Essential requirements to maintain transformers in service », paper 12-103, CIGRE session, Aug. 30–Sept 5, 1992.
- [33] E.Kuffel, W.S.Zaengl and J.Kuffel «High Voltage Engineering Fundamentals»
- [34] C.L WADHWA « High Voltage Engineering » (second edition).
- [35] Cour 4ème année Electrotechnique Mr, A. BOUBAKEUR « Diélectrique liquide ».
- [36] M. S Naidu & V.Kamaraju « High Voltage Engineering » (second edition).
- [37] Article de technique de l'ingénieur « préclaiage et claiage des liquides diélectriques » par Robert TOBAZEON.
- [38] KADRI.F& RAHAL.H « Influence des barrières isolantes sur la tension de décharge disruptive des intervalles d'huile sous tension alternative » projet de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, juin 2008.
- [39] BENAMAR.R « influence du nombre de claiages sur les propriétés de l'huile de transformateur », thèse de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, juin 2008.
- [40] Dieter Kind & Hermann Kamer High-Voltage Insulation Thchnology.
- [41] Norme internationale CEI 60247 « Liquides isolants – Mesure de la permittivité relative, du facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$) et de la résistivité en courant continu ».
- [42] Norme internationale ASTM D1500 « Méthode d'essai standard des produits pétroliers ».
- [43] Norme internationale CEI 60422 « Huiles minérales isolantes dans les matériels électriques –Lignes directrices pour la maintenance et la surveillance ».
- [44] Norme internationale CEI 60599 « Matériels électriques imprégnés d'huile minérale en service – Guide pour l'interprétation de l'analyse des gaz dissous et des gaz libres ».
- [45] Norme internationale CEI 60567 « Matériels électriques immergés – Echantillonnage de gaz et d'huile pour analyse des gaz libres et dissous – Lignes directrices ».
- [46] Norme internationale CEI 60296 « Fluides pour applications électrotechniques – Huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillages de connexion », Deuxième Edition, 2003.

- [47] OUKLI.D & BROURI.H « Propriétés Diélectriques De L’Huile De Transformateur En Présence De Gaz Dissous », Projet de fin d’étude, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 1997.
- [48] B.Fallou, R.Fournié & Co, "Analyse des gaz dissous dans l'huile en tant que moyen de surveillance des transformateurs et de détection des défauts naissants», CIGRE 1970, Vol.1,Gr 12-02.
- [49] S.Caixin, "The principle of transformer chromatograph detecting on-line and the analysis of output wave", 9th ISH, Aug. 28 - Sept. I, 1995, Graz, Austria, pp: 1008.1-1008.4.
- [50] « contrôle des huiles isolantes », EDF, OCT 1973.
- [51] CHALABI.B & OUABDESSELAM.S « Analyse des Gaz Dissous Dans Huiles Isolantes », Projet de fin d’étude, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, juillet 1997
- [52] MOTOR RELIABILITY WORKING GROUP, « Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, Part I», IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-21, no. 4, pp. 853–864, Jul. 1985
- [53] O. V. Thorsen and M. Dalva, « A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries », IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 31, no. 5, pp. 1186–1196, Sep./Oct. 1995.
- [54] F. Aymonino, T. Lebey, D. Malec, C. Petit, J. Saint Michel, A. Anton, “Dielectrics measurements of rotating machines insulation at high temperature (200-400°C)”, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006
- [55] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, and H. Dhirani, Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004
- [56] A. Siddique, G. S. Yadava, and B. Singh, « A review of stator fault monitoring techniques of induction motors », IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, no. 1, pp. 106–114, Mar. 2005.
- [57] F. Loubeau, A. Durieux, J. Poitrinet, F. Fresnet, F. Strat, « Simulation des Champs Electriques dans les Configurations Types d'un Moteur Synchrone de Traction, Validation par l'Experimentation des Seuils d'apparition de Decharges Partielles », Symposium de Genie Electrique, Juin 2016, Grenoble, France.
- [58] S. ABELLA, « Vieillissement électrique du polyster-imide sous tension continue », Thèse de Magister, Département d’Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique.
- [59] IEEE Standard Test Procedure for Evaluation of Systems of Insulating Materials for Random-Wound AC Electric Machinery.
- [60] A. Knecht, Development of Surface Charges on Epoxy Resin Spacers Stressed with Direct Applied Voltages, Gaseous Dielectrics III, Pergamon Press, New York, pp. 356-364, 1982.
- [61] A. NOUAR, « Etude numérique de l’influence des cavités gazeuses et d’eau sur la distribution du champ électrique, de la pression électromécanique et des pertes

diélectriques dans l'isolation des câbles de haute tension », Thèse de Magister, Département d'Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Décembre 1999.

[62] P. G. Harper, J. J. O'Dwyer, « Electric field strength between crossed and parallel circular cylinders », Monograph n°235, Mai 1957.