الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de la Technologie *Dr YAHIA FARES MEDEA*

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique et de l'Informatique

Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master

génie électrique / option :

Réseaux Electriques

Thème

Caractéristiques dynamiques du claquage de l'huile de transformateur sous tension alternative et impulsionnelle

Présenté par :

Mr: Achour Boualem

Mr: Boukhari Allal

Encadreur :

Dr: Abdi Sifeddine

~ 2013/2014 ~

Remercement

Nous remercions DIEU de nous avoir preté vie, santé et volonté pour achever ce travail.

Nous remercions vivement, ***Dr. Abdi Sifeddine*** *notre encadreur et Mr.* ***Houassine hamza*** *qui nous avons aidé dans ce modeste travail.*

Nous remercions profondément touts professeur qui nous avons enseigné durant tout le cycle de nos etudes.

Nos sincères remerciements saccompagnés de vive reconnaissance vante aux nos amis de l'université

Dr. YAHIA FARES de Médea ,pour leurs encouragement et leur soutien moral.

Nous remercions pareillement tous les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre travail.

Nous adressons les plus chaleureux remerciements et tout gratitude à tous nos amis chacun de son nom.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ceux que j'aime le plus dans ce monde ;

A ma chère mère ;

A mon principe cher père ;

A mon cher frère, et mes sœurs ;

A toute ma grande famille;

A mon binôme Achour Boualem et sa famille;

A toute la promotion sortante jun 2014 en particulier

les amis de 2 ème année Master réseaux électrique ;

A tous mes amis;

A ceux que j'aime le plus dans ce monde.

Boukhari Allal.

Dedicaces

Je dédie ce modeste travail:

A ceux qui m'ont encouragé de long de mes études :

Mes très chers parents

A mes grandes mères

A mon frère et mes sœurs

A tous mes oncles ainsi que leurs enfants

A mon binôme Boukhari Allal et sa famille

A tous mes amis, A tous mes collègues du groupe

A mes amis de mon village

A tous les personnes qui m'ont aidé de proche

Ou de loin pour réaliser ce travail.

Achour Boualem.

Résumé

ملخص :

تدخل هذه الأطروحة ضمن أعمال البحث و الدراسة المتعلقة بالخصائص الديناميكية للانهيار الكهربائي للزيوت العازلة المستعملة في المحولات عالية التوتر، من أجل هذا قمنا بإجراء تحاليل للتجارب المقامة على الانهيار الكهربائي للزيت تحت تأثير التوتر المتناوب و التوتر النبضي.

بينت النتائج أن الخصائص الدينامكية أثناء الانهيار متشابهة بالنسبة لكل المسافات بين الأقطاب ومختلف سرعات زيادة التوتر، إلا أن تأثير المسافة بين الأقطاب يكون اكبر هذا بالنسبة للتوتر المتناوب .

اما بالنسبة للتوتر النبضي فالخصائص الديناميكية أثناء الانهيار تتأثر بتغير المسافة بين الأقطاب وكذلك بتغير المقاومة.

كلمات مفاتيح: زيت المحول، الانهيار، المسافة بين الأقطاب، سرعة زيادة التوتر، الخصائص الديناميكية.

Résumé :

Notre travail rentre dans le cadre des travaux de recherche que concernent les caractéristiques dynamique de l'huile isolante utilisé dans les transformateurs de puissance lors d'un claquage. Pour cela l'analyse des essais sur le claquage de l'huile pour une tension alternative et impulsionnelle a été faite.

Les résultats d'analyse ont montré que pour l'alternative, les caractéristiques dynamiques sont similaire pour les différents distance inter-électrode, et les différents vitesses d'augmentation et sont très influencées par la distance inter-électrodes.

Pour l'impulsionnelle, les caractéristique dynamique sont influencées par la distance inter-électrodes et la résistance insérée en série avec le celle de test.

Mots clés : Huile de transformateur, Claquage, Distance inter-électrodes, Vitesses d'augmentation de la tension, Caractéristiques dynamiques.

Abstract:

This work aims to analyse the dynamic characteristics of insulating of oil used in power transformes for AC and impulse voltage.

The results for ac voltage show that the dynamic characteristics for different inter-électrodes gaps and differents voltage ramp speed are similar, and are very influenced by the inter-électrodes gap. For impulse voltage, the dynamic characteristics of the oil are influenced by the inter-électrodes gap and the value of the resistance inserted in series with the test cell.

Key words: Transformer oil, Breakdown, gap lengths, Voltage speed ramps, Dynamic characteristics.

Liste des figures

Figure I.1 : Structure des hydrocarbures de base dans une huile minérale ……..08
Figure I.2: Structure de l'ester du pentaérythritol ou tétra-ester ……..09
Figure I.3 : Structure des huiles silicones ou PDMS ……...10
Figure I.4 : Structure générale desPCB_s ……...11
Figure I.5 : Structure chimique d'une huile végétale ou triester (triglycérides) ……..12
Figure I.6 : Variation de la permittivité relative en fonction de la température ……16
Figure I.7 : Variation de la résistivité en fonction de la température ……18
Figure I.8 : Représentation schématique de l'angle de pertes ……19

Figure II.1 : Représentation schématique du claquage par avalanche ……32
Figure II.2 : Influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'huile de transformateur .37
Figure II.3 : Variation de la tension de claquage avec la pression ……..38
Figure II.4 : Configurations d'électrodes utilisées pour l'étude du claquage en champs uniforme et quasi-uniforme ……..38
Figure II.5 : Configurations d'électrodes utilisées pour l'étude du claquage en champs divergent ou très divergent ……...39
Figure II.6 : Variation de la tension de claquage de l'huile transformateur en fonction de l'intervalle inter électrode pour un système pointe – pointe et un système Sphère – sphère ...40
Figure II.7 : Evolution de la tension de claquage (kV) avec les variations de la teneur en eau et en fonction de la température pour une même huile minérale ……41
Figure II.8 : La caractéristique $U_c(t)$, tension de claquage en fonction du temps, de l'huile de transformateur ……..42
Figure II.9: Influence du recouvrement des électrodes sur la tension de claquage de l'huile dans une géométrie : (a) sphère – sphère et (b) tige – sphère ……43

Figure III.1. Cellule de test remplie d'huile neuve ……..44
Figure III.2 : Schéma simplifié du circuit d'essai de claquage AC ……46
Figure III.3 : Onde de choc conventionnelle ……47
Figure III.4 : Schéma simplifié du circuit d'essai de claquage impulsionnelle……....48

Liste des figures

Figure IV.1 : Variation de la tension de claquage en fonction de la vitesse d'augmentation de la tension ……..49
Figure IV.2 : Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la vitesse d'augmentation de la tension ……..50
Figure IV.3 : Variation de la tension et du courant à l'instant du claquage en fonction du temps pour la distance inter-électrodes de 1mm ……..52
Figure IV .4 : Variation de la tension et du courant à l'instant du claquage en fonction du temps pour la distance inter-électrodes de 2,5mm……54
Figure IV .5 : Variation de la tension et du courant à l'instant du claquage en fonction du temps pour la distance inter-électrodes de 5mm ……56
Figure IV.6 : Variation de la tension et du courant aux premiers instants du claquage en fonction du temps pour la distance inter-électrodes de 1mm ……..58
Figure IV.7 : Variation de la tension et du courant aux premiers instants du claquage en fonction du temps pour la distance inter-électrodes de 2,5mm ……..60
Figure IV.8 : Variation de la tension et du courant aux premiers instants du claquage en fonction du temps pour la distance inter-électrodes de 5mm ……62
Figure IV.9 : Variation de l'impédance de l'huile à l'instant du claquage en fonction du temps pour la distance inter-électrodes de 1mm ……65
Figure IV.10 : Variation de l'impédance de l'huile à l'instant du claquage en fonction du temps pour la distance inter-électrodes de 2,5mm …….....67
Figure IV.11 : Variation de l'impédance de l'huile à l'instant du claquage en fonction du temps pour la distance inter-électrodes de 5mm ……..69
Figure IV.12 : Variation de la tension et du courant à l'instant du claquage en fonction du temps avec une résistance de 50Ω ……...71
Figure IV.13 : Variation de la tension et du courant aux premiers instants du claquage en fonction du temps avec une résistance de 50Ω ……73
Figure IV.14 : Variation de la tension et du courant à l'instant du claquage en fonction du temps pour la distance de 1mm sans résistance ……...75
Figure IV.15 : Variation de la tension et du courant à l'instant du claquage en fonction du temps pour la distance de 1mm avec une résistance de 4800 Ω ……..75
Figure IV.16 : Variation de la tension et du courant à l'instant du claquage en fonction du temps pour la distance de 1mm avec une résistance de 9600 Ω ……75

Liste des figures

Figure IV.17 : Variation de la tension et du courant aux premiers instants du claquage en fonction du temps pour la distance de 1mm sans résistance ……...77
Figure IV.18 : Variation de la tension et du courant aux premiers instants du claquage en fonction du temps pour la distance de 1mm avec une résistance de 4800 Ω ……77
Figure IV.19 : Variation de la tension et du courant aux premiers instants du claquage en fonction du temps pour la distance de 1mm une résistance de 9600 Ω ……..77
Figure IV.20 : Variation de l'impédance de l'huile à l'instant du claquage en fonction du temps pour la résistance 50 Ω ……..79
Figure IV.21 : Variation de l'impédance d'huile après claquage pour la distance de 1mm et sans résistance ……..81
Figure IV.22 : Variation de l'impédance d'huile après claquage pour la distance de 1mm avec une résistance de 4800 Ω …….81
Figure IV.23 : Variation de l'impédance d'huile après claquage pour la distance de 1mm avec résistance de 9600 Ω ……81

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Différentes catégories d'isolants liquides ……...06
Tableau I.2 : Utilisation des liquides isolants dans l'équipement électrique ……...13
Tableau I.3 : Distribution en taille et en nombre des particules dans une huile minérale……16

Tableau II.1 : Influence de la géométrie des électrodes sur la tension de claquage en champ uniforme sur une huile minérale ……..39

Tableau IV.1 : valeurs de β symétrique ou non-symétrique au Système sphérique-sphérique ……...50
Tableau IV.2 : Tensions et courants des claquages pour la tension alternative ……...82
Tableau IV.3 : Tensions et courants des claquages pour la tension impulsionnelle…….....82

Sommaire

Introduction générale ……...01

Chapitre I. les huiles isolantes pour transformateur

I.1.Introduction ……03

I.2.Rôle des liquides isolants en électrotechnique ……...03
I.3. Catégories des huiles et des liquides isolants ……...05
I.3.1 Huiles minérales ……...07
I.3.2. Les huiles esters ou ester du pentaérythritol ……..08
I.3.3.Huiles silicones ou PDMS ……...09
I.3.4.Hydrocarbures halogénés ou PCB ……..10
I.3.5.Les huiles végétales ou esters naturels ……11
I.4.Utilisation des huiles isolants ……12
I.5.Caractéristiques d'une huile minérale isolante ……...14
I.5.1. Propriétés électriques ……..14
I.5.1.1. Le traitement …….....15
I.5.1.2.Permittivité ……16
I .5.1.3. Conductivité ……17
I .5.1.4.Résistivité ……17
I .5.1.5 .Facteur de pertes diélectrique tan δ ……18
I.5.1.6.Rigidité diélectrique ……..20
I.5.1.7.Tension de claquage ……20
I.5.2.Les propriétés physiques ……20
I.5.2.1. La viscosité ……..20
I.5.2.2. Point de congélation ……21
I.5.2.3. Le point d'écoulement ……..21
I.5.2.4. Le point de feu ……21
I.5.2.5. Le point d'éclair ……...22
I.5.2.6. Capacité thermique ……...22
I.5.2.7. Conductivité thermique ……...22
I.5.2.8. Masse volumique ……22
I.5.2.9. Aspect et Couleur ……23

Sommaire

I.5.3. Les propriétés chimiques ……23
I.5.3.1.L'acidité totale ……..23
I.5.3.2. Oxydation des huiles minérales isolantes ……23
I.5.3.3. La teneur en soufre ……...24
I.5.3.4.Teneur en eau ……24
I.6.Vieillissement des huiles ……24

I.7.Conclusion ……..25

Chapitre II. Claquage des diélectriques liquides

II.1. Introduction ……27

II.2. Claquage des matériaux ……28
II.2.1. Traits communs au claquage ……28
II.2.2. Cas des liquides ……....28
II.3. Mécanismes de claquage ……..31
II.3.1. Mécanisme électronique ……31
II.3.1.1. D'après Von Hippel ……32
II.3.1.2. D'après Lewis ……..33
II.3.1.3. D'après Adamczewski ……33
II.3.2. Mécanisme de claquage avec phase gazeuse ……34
II.3.2.1. Mécanisme Thermique ……34
II.3.2.2. Mécanisme de cavitation ……35
a. D'après Krasucki ……35
b. Ecoulements Electrohydodynamiques EHD ……35
II.3.3. Mécanisme de claquage par pont ……35
II.4. Influence de différents paramètres sur le claquage ……..37
II.4.1. Humidité ……37
II.4.2. Pression hydrostatique ……..37
II.4.3. Distance entre les électrodes et géométrie des électrodes ……..38
II.4.4. Température ……40
II.4.5. Durée d'application de la tension ……...41

Sommaire

II.4.6. Nombre de claquages ……42
II.4.7. Influence des écrans ……42

II.5.Conclusion ……43

Chapitre III. Techniques expérimentales

III.1. Introduction ……44

III.2. Cellule de test ……..44
III.3. Test expérimental ……45
III.3.1. Test sous tension alternative ……45
III.3.2. Test sous tension impulsionelle ……46
III.3.2.1. L'onde de choc ……..46
III.3.2.2. Installation expérimentale ……47

Chapitre IV. Résultats et discussions

IV.1. Introduction ……49

PARTIE I. TENSION ALTERNATIVE :

IV.2. Variation de la tension de claquage en fonction de la vitesse d'augmentation de la tension à différentes distances inter-électrodes ……49
IV.3. La rigidité diélectrique Système sphérique- sphérique ……...50
IV.4. Variation de la tension et du courant de claquage en fonction du temps ……51
IV.4.1. Distance inter-électrodes de 1mm ……51
IV.4.2. Distance inter-électrodes de 2,5mm ……..53
IV.4.3. Distance inter-électrodes de 5mm ……55
IV.5. Discussion des résultats ……..57
IV.6. Variation de la tension et du courant de claquage en fonction du temps lors de la première phase de claquage ……57

Sommaire

IV.6.1. Distance inter-électrodes de 1mm ……57
IV.6.2. Distance inter-électrodes de 2,5mm ……59
IV.6.3. Distance inter-électrodes de 5mm ……61
IV.7. Discussion des résultats ……..63
IV.8. Variation de l'impédance de l'huile à l'instant du claquage ……..64
IV.8.1 Distance inter-électrodes de 1mm ……64
IV.8.2 Distance inter-électrodes de 2,5mm ……..66
IV.8.3 Distance inter-électrodes de 5mm ……68

PARTIE II. TENSION IMPULSIONNELLE :

IV.9. Variation de la tension et du courant à l'instant du claquage pour différentes distances inter-électrodes (1mm, 2.5mm et 5mm) ……...70
IV.10. Variation de la tension et du courant aux premiers instants du claquage en fonction du temps pour résistance 50Ω ……...72
IV.11. Variation de la tension et du courant à l'instant du claquage pour différentes résistances non inductives ……74
IV.12.Variation de la tension et du courant aux premiers instants du claquage pour différentes résistances non inductives ……76
IV.13. La variation de l'impédance pour différentes distance inter-électrodes ……..78
III.14. La variation de l'impédance sans résistance et avec résistance en série ……..80
III.15. Comparaison entre l'alternative et l'impulsionnelle ……82

IV.16. Conclusion ……83

Conclusion générale ……84

Introduction générale

Les huiles isolantes sont utilisées depuis longtemps dans l'industrie électrique : transformateurs (de puissance, de distribution, de traction, de four, de mesure…), réactances, condensateurs, câbles, traversées, disjoncteurs, changeurs de prise... Elles sont utilisées comme imprégnant d'isolations cellulosiques et/ou comme produit de remplissage des matériels.

L'huile minérale constitue le liquide le plus communément employé dans les transformateurs de puissance ; d'une part pour ses propriétés physico-chimiques, et d'autre part pour son faible coût [1].

Dans les transformateurs, les huiles jouent deux rôles essentiels : celui d'assurer l'isolation électrique et celui d'évacuer la chaleur des enroulements et du noyau magnétique, par convection naturelle ou par écoulement forcé grâce à des pompes. Ces liquides permettent d'assurer aussi bien l'isolation électrique que le transport de chaleur. En effet, en plus de leurs propriétés diélectriques, ils ont de bonnes propriétés de dissipation de chaleur comparés aux isolants solides et gazeux.

Tout au long de leur utilisation, les huiles isolantes peuvent être soumises à plusieurs contraintes : électrique, thermique, chimique etc., et au cours du temps leurs propriétés peuvent progressivement se dégrader. Ce phénomène de dégradation est connu sous le nom de vieillissement. Il est causé essentiellement par la présence d'oxygène et d'humidité. L'augmentation de la température et l'effet du champ électrique et des inhomogénéités locales (gaz, humidité, particules), pouvant être le siège de micro-décharges qui décomposent l'huile en générant des gaz [1].

La dégradation de l'huile que provoque le claquage diélectrique qui est un phénomène dangereux pour le transformateur lui-même et pour le réseau électrique en général.

Le claquage est un phénomène qui se produit dans l'isolant quand le champ électrique est plus grand que le champ supporté par l'isolant, et a comme effet la formation d'un arc électrique. Selon les mécanismes responsables des claquages, on trouve le mécanisme électronique, le mécanisme avec phase gazeuse et le mécanisme par pont [2].

Il existe plusieurs facteurs qui ont une influence sur la le claquage. Parmi ces facteurs, les plus importants sont les impuretés et les gaz dissous dans le liquide, la

Introduction générale

pression hydrostatique, la configuration des électrodes, la température, la durée d'application de la tension et l'état antérieur du liquide.

L'analyse du claquage est une analyse très important pour la modélisation de ce phénomènes, et par conséquent de protéger le transformateur et le réseau en général par des appareils de protection appropriés.

Dans ce travail, une étude a été faite pour analyser les variations des caractéristiques dynamiques de l'huile (courant, tension, impédance) à l'instant du claquage pour des tensions alternatives et impulsionnelles.

Notre thèse est divisée en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique sur l'utilisation des huiles minérales dans l'isolation des transformateurs de haute tension. Nous donnons les différents liquides utilisés dans l'isolation des transformateurs, ainsi nous présentons les différentes propriétés de l'huile et les mesures permettant la surveillance des transformateurs en service.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons le phénomène de claquage, et ses mécanismes, ainsi que les paramètres qui influent directement sur le claquage

Dans le troisième chapitre, nous expliquons les techniques expérimentales qui ont été faites pour analyser le phénomène du claquage.

Dans le dernier chapitre nous présentons les résultats des variations des courants, des tensions, et des impédances donnant les caractéristiques dynamiques de l'huile au moment du claquage pour deux types de tension (alternative et impulsionnelle).

CHAPITRE I

LES HUILES ISOLANTES POUR TRANSFORMATEUR

I.1. Introduction

Les isolants électriques étaient, à l'origine, des produits naturels non imprégnés qui, en contact direct avec l'air, s'oxydaient rapidement. Après, elles ont été utilisées comme imprégnant d'isolations cellulosiques ou comme produit de remplissage de matériels électriques très divers [1].

Il n'était guère possible, ni évident, d'utiliser des liquides, bien qu'en 1854, on tout plongé des enroulements dans l'essence de térébenthine augmentant leur tenue diélectrique, leur durée de fonctionnement et montrant que l'on peut soustraire l'isolation solide à l'oxydation directe [2]. Ils ont été alors peu à peu remplacés par le transformateur remplis d'huile minérale.

L'huile minérale servant d'isolant électrique et de fluide caloporteur assurant le transfert de chaleur.

Les isolants électriques se définissent comme des substances ayant une conductivité électrique suffisamment faible pour être utilisées à séparer des pièces conductrices portées à des potentiels différents [3].

L'huile isolant est l'un des éléments les plus importants dans un transformateur qui nécessite une surveillance et un entretient, car sa fonction est d'assurer l'isolation et le refroidissement de celui-ci.

L'huile est un fluide qui pénètre dans toutes les parties internes du transformateur, sa circulation permet l'évacuation de la chaleur produite par les enroulements par convection à travers la cuve du transformateur [4].

L'huile ne contient pas d'additif pour prévenir l'oxydation, et ce en raison de sa stabilité exceptionnelle; ni acide, ni alcaline, cette huile ne s'attaque pas au vernis qui enduit les bobines de transformateur.

Sa pureté exceptionnelle lui permet de résister naturellement à la formation de boue et à l'oxydation.

I.2.Rôle des liquides isolants en électrotechnique

Les liquides isolants sont utilisés comme imprégnant d'isolations solides ou comme produits de remplissage de matériels électriques très divers : transformateurs (de puissance, de distribution, de traction, de four, de mesure...), réactances, condensateurs, câbles, traversées, disjoncteurs, changeurs de prise, etc...

Leur rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer la tenue diélectrique de l'isolation (la rigidité diélectrique des liquides est très nettement supérieure à celle des gaz) [3].

Cependant, dans beaucoup d'applications, ils servent à la fois à améliorer les propriétés diélectriques et à évacuer la chaleur d'un assemblage, comme dans le cas du transformateur [1].

Les liquides sont également utilisés pour leur pouvoir extincteur d'arcs électriques (dans les chambres de coupure des commutateurs en charge et de certains disjoncteurs), en raison de leur pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement (sélecteurs de prises, pompes immergées), et dans certains cas, pour améliorer la résistance au feu (transformateurs de distribution).

Cependant, l'utilisation des liquides peut présenter des dangers, liés à leur toxicité ou à celle de leurs produits de dégradation, vis-à-vis des personnes (particulièrement en cas de feu) et vis-à-vis de l'environnement (en cas de fuite). On observe une tendance très marquée à ne plus utiliser de liquides chaque fois que cela est possible, par exemple en basse tension (cas des condensateurs qui sont maintenant « secs »), lorsque la géométrie est très simple et qu'il est relativement facile de faire un solide presque parfait, sans cavités [c'est le cas des câbles où le polyéthylène extrudé remplace progressivement le papier imprégné jusqu'à des tensions très élevées (660 kVdc)] ou en augmentant l'épaisseur de l'isolant solide (transformateurs de distribution « secs ») [2].

Les volumes de liquides employés dans les appareils électriques varient de la fraction de litre (condensateurs) à plusieurs centaines de mètres cubes (transformateurs de puissance). Actuellement, les huiles minérales couvrent 90 à 95 % du marché des liquides isolants (marché mondial 1 000 000 t/an). Cette prépondérance s'explique par le faible coût de ces produits, obtenus directement à partir des bruts pétroliers [2].

Les liquides de synthèse les plus utilisés sont les alkylbenzènes (plusieurs dizaines de milliers de tonnes par an), leur coût étant environ le double de celui des huiles minérales. L'emploi des 'huiles végétales est apparu récemment en raison de leur image

« verte ». Cependant, pour certaines applications, notamment l'emploi dans les transformateurs, les huiles végétales ne peuvent pas être utilisées seules mais avec des additifs « non verts ». Les consommations restent cependant encore très faibles (quelques centaines de tonnes/an) [2].

I.3. Catégories des huiles et des liquides isolants

Il est difficile de choisir un système de classification des liquides isolants. Ils pourraient être classés en fonction de leurs propriétés isolantes, en fonction du type d'équipement dans lequel ils sont utilisés... ils sont classés encore en fonction de leur origine [2].

Les huiles minérales sont des produits naturels, obtenus directement par raffinage de bruts pétroliers. Leur composition chimique est extrêmement compliquée (plusieurs milliers de molécules différentes), et peut varier dans de larges proportions. Les huiles végétales sont également des produits naturels. Leur composition est plus simple (quelques dizaines de produits), mais elle peut également varier dans de larges proportions.

Les liquides de synthèse ont, au contraire, une composition simple, bien définie. Leurs propriétés sont donc constantes [5].

Les liquides sont utilisés en électrotechnique à cause de pour leurs propriétés isolantes. Les performances diélectriques des liquides sont caractérisées de plusieurs façons, notamment par la mesure de la conductivité et la tenue au claquage.

Le comportement des liquides au vieillissement (stabilité thermique, à l'oxydation et à l'hydrolyse) doit également être pris en compte. Lorsque le liquide est avant tout un fluide de transfert thermique, les propriétés prépondérantes seront principalement la viscosité et la capacité thermique. Dans quelques cas particuliers, on s'intéressera spécialement au comportement du produit vis-à-vis du feu, les propriétés diélectriques étant secondaires.

Les liquides isolants sont classés en trois types selon leur ordre d'apparition chronologique dans les applications électrotechniques (Tableau I.1) : (i) les végétales qui sont des produits naturels, (ii) les huiles minérales à base de produits pétroliers raffinés et (iii) les liquides de synthèse.

Tableau I.1 : Différentes catégories d'isolants liquides [6].

Catégorie		**Type**
(i)	Huile végétales	Huile de ricin
(ii)	Huiles minérales	Naphténiques
		Parafifinique
		A masse moléculaire élevée
(iii)	Hydrocarbures de synthèse linéaires	Polybutènes
	Hydrocarbures aromatique de synthèse	Alkylbenzènes
		Alkylnaphtalènes
		Alkylbiphéniles
	Hydrocarbures linéaires chlorés	Perchloréthylène
	Hydrocarbures aromatique chlorés	Trichlorobenzènes
		Polychlorbiphényles (PCB)
		Polychlorophénylalcanes
	Hydrocarbures linéaires chloroflourés	Trichlorotrifluoroéthane
	Hydrocarbures aromatiques éthyléniques	Alkyldiaryléthylène
	Esters organiques	Néocaprate de benzyle
		Diotylphtalate
		Esters phosphates
		Esters du pentaérythrol
	Ether-oxydes	Diolyléther
	Silicones liquides	Polydiméthylsiloxanes(PDMS)
		Polyméthylphénylsiloxanes

I.3.1 Huiles minérales

Les huiles minérales isolantes sont obtenues par distillation de pétroles sélectionnés, substances naturelles d'origine géologique, débarrassés de matières diverses (gaz légers, sulfure d'hydrogène, eau, etc.).

Ce sont des mélanges complexes (plusieurs milliers de molécules différentes) d'hydrocarbures, de composés soufrés, oxygénés, azotés, et de traces de composés organométalliques.

On les désigne sous le terme de bruts. Ils sont extraits dans toutes les régions du monde et plusieurs types ont été mis en évidence [5].

C'est principalement pour ces raisons technico-économiques, que les huiles minérales sont les plus communément utilisées dans les transformateurs de puissance.

Aussi, avec le développement de nouvelles techniques de traitement (séchage, purification …), les propriétés des huiles minérales n'ont cessé de s'améliorer depuis leur première utilisation au début du siècle dernier.

Les huiles minérales sont les liquides isolants les plus utilisés dans l'équipement électrique pour ses bonnes propriétés diélectriques et de transfert de chaleur, ses bonnes compatibilités avec les isolants cellulosiques et leurs couts faibles.

C'est principalement pour cette raison technique-économique, que cette huile est aussi la plus communément utilisée dans le transformateur de puissance [3].

Pour obtenir des huiles minérales de bonne qualité diélectrique, les bruts pétroliers doivent être raffinés suivant un procédé qui inclut habituellement une distillation, suivie d'une opération de déparaffinage, d'une extraction par solvant et d'une hydrogénation catalytique.

La composition d'une huile minérale est généralement définie par sa teneur en carbone paraffinique (C_p), en carbone naphténique (C_n) et en carbone aromatique (C_a) (figure I.1). (C_p), et (C_n) ont une influence prépondérante sur la densité, la viscosité et le comportement à basse température (point d'écoulement, point de trouble).

La présence d'aromatiques améliore la résistance à l'oxydation (plus faible formation de boues), les propriétés de gassing et la rigidité en impulsion [2].

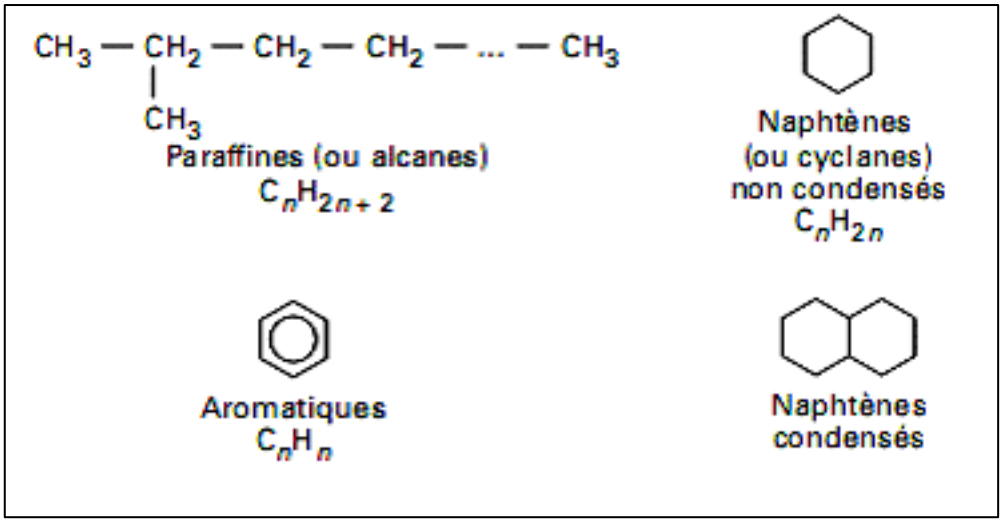


Figure I.1 : Structure des hydrocarbures de base dans une huile minérale [7].

I.3.2. Les huiles esters ou ester du pentaérythritol

Les esters eu l'électrotechnique, nés dans les années cinquante, sont les premiers produits hydrocarbonés à groupement fonctionnels.

Ils résultent de la condensation d'un acide organique sur un alcool avec élimination d'une molécule d'eau. Ces composés sont modérément polaires du fait de l'électronégativité des atomes d'oxygènes présents dans le squelette hydrocarboné.

On distingue différents types d'ester, selon que l'on part d'acide minéraux ou d'acides organiques.

A partir d'acides minéraux, on obtient les esters arylphosphoriques qui possèdent un bon comportement au feu (point de feu ~ 350°C), mais n'ont pas de bonnes propriétés électriques. En revanche, les esters d'acides organiques représentés au début par le dioctylsébaçate (DOS) et les esters comme les huiles végétales présentent de bonnes propriétés électriques. Ce sont, comme les hydrocarbures halogénés, des liquides dipolaires de constante diélectrique de l'ordre de 3 à 5 à 50 Hz et 90°C et qui ont permis d'obtenir des liquides pour condensateurs à diélectrique mixte satisfaisants.

Depuis le début des années quatre-vingts, les esters organiques pour hautes températures (phtalates ou esters du pentaérythrol) ont été étudiés pour emploi dans les transformateurs en remplacement desPCB_s. Ils peuvent supporter des échauffements de plus de 100°C.

Actuellement, on compte plus d'une dizaine de marques commerciales d'esters organiques [1].

Ces esters sont obtenus à partir d'un tétra-alcool (le pentaérythritol) et d'un mélange d'acides monocarboxyliques contenant 7 à 9 carbones (figure I.2).

L'estérification est conduite à une centaine de degré Celsius et est suivie d'opérations de neutralisation, de distillation et d'un traitement sur terre activée.

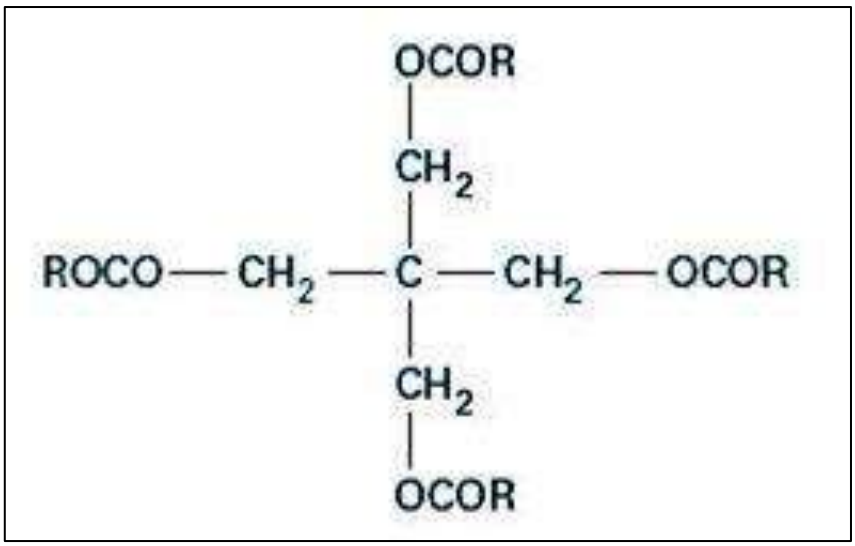


Figure I.2 : Structure de l'ester du pentaérythritol ou tétra-ester [1].

I.3.3. Huiles silicones ou PDMS

Les silicones pour l'électrotechnique, polymères liquides du diméthylsiloxane, ou polydiméthylsiloxanes (PDMS), peuvent être considérées comme relevant de la chimie minérale.

Les silicones liquides présentent simultanément de bons comportements à basse température (point d'écoulement -60°C) et à haute température (température d'utilisation 150°C), appréciables dans certains matériels soumis à des variations thermiques importantes.

Ces huiles sont constituées d'une chaîne moléculaire linéaire, dont les éléments sont formés d'atomes de silicium et d'oxygène alternés.

Les groupements organiques latéraux saturants les valences libres de l'atome de silicium sont dans ce cas des groupements méthyle [1].

La réaction de polymérisation est suivie d'une filtration et d'un passage dans une colonne de dévolatilisation sous vide et d'une finition. La formule générale est représentée sur la figure I.3.

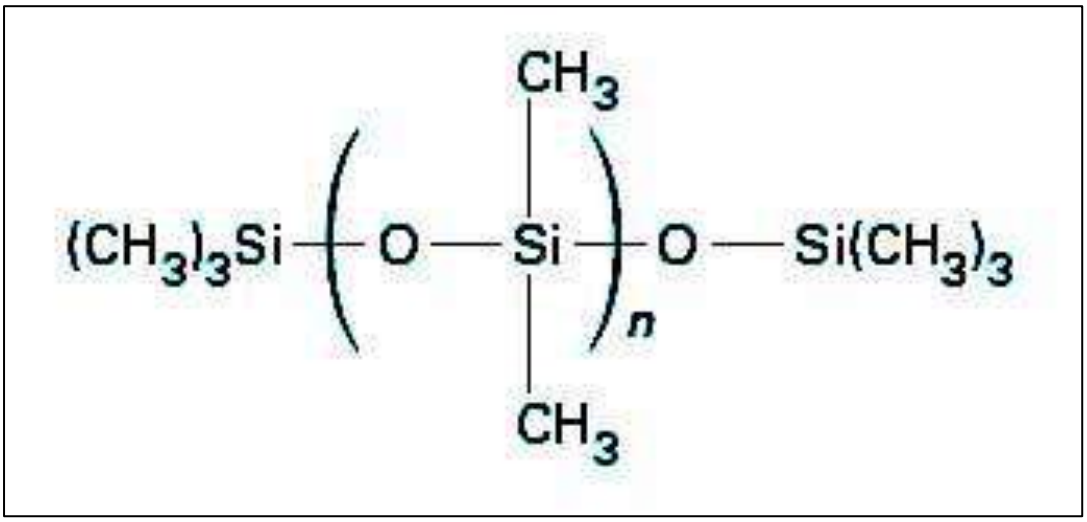


Figure I.3 : Structure des huiles silicones ou PDMS [7].

I.3.4. Hydrocarbures halogénés ou PCB

Bien que des dérivés fluorés ou chlorofluorés aient également été utilisés, l'industrie électrotechnique a essentiellement employé des produits chlorés qui présentaient l'avantage de ne pas donner de gaz inflammables ou explosibles sous décharges partielles ou dans un claquage électrique [5]. Les huiles minérales et les hydrocarbures de synthèse sont inflammables et produisent, sous l'action d'arcs électriques, des gaz eux-mêmes inflammables et explosibles (hydrogène, méthane, etc.).

La nécessité de réduire les risques d'incendie des matériels électriques est à l'origine de la synthèse des hydrocarbures halogénés, principalement des dérivés aromatiques chlorés et des polychloroalcanes.

Les premiers hydrocarbures halogénés connus, et désignés sous le terme générique d'askarels, sont des polychlorobiphényles (PCB), obtenus à partir du biphényle et pouvant être utilisés en mélange avec des chlorobenzènes. Ils n'ont pas de point de feu et sont ininflammables, pour autant que l'ininflammabilité d'un liquide résulte de l'ininflammabilité de ses vapeurs [1].

Le principe revient alors à remplacer une partie des atomes huiles d'hydrogène de la molécule par des atomes de chlore, qui sous ionisation ou arc électrique ; forment des molécules HCI au lieu de l'hydrogène gazeux figure I.4.

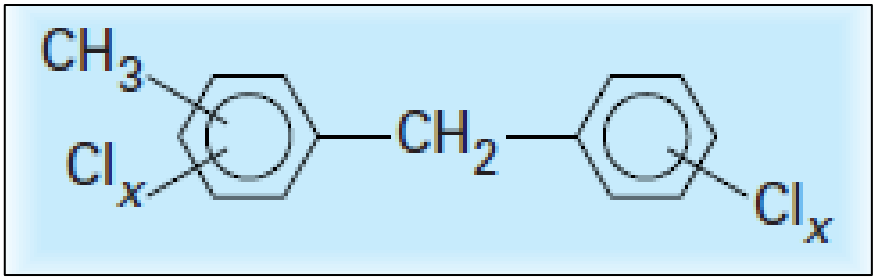


Figure I.4 : Structure générale desPCB_s [5].

Les polychlorobiphényls (PCB), encore connus sous le nom d'askarels (en grec : résistant au feu), ont été les plus largement utilisés jusqu'à ce que leur usage soit limité puis interdit en 1985 à cause de leur persistance dans l'environnement et de leur toxicité (notamment dégagement de dioxines quand ils brûlent). Dans l'union européenne, les derniers appareils contenants des traces de PCB ont été détruits avant 2010.

En Algérie, leur utilisation a été interdite par circulaire interministériel du 04/12/1985 suivi du décret nº 87-182 du 18/08/1987 relatif aux PCB [7].

I.3.5. Les huiles végétales ou esters naturels

Les huiles végétales ont fait partie des premiers liquides utilisés dans les appareils électriques. Elles sont essentiellement constituées de triglycérides, c'est-à-dire d'esters triglycériques d'acides gras. Leur formule chimique est la suivante :

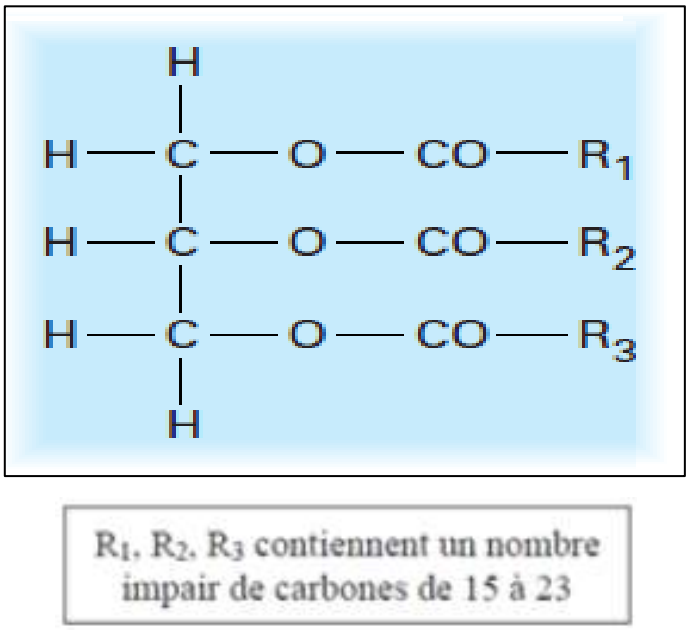


Figure I.5 : Structure chimique d'une huile végétale ou triester (triglycérides) [5].

Les huiles végétales sont obtenues par estérification d'un tri-alcool simple, le glycérol, avec trois acides gras. Ces acides sont mono-carboxyliques (de formule R-COO-H), à chaine linéaire non branchée comprenant un nombre pair d'atomes de carbones (entre 8 et 24). Ils peuvent être saturés (sans double liaison) ou insaturés et parfois hydroxylés.

La réaction d'estérification d'une huile végétale est la suivante : [7]

Glycero + 3 acides gras → Triglycerides + eau

(Tri - alcool) (acid) (Triester)

Les triglycerides sont obtenus par trituration (broyage et pression) des graines (soja, maïs, colza, tournesol, ricin, etc.).

I.4. Utilisation des huiles isolants

Les huiles isolantes sont très utilisées en électrotechniques comme présenté dans le tableau I.2.

Tableau I.2 : Utilisation des liquides isolants dans l'équipement électrique [5].

Équipement	**Transformateurs de puissance**	**Transformateurs de distribution**	**Transformateurs de traction**	**Diviseurs capacitifs**	**Transformateurs spéciaux**	**Traversées**	**Changeurs de prise**	**Répartiteurs**	**Disjoncteurs**	**Condensateurs**	**Câbles**
Huiles minérales	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	X
Polychlorobiphényles		O				O	O			O	
Autres hydrocarbures halogénés		X									
Huiles silicones		X	X				X		X		
Tétra esters de pentaérythritol		X	X				X				
Alkylbenzènes				X		X				X	X
Hydrocarbures aromatiques (M/DBT, PXE...) (2)				X						X	
Huiles végétales (huile de ricin, de soja...)										X	
Phtalates (DOP, DNP) (2)										X	
Polybutènes											X

(1) X : le liquide toujours utilisé pour cette application

O : le liquide n'est pas utilisé pour cette application

mais il existe encore des appareils contenant ce liquide

(2) M/DBT : mono/dibenzyltoluène ; PXE phénylxylyléthane ;

DOP dioctylphtalate ; DNP dinolylphtalate ;

Avant de choisir un liquide diélectrique, il faut prendre en considération certains facteurs, à savoir:

- ✓ La toxicité du produit (pollution froide): la toxicité du produit est à prendre en compte dans tous les cas d'éclatement de transformateur sans incendie.
- ✓ Le vieillissement: le liquide a-t-il tendance à vieillir et s'altérer très vite en fonction du temps.
- ✓ L'embrasement du diélectrique dépend de son point d'ébullition et de la résistance mécanique du transformateur. Les huiles minérales isolantes remplissent ces conditions; pour cela elles sont très utilisées.
- ✓ L'opacité des fumées : de toute évidence, un diélectrique ne dégage de fumées qu'à partir du moment où il a pris feu; l'opacité des fumées peut gêner gravement les secours.

Toutefois, la fabrication de l'huile isolante finie est orientée par les tendances des huiles de base; le choix d'une ou plusieurs huiles de base est à déterminer en fonction :

- ✓ Des caractéristiques physiques et chimiques que l'on désire conférer à l'huile finie comme la viscosité, la densité, la stabilité,...
- ✓ De la nature chimique recherchée : paraffinique, naphténique ou mixte [1].

I.5. Caractéristiques d'une huile minérale isolante

Les huiles isolants pour transformateurs, quelque soit leur type doivent toujours répondre a plusieurs critères électriques et physiques pour assurer deux principales fonctions qui sont l'isolation électrique et le transfer de chaleur [3].

Le choix d'une huile isolante repose sur un nombre important de propriétés telle que :

- ✓ Les propriétés électriques ;
- ✓ Les propriétés physiques ;
- ✓ Les propriétés chimiques ;

I.5.1. Propriétés électriques

Les propriétés électriques des liquides dépendent de leur formulation (composition et constitution moléculaire, etc.) et de leurs conditions d'utilisation ou conditionnement.

Il faut donc éliminer toute impureté qui ne constitue pas le liquide lui-même ; résidus de synthèse, particule, gaz, molécule d'eau. Cette élimination est faite par des opérations de traitement qui comprennent des phases de déshydratation et de dégazage sous vide et en température, ainsi que des filtrations de l'ordre du µm [7].

La permittivité relative$\mathcal{E}_r$, la résistivité ρ, le facteur de pertes diélectriques tan δ et la rigidité diélectrique E_c sont les caractéristiques électriques principales. Outre la structure du liquide et le conditionnement, ces propriétés dépendent de la tension appliquée, de la fréquence et de la température. Dans l'industrie, ces mesures sont souvent rapportées à la température moyenne de fonctionnement d'un transformateur, soit 90 ºC.

D'autres caractéristiques, directement liées aux propriétés électriques, telles que le gassing et la tendance à l'électrisation statique, viennent s'y ajouter [3].

I.5.1.1. Le traitement

Avant chaque utilisation et de manière à accroître leurs propriétés diélectriques, les huiles isolantes subissent un traitement par la technique de dégazage afin de réduire la présence d'impuretés (humidité, particules, gaz) [3]. Elle consiste à mettre le liquide sous vide tout en le faisant passer à travers un filtre de faible porosité (≤ 5µm).

L'ensemble est réalisé en température de manière à extraire le maximum d'humidité en créant le vide. Le chauffage permet à la viscosité de diminuer avec la température en laissant l'huile passer plus aisément à travers le filtre. A titre d'exemple, une huile neuve qui contient 20ppm d'humidité, en contient une concentration inférieure à 10ppm après le traitement.

Une huile neuve contient aussi 0.0001% à 0.001% de particules de taille supérieure à 5µm, ce qui représente 105 à 106 particules pour 100ml d'huile (les mesures normalisées sont toujours ramenées à 100ml). Récemment, la technologie permet de compter des particules de taille inférieure à 2µm [7].

Le tableau I.3 donne un exemple de comptage de particules dans une huile minérale avant et après traitement.

Tableau I.3 : Distribution en taille et en nombre des particules dans une huile minérale[7].

Intervalle de comptage (µm)	N pour 100 ml d'huile avant traitement	N pour 100 ml d'huile après traitement
1 à 2	12 000 à 70 000	1 000 à 4 000
2 à 5	9 000 à 35 000	700 à 3 500
5 à 10	1 000 à 3 000	140 à 1 000
10 à 15	150 à 600	30 à 300
15 à 25	50 à 300	20 à 90
≤ 25	10 à 60	3 à 30

N : est la moyenne arithmétique de cinq comptages sur un échantillon.

I.5.1.2. Permittivité

Dans la pratique, ε_r est obtenu en comparant le condensateur plein au condensateur dans l'air. L'erreur commise sur la détermination de ε_r est faible, puisque la permittivité relative de l'air (à 25 °C et sous pression atmosphérique) vaut 1,000 5 [5].

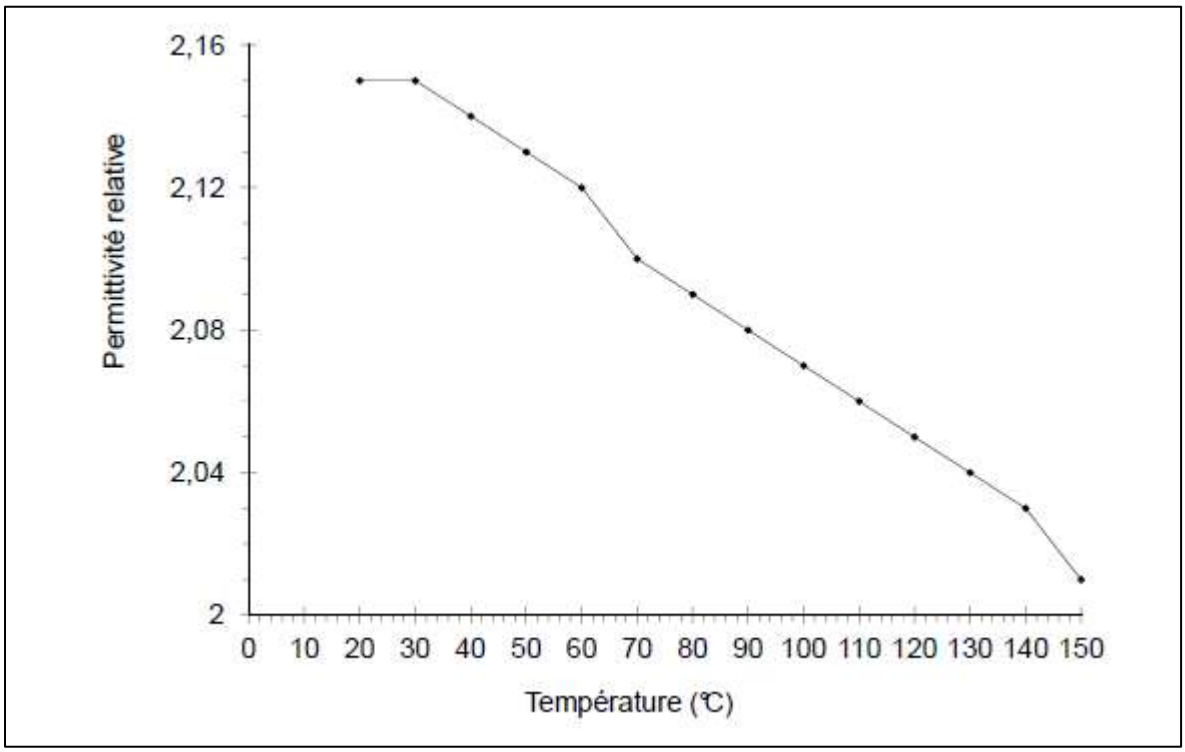


Figure I .6 : Variation de la permittivité relative en fonction de la température [8].

La permittivité absolue ε est le produit de la permittivité relative ε_r par la permittivité du vide ε_0 (ε_r= 8,854 × 10^{-12} F/m) :

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \qquad \text{(I-1) [2].}$$

- ✓ ε : Permittivité absolue ;
- ✓ ε_r: Permittivité relative ;
- ✓ ε_0: Permittivité du vide ;

La permittivité des hydrocarbures est faible et voisine de 2.

La présence d'hétéroatomes (oxygène, chlore...), en créant des dipôles de forte intensité, confère aux molécules une permittivité élevée [2].

La permittivité d'une huile minérale pure est donc, surtout, due aux phénomènes de polarisation électronique et atomique.

C'est une caractéristique électrique liée à la formation du liquide. La permittivité absolue s'exprime en farads par mètre. Elle définit la possibilité, sous l'action du champ électronique, de libérer des charges [1].

I .5.1.3. Conductivité

Un liquide, pour être isolant électrique, doit conduire le moins possible l'électricité lorsqu'une tension lui est appliquée. Sa conductivité doit donc être la plus faible possible. La conductivité d'un liquide isolant 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.

La conductivité n'est pas une propriété intrinsèque d'un liquide isolant. Elle est liée à la présence d'infimes quantités (en général, inférieures à 1 ppm) d'impuretés ionisables. Il est possible d'améliorer la conductivité d'un produit en éliminant une partie des impuretés qu'il contient.

Cette élimination, appelée « traitement diélectrique », est réalisée par passage du produit à travers un lit de terre absorbant (attapulgite, bentonite...) [2].

I .5.1.4. Résistivité

La résistivité est une propriété fortement dépendante du conditionnement, elle est influencée par la présence d'impuretés (poussières, particules, gaz, humidité), même si la quantité de ces impuretés est aussi faible (quelques ppm).

Plus la température est élevée, plus la viscosité du liquide est faible, plus la dissociation des impuretés en ions est forte, et plus la mobilité des ions est grande, et par conséquent plus la conductivité est élevée [7].

La résistivité d'un liquide diminue donc lorsque la température augmente. C'est pour cette raison que la plupart des spécifications des produits indiquent une valeur de résistivité à 90ºC (température moyenne de fonctionnement d'un transformateur).

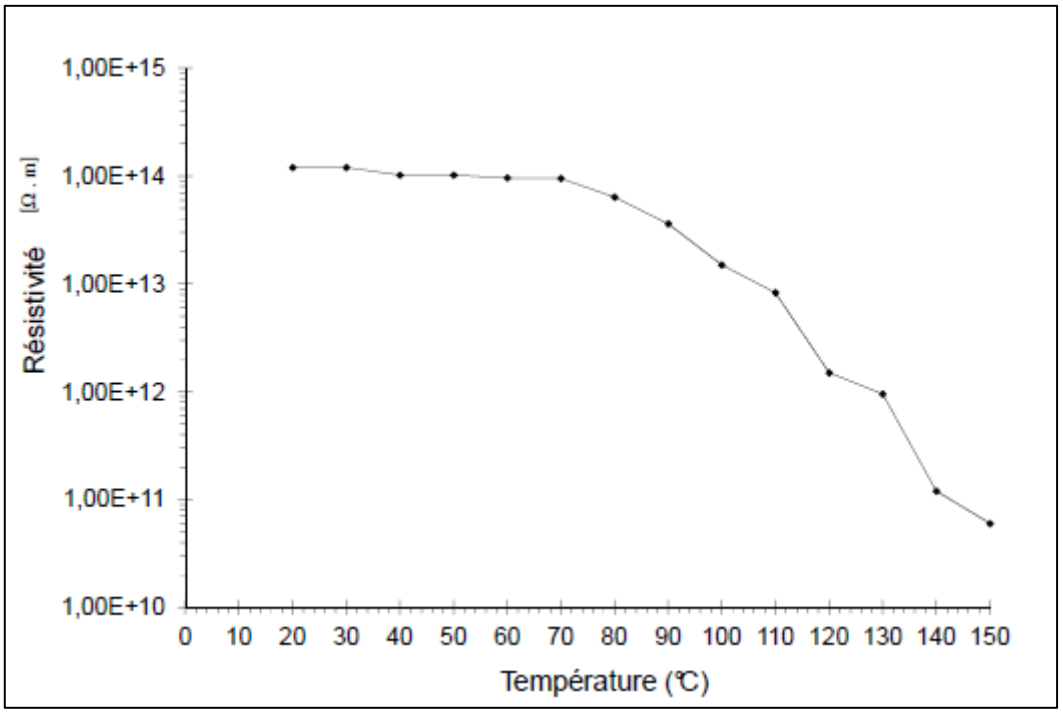


Figure I.7 : Variation de la résistivité en fonction de la température [8].

L'ordre de grandeur de la résistivité pour les liquides diélectriques utilisés dans l'industrie varie de 10^{11} à $10^{17}\Omega$.m.

I .5.1.5. Facteur de pertes diélectrique tan δ

Ces paramètres sont sensibles aux contaminants et aux produits de décomposition du vieillissement de l'équipement [9].

Le facteur de dissipation ou facteur de pertes diélectriques ($\tan\delta$), qui est une valeur adimensionnelle, est directement lié à la résistivité et à la permittivité. Il peut être représenté par un schéma équivalent (condensateur C et résistance R en parallèle) ce qui permet d'écrire [7].

$$\tan\delta = \frac{1}{R.C} \qquad \text{(I-2) [7].}$$

- ✓ $\tan\delta$: facteur de pertes diélectriques ;
- ✓ R : résistance en parallèle ;
- ✓ C : Condensateur ;

Pour un isolant parfait (σ = 0), la différence de phase φ entre la tension appliquée et le courant qui en résulte est $\varphi = \pi/2$.

Le facteur de dissipation se définit comme la tangente de l'angle de perte, c'est-à-dire l'angle pour laquelle la différence de phase entre la tension appliquée et le courant qui en résulte dévie de $\pi/2$ lorsque le diélectrique du condensateur se compose exclusivement du liquide isolant, considéré comme parfait.

Dans le cas réel, $\varphi + \delta = \pi/2$où δ est appelée angle de pertes. Plus δ est grande, plus les pertes diélectriques seront élevées (figure I.8) [3].

Le facteur de perte tan δ est une fonction croissante avec la température à cause de l'accroissement de la mobilité des charges dans le liquide résultant de la diminution de la viscosité η . Les mesures sont souvent réalisées à 90°C.

Le facteur de dissipation est très sensible aux impuretés comme la résistivité ; il signale la qualité électrique de l'isolant. Une bonne corrélation est remarquée entre l'évolution de tan δ et certains paramètres, tels que l'acidité et les dépôts, ainsi qu'avec l'oxydation de l'huile C'est pourquoi, dans l'industrie, tan δ est pris comme critère de vieillissement.

En effet, une valeur élevée de tan δ pour le cas d'une huile neuve dans un appareil récemment construit, indique sa contamination par les matériaux de construction (résines, vernis, colles, flux de soudure, etc.) et non pas une dégradation par vieillissement [7].

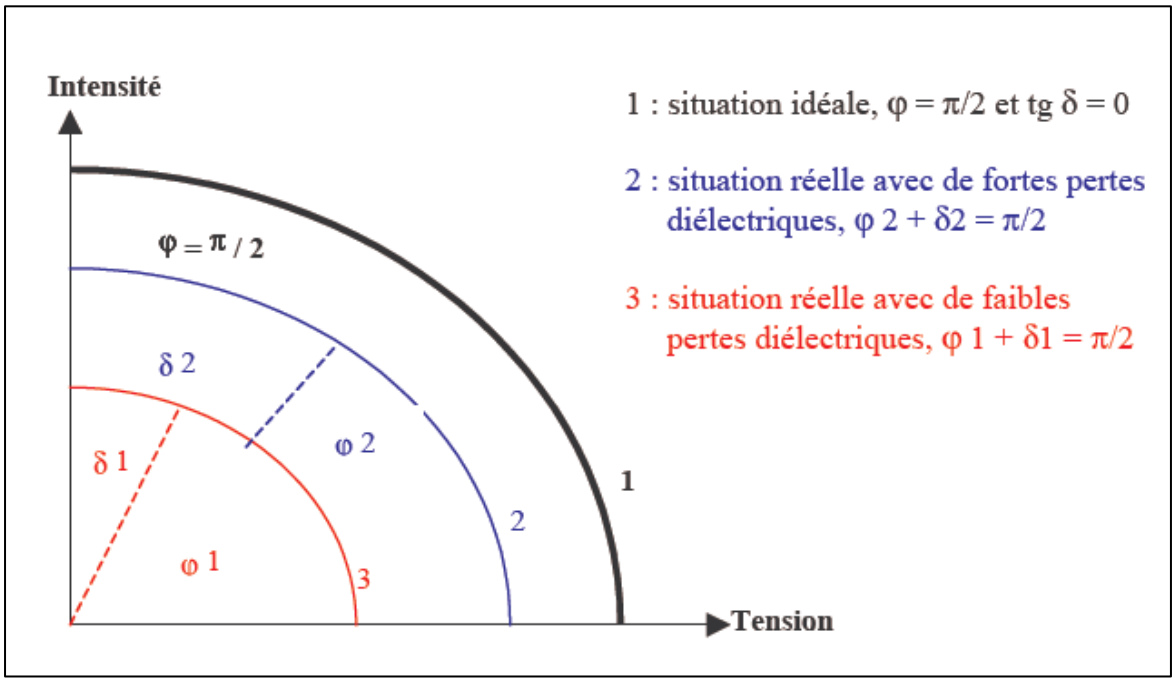


Figure I.8 : Représentation schématique de l'angle de pertes [7].

I.5.1.6. Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'une huile est la valeur maximale du champ électrique moyen qu'on peut lui appliquer sans décharge, entre deux électrodes. Elle est donnée par la relation suivante:

$$E_c = \frac{U_c}{e} \quad \text{(I-3) [7].}$$

Où

- ✓ E_c : est la rigidité diélectrique kV/mm ;
- ✓ U_c : est la tension de claquage en kV ;
- ✓ e : est la distance entre les deux électrodes en mm ;

I.5.1.7. Tension de claquage

Cette propriété est très complexe, et elle est mesurée selon les spécifications données par la norme CEI 60 156 [10].

Dans de cette méthode les électrodes sont sphériques ou hémisphériques et places a une distance 2.5 mm, et la tension est en rampe augmentant de 2 kV par seconde jusqu'au calquage [9].

I.5.2. Les propriétés physiques

I.5.2.1. La viscosité

La viscosité *v* est un paramètre important pour la dissipation de la chaleur.

La variation de la viscosité avec la température dépendants de la nature de l'huile. Les aromatiques présentent une forte variation, alors que les hydrocarbures paraffiniques en ont une beaucoup plus faible. Les huiles naphténiques présentent en général une viscosité plus élevée à basse température [5].

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.

La viscosité est le pouvoir des fluides à résister au déplacement d'une partie de ce fluide par rapport à l'autre.

Elle s'exprime par la relation suivante :

$$\nu = C_t - B/t \quad \text{(I-4) [5].}$$

- ✓ v: Viscosité en centistokes ;
- ✓ C_t : Constante de viscosité ;
- ✓ t: Durée de l'écoulement en secondes ;
- ✓ B: Coefficient du viscosimètre ;

L'indice de viscosité est une caractéristique donnant la variation de viscosité d'une huile en fonction de la température.

Une huile est d'autant meilleure que sa variation de viscosité en fonction de la température est faible [1].

I.5.2.2. Point de congélation

Le point de congélation est la température la plus haute à laquelle le produit analysé reste immobile quand on incline le tube qui le contient à 45°. Pour une fraction pétrolière, le point de congélation s'étend sur tout un intervalle de température, du fait de la présence des différentes familles d'hydrocarbures [1].

Cette caractéristique présente un avantage dans le domaine du raffinage, étant donné qu'elle est la base de la séparation par cristallisation fractionnée.

Un point de congélation bas dénote une nature de tendance aromatique. Un point de congélation élevé (supérieur à 70-75 °C) est relatif à des fractions riches en paraffines.

I.5.2.3. Le point d'écoulement

L'utilisation de matériels électriques extérieurs nécessite de connaître la viscosité des liquides à basse températures correspondant au fonctionnement en hiver (-25 °C) ou dans des conditions climatiques extrêmes (-60 °C).

Les liquides utilisés se figent généralement à températures pouvant aller à -60°C (polybutènes, huiles silicones) à -30 °C (huile minérale), sans parler des liquides de synthèse à haut points d'écoulement (+9 °C pour les chlorobiphényles) et des huiles pour câbles à matière non migrante dont les points d'écoulement sont de 80 à 100 °C.

Le point d'écoulement, température à laquelle les liquides se figent, est déterminé suivant la norme ISO.3016 [11].

Il est défini comme étant la température la plus basse pour laquelle un liquide peut couler lorsqu'il est refroidi à des conditions fixées.

Lorsqu'un liquide est refroidi, il acquiert une certaine consistance qui n'est pas la congélation, correspondant à l'état solide d'un corps pur à température fixe.

Cette consistance est liée à la masse moléculaire, à la composition du liquide en mélange de différentes molécules (isomères et additifs) [1].

I.5.2.4. Le point de feu

Le point de feu est la température minimale pour laquelle la combustion des vapeurs d'un liquide sera entretenue [1].

I.5.2.5. Le point d'éclair

Le point d'éclair d'une huile caractérise la température au-delà la de laquelle le liquide peut spontanément s'enflammer la valeur doit être spécifiée pour des raisons de sécurité [7].

C'est la température minimale à laquelle les vapeurs d'un produit s'enflamment à l'approche d'une flamme nue.

Le point d'éclair et le point de feu servent ainsi à caractériser l'inflammabilité d'une huile [1].

I.5.2.6. Capacité thermique

La capacité thermique massique ou chaleur spécifique se définit comme étant la quantité de chaleur pour augmenter d'un degré Kelvin la température d'un kilogramme d'une substance, sans qu'il y ait de changement de phase [7].

La capacité thermique des huiles isolantes exprimée en joules par kilogramme-kelvin croît avec la température et est généralement d'autant plus élevée que la masse volumique est plus faible.

Elle varie de 1000 à 2300 J/ (kg.K).

La capacité thermique massique et la masse volumique permettent de définir en partie la constante de temps thermique des matériels à pleine charge, suivant le type de refroidissement, naturel ou forcé [1].

I.5.2.7. Conductivité thermique

La conductivité thermique (λ), mesurée en watts par mètre-kelvin, exprime le flux thermique s'écoulant, en régime permanent sous l'effet d'un gradient thermique entre deux isothermes du liquide. Elle décroît lorsque la température et la masse volumique augmente. Les valeurs usuelles sont de l'ordre de 0,14 W/(m.K) [1].

I.5.2.8. Masse volumique

La masse volumique des huiles minérales isolantes peut se déterminer suivant les prescriptions de la norme ISO 3675 [12].

Aux U.S.A, on exprime souvent la densité d'une huile en degrés API à 60°F. La relation entre la densité par rapport à l'eau (specific gravity) et le degré API, à la température de 60°F est la suivante :

$$degAPI = \frac{141.5}{spicific\ gravity} - 191{,}5 \qquad \text{(I-5) [1].}$$

Les masses volumiques de divers liquides vont d'environ 800 à 1600 kg/m3 [1]. Cette une caractéristique propre à l'huile, elle permet d'apprécier et donc son efficacité pour la dissipation de la chaleur .elle ne change qui très peu durant l'exploitation et permet au coté de l'indice de réfraction et de la masse volumique de classer l'huile [13].

I.5.2.9. Aspect et Couleur

La coloration d'une huile neuve est une indication de son degré de raffinage : les huiles très raffinées sont blanches; une variation de la couleur dans des livraisons d'huile neuve peut indiquer un changement dans l'origine de l'huile ou dans la fabrication, sans que cela soit absolument certain.

Dans le cas d'une huile usagée, une coloration foncée indique sa détérioration.

Les propriétés optiques présentent un intérêt particulièrement grand, car elles peuvent caractériser la constitution d'un liquide et un spectre infrarouge peut servir à l'identifier ou à pénétrer dans sa structure [1].

I.5.3. Les propriétés chimiques

Les propriétés chimiques d'une huile qui peuvent intéresser l'ngénieur en charge de l'exploitation d'un transformateur sont [7].

I.5.3.1. L'acidité totale

L'acidité représente les dérivés acides formés au cours du vieillissement de l'huile. Sa détermination procure le moyen le plus direct pour apprécier et suivre l'altération de l'huile. Elle est exprimée par la mesure de l'indice d'acidité qui est le nombre de mg de potasse alcholique(KOH) nécessaire pour neutraliser un gramme d'huile.

L'acidité d'une huile neuve est très faible en service. Elle est de l'ordre de 0.05 à 0.5 mg de KOH/g d'huile en service. Aux premiers stades d'oxydation, elle augmente pour atteindre, après un certain temps de service, une valeur où elle reste constante. Cette stabilité s'explique par les dépôts qui précipitent [1].

I.5.3.2. Oxydation des huiles minérales isolantes

On désigne par oxydation, un ensemble de réaction chimique complexe et lente au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène. Il se produit tout d'abord des produits de décomposition solubles : aldéhydes, cétones, acides organiques, puis par condensation et polymérisation, des dépôts insolubles [1].

Les conséquences de l'oxydation de l'huile pour les isolations sont :

- ✓ 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 [1].

I.5.3.3. 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 N.F T60-131 (CEI 296) [14]; la coloration qu'elle prend permet de juger si les composés soufrés sont corrosifs ou non.

I.5.3.4. Teneur en eau

Les propriétés des liquides sont affectées par la teneur en eau. La quantité d'eau dissoute dans un liquide dépend de sa nature. Avant la saturation et à l'état de vapeur, sa teneur en eau dépend de la température et de la pression partielle d'eau dans l'atmosphère au-dessus du liquide, c'est à dire de l'humidité relative extérieure. Si cette dernière est de 100 %, le liquide se sature en eau [15].

I.6. Vieillissement des huiles

On appelle vieillissement, tout phénomène se traduisant par une évolution lente et irréversible des propriétés du matériau. Ces changements affectent considérablement les performances de l'isolant et réduisent sa durée de vie.

Le terme vieillissement n'implique pas un mécanisme précis à cause de la complexité de la composition chimique du matériau.

Le degré de vieillissement d'un isolant et sa vitesse d'accélération dépendent des propriétés physiques, de la composition chimique du matériau, de la nature et la durée de la contrainte appliquée, ainsi que du processus et des traitements au cours de sa fabrication Si ces décharges sont suffisamment intenses, elles conduisent à un arc électrique endommageant ainsi l'isolation électrique.

Le processus de dégradation est aussi influencé par des facteurs intrinsèques qui sont associés à la structure du matériau lui-même. Ces facteurs peuvent se présenter sous forme de changements chimiques comme l'oxydation et l'hydrolyse, aussi bien que sous

forme de changements physiques tels que la recristallisation et la cristallisation secondaire.

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

- ✓ Expertise : Analyse des pièces défaillantes, recherche des causes de vieillissement et détection des anomalies.
- ✓ Optimisation : Amélioration de la stabilité d'un matériau par modification de sa composition, essais comparatifs.
- ✓ Prédiction de la durée des essais de vieillissement accélérés, étude des modèles cinétiques permettant la prédiction de la durée de vie.
- ✓ Recherche de base sur les mécanismes de vieillissement et de stabilité.

I.7. Conclusion

De ce premier chapitre, nous avons pu ressortir que le choix d'un liquide, destiné à l'isolation électrique, n'est pas basé seulement sur ses propriétés électriques, mais dépend aussi de sa tenue au vieillissement, sa capacité à évacuer la chaleur et de sa sécurité d'emploi.

Nous avons pu noter que les huiles esters se démarquent avec leur forte capacité à absorber l'humidité (haute solubilité de l'eau). La différence entre les esters synthétiques et les esters naturels se situe au niveau de leur stabilité à l'oxydation et de leur point d'écoulement. En effet, les esters naturels qui sont facilement biodégradables ont une faible tenue à l'oxydation et se figent à des températures beaucoup plus hautes. Les huiles silicone quant à elles, ont une très bonne stabilité à l'oxydation mais ne sont pas du tout biodégradable.

Les huiles minérales sont les plus utilisées dans les équipements électriques, et plus communément dans les transformateurs de puissance, et cela, pour leur bonnes propriétés diélectriques et de transfert de chaleur.

Néanmoins, de nombreux problèmes récents, liés à la corrosivité des huiles minérales remettent en question leur règne et orientent peu à peu les constructeurs de transformateurs à se diriger vers les esters qui, en plus de leurs bonnes propriétés, ne sont pas corrosives et sont moins nocives pour l'environnement et les hommes.

Il apparaît que les propriétés électriques des huiles isolantes sont très sensibles à la présence d'impuretés telles que l'humidité, les particules solides et les gaz. La mesure de la tension de claquage, qui constitue l'essai de référence pour déterminer la tenue

diélectrique d'une huile, en plus de la présence d'impuretés, est directement influencée par les conditions d'essai telles que la géométrie des électrodes, la pression ou la température.

La formation de gaz ou gassing et la tendance d'électrisation statique sont les problèmes essentiels influençant les propriétés électriques des huiles isolantes.

La capacité d'une huile à évacuer la chaleur est une caractéristique à ne pas négliger car elle permet d'éviter la surchauffe du transformateur, et de diminuer ainsi la dégradation prématurée de certains matériaux sensibles aux hautes températures (telle que la cellulose). Elle peut être évaluée à partir du calcul de la viscosité, de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique et du coefficient de dilatation.

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

Enfin, ce chapitre nous a montré que l'analyse de l'huile constitue un outil indispensable pour vérifier l'état de vieillissement du transformateur en service.

Ces changements affectent considérablement les performances de l'isolant et réduisent sa durée de vie.

CHAPITRE II

CLAQUAGE DES DIELECTRIQUES LIQUIDES

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons au phénomène de claquage des diélectriques liquides.

Le claquage est un phénomène qui se produit dans l'isolant quand le champ électrique est plus important que ce que peut supporter cet isolant. Il se forme alors un arc électrique. Dans un condensateur, lorsque la tension atteint une valeur suffisante pour qu'un courant s'établisse à travers de l'isolant (ou diélectrique), cette tension critique est appelée tension de claquage. Elle est liée à la géométrie de la pièce et à la rigidité diélectrique qui est exprimée en (*kV/mm*) [16].

La décharge électrique à travers l'isolant est en général destructrice. Cette destruction peut-être irrémédiable, mais ceci dépend de la nature et de l'épaisseur de l'isolant entrant dans la constitution du composant [16].

Ainsi, deux principaux mécanismes peuvent être présentés en ce qui concerne le claquage des diélectriques liquides:[17]

1- mécanisme électronique.

2- mécanisme avec phase gazeuse.

En plus de ces mécanismes, le claquage peut être dû à la présence d'impuretés de diverses natures, en suspension dans le diélectrique liquide. On parle dans ce cas de mécanisme de claquage par pont [17].

Les défaillances électriques du matériel électrique sont dues, dans une très large mesure, au claquage électrique des isolations. Le claquage peut aussi être déclenché dans les liquides, traversés par un très intense faisceau lumineux produit par un laser. La tension de claquage d'une isolation ne dépend pas uniquement des propriétés des matériaux eux-mêmes, mais d'un très grand nombre de facteurs. Les conséquences d'un claquage sont plus ou moins catastrophiques, selon le milieu où il se produit : Un liquide également, quoique les bulles de gaz produites, souvent en abondance, peuvent constituer ultérieurement un danger.

Le claquage de la totalité de l'isolation résulte d'interactions complexes. Le problème de la tenue diélectrique, sans aucun doute le plus important qui se pose à l'ingénieur, est aussi le plus difficile. Selon les cas, le claquage est contrôlé par la génération ou par la propagation des streamers. Nous montrerons comment l'une ou l'autre de ces situations peut se présenter dans la pratique industrielle [18].

II.2. Claquage des matériaux

II.2.1. Traits communs au claquage

Plusieurs traits du claquage sont communs à tous les matériaux diélectriques que ça sont gazeux liquides ou solides : [18]

- ✓ le claquage est localisé : il n'affecte qu'une zone infime du milieu, la partie saine conservant souvent (même après une longue période sous tension) ses propriétés ;
- ✓ les processus électroniques sont toujours impliqués dans la phase initiale ; le claquage peut résulter d'un effet coopératif d'une très grande variété de phénomènes (thermiques, mécaniques, chimiques, etc.) plus ou moins inter-corrélés, donnant naissance à un streamer, arborescence plus ou moins lumineuse, ramifiée et conductrice qui précède l'arc ;
- ✓ les effets d'échelle sont considérables : l'accroissement des volumes et surfaces soumis au champ électrique et des distances entre conducteurs entraîne une réduction très sensible de la rigidité électrique;
- ✓ le temps d'application et la forme de l'onde de tension (alternative, impulsionnelle) jouent un rôle considérable ; le claquage peut avoir lieu après des temps extrêmement brefs (< 1 ps) ou ne peut se manifester qu'après de très longues périodes (plusieurs années) ; des transformations du matériau ont alors pu se produire (vieillissement) ;
- ✓ les effets de polarité sont souvent très marqués, les tensions de claquage étant presque toujours plus basses pour les polarités positives ;
- ✓ l'état de surface des électrodes influe notablement, les phénomènes de conditionnement entraînant une distribution notable des tensions de claquage, en particulier dans les fluides en champ uniforme;
- ✓ la dispersion des résultats peut être très importante ; cela nécessite une étude statistique, longue et coûteuse, sur des maquettes proches de l'utilisation projetée.

II.2.2. Cas des liquides

Les liquides isolants sont principalement utilisés en Électrotechnique, presque toujours en association avec des solides isolants. Leur fonction électrique essentielle est d'éliminer les décharges partielles susceptibles de se produire dans des poches gazeuses, en remplissant les interstices entre solides isolants et conducteurs ainsi que les cavités au sein des solides eux-mêmes. Ces décharges, très agressives et destructrices pour les isolants solides, peuvent se déclencher à des tensions très basses (au-delà de la tension minimale de Paschen : environ 400 V dans l'air) [18].

Cependant, de nouveaux dispositifs où le liquide est utilisé seul sont progressivement développés : [18]

- ✓ compteurs de particules élémentaires ;
- ✓ lignes à décharge (condensateur adapté), renfermant des liquides de grande permittivité (eau, glycol) ;
- ✓ câbles et générateurs supraconducteurs, mettant en œuvre des liquides cryogéniques ;
- ✓ générateurs électrostatiques de forte puissance massique.

Plus encore que dans l'étude des phénomènes de conduction, l'état liquide va, par l'extrême complexité et la grande diversité des mécanismes mis en jeu, rendre difficile l'étude et l'interprétation des phénomènes de claquage. Outre l'importance fondamentale de la structure chimique du liquide lui-même et des substances étrangères qu'il peut contenir accidentellement ou que l'on ajoute volontairement, les problèmes d'interfaces liquide/solide (isolant ou conducteur), liquide/gaz ou liquide/liquide (eau, en particulier) sont posés en permanence, à la fois sur le plan théorique et sur le plan expérimental. Aussi doit-on, d'une part, étudier de manière approfondie les propriétés microscopiques des liquides (en particulier les processus électroniques) et, d'autre part, faire appel à des techniques modernes d'investigation très sophistiquées : purification extrême, spectroscopie d'émission et cinématographie ultrarapide à l'échelle des nanosecondes, claquage induit par éclair laser, etc.

Dans une large mesure, les efforts ont été concentrés sur quelques liquides simples, ainsi que sur l'huile minérale de transformateur. Aussi, depuis une dizaine d'années, des progrès significatif ont été accomplis ; la progression de nos connaissances serait sans doute plus rapide si l'on était capable, comme cela a été possible pour l'étude de la conduction ionique, de contrôler au moins certaines étapes conduisant au claquage.

En ce qui concerne les liquides utilisés dans la pratique industrielle, la diversité des applications conduit à employer des produits très différents et à faire intervenir des considérations très variées (aptitude aux transferts thermiques, tenue thermique, inflammabilité, prix, toxicité). Le bannissement des polychlorobiphényles a conduit à élaborer des liquides de substitution; en peu de temps, de nouveaux liquides d'imprégnation sont apparus et les recherches dans ce domaine ont abouti à améliorer les connaissances sur les phénomènes pré disruptifs liés à la génération et à la disparition de gaz dans les liquides.

De plus en plus, un soin extrême est apporté à la mise en œuvre des liquides (déshydratation, filtration, emploi de salles blanches, etc.) ; aussi, les dispersions sur les rigidités utiles (c'est-à-dire utilisées dans la pratique industrielle) se réduisent-elles progressivement.

La tension de claquage seule, pour une distance donnée, ne suffit pas à évaluer la tenue diélectrique d'un liquide : la rigidité n'est pas une caractéristique intrinsèque du matériau, mais cette notion dépend de circonstances qu'il faut préciser :

- ✓ les conditions de mise en œuvre du liquide (pureté chimique, matériaux avec lesquels il entre en contact, etc.) ;
- ✓ les conditions d'essais (forme de l'onde de tension, forme et écartement des électrodes).

Bien que les liquides diélectriques aient été employés comme imprégnant depuis la fin du siècle dernier, les recherches sur le claquage de ces matériaux, tant sur le plan fondamental que sur celui des applications, ont pendant longtemps été peu développées. Cela est dû, d'une part, au nombre très restreint de travaux sur le sujet(les domaines d'application des liquides étant bien plus limités que ceux des gaz), d'autre part, à la méconnaissance des mécanismes de base sur la conduction dans l'état liquide. Aussi, les connaissances sur le sujet demeurent-elles très fragmentaires, souvent contradictoire et largement empiriques jusqu'en 1950. Alors que, pour les gaz et les solides des théories bien vérifiées par l'expérience ont été établies.

Une approche plus systématique s'est développée par la suite, dans le souci :

- ✓ d'effectuer un contrôle strict visant à préciser le rôle d'agents étrangers aux liquides (particules, gaz dissous, etc.) qui affectent manifestement leur rigidité ;
- ✓ de faire porter les efforts sur des liquides de structure moléculaire simple ;
- ✓ de développer des techniques de mesures variées : visualisation ultrarapide des phénomènes, créneaux de tension de temps de montée ultracourts facilitant l'interprétation, mesures de courants transitoires, analyse spectroscopique.

Depuis une dizaine d'années, des progrès importants ont été accomplis sur la compréhension des mécanismes de conduction électronique dans les liquides, et l'étude du mécanisme de streamers est développée de façon systématique [18].

II.3. Mécanismes de claquage

On appelle claquage, la perte subite de la propriété isolante d'un diélectrique soumis à un champ électrique [9].

Les processus fondamentaux conduisant au claquage des isolants liquides sont encore mal connus. Ceci est lié en grande partie au fait que la connaissance des propriétés physiques de l'état liquide est encore moins bien développée que dans les gaz et les solides. Ainsi, de nombreux chercheurs ont tenté d'appliquer aux liquides les théories proposées pour les gaz et les solides [9].

Selon les mécanismes responsables des claquages, on peut les classer comme suite :

1- mécanisme électronique.

2- mécanisme avec phase gazeuse.

3- mécanisme par pont.

Les huiles de transformateur sont soumises à différentes contraintes en exploitation, plus particulièrement au vieillissement électrique et au vieillissement thermique en présence d'impuretés de différentes natures [17].

II.3.1. Mécanisme électronique

Il existe plusieurs théories dans le claquage électronique. Dans ces théories, on admet que le claquage est produit par des électrons présents dans le matériau dont l'origine est l'injection [9].

Il a été constaté dans le Xénon et l'Argon liquides, que le courant croit de manière exponentielle lorsque la tension appliquée augmente. Cela a été interprété comme le résultat d'un processus d'avalanche, la figure II.1 explique la formation et le chemin suivi par cette avalanche [17].

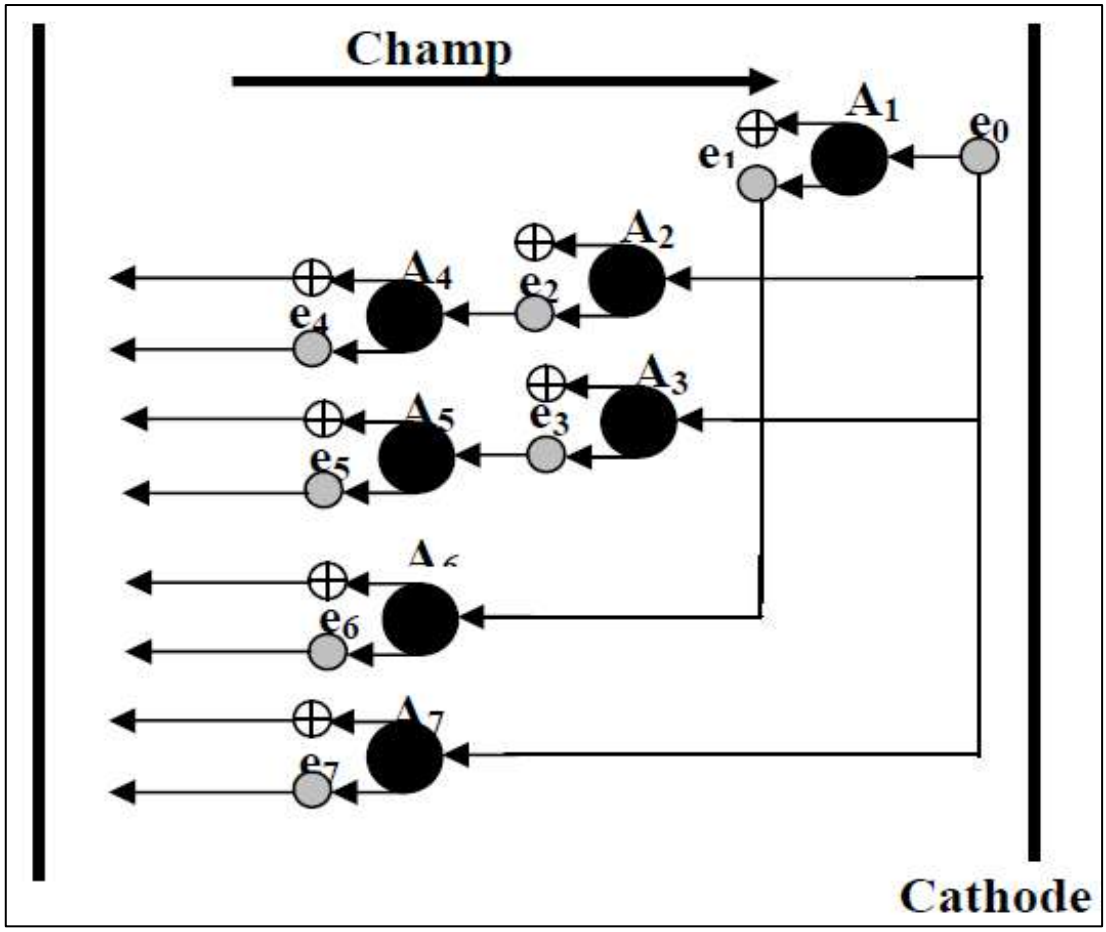


Figure II.1 : Représentation schématique du claquage par avalanche [9].

L'électron e_0 créé par ionisation grâce à des agents naturels tels que les rayonnements, accéléré par le champ E rentre en collision avec un atome A_1 et l'ionise. L'atome A_1 libère un électron et devient un ion positif. Les électrons e_0 et e_1 ionisent par collision les atomes A_2et A_3 qui libèrent des électrons e_2 et e_3. Les quatre électrons rentrent en collision avec 4 autres atomes et le phénomène d'avalanche électronique arrive à l'anode, d'où la réalisation d'un claquage.

II.3.1.1. D'après Von Hippel

La condition limite d'apparition d'une ionisation électronique des particules du liquide est donnée par:

$$e.E_c.\lambda = c.h.v \qquad \text{(II.1) [18].}$$

- ✓ E_c: intensité de champ ;
- ✓ λ: l.p.m d'un électron dans le liquide ;
- ✓ $h.v$: quantum d'énergie perdu par un électron dans les processus non ionisants ;
- ✓ c: constante liée aux conditions expérimentales ;

II.3.1.2. D'après Lewis

Dans les hydrocarbures liquides, l'électron fournit son énergie principalement dans les processus d'excitation, lors des vibrations des liaisons chimiques C-H. La rigidité diélectriqueE_c, peut être formulée par:

$$E_c = \frac{c.h.v_{C-H}}{e}.N.\sum(n_i\,.\,Q_i) \qquad \text{(II.2)[17].}$$

- ✓ h: constante de Planck ;
- ✓ v_{C-H}: fréquence de vibration des liaisons C-H ;
- ✓ N: nombre de particules par unité de volume
- ✓ n: nombre de groupes (CH, CH_2, CH_3) dont la section efficace correspond à la collision avec un électronQ_i ;

II.3.1.3. D'après Adamczewski

Les pertes d'énergie des électrons sont essentiellement liées aux processus d'excitation lors des vibrations des liaisons C-C.

La rigidité diélectrique est donnée par:

$$E_c = \frac{h.v_{C-C}}{e}.d.l.(n-1).N.\frac{\rho}{M}.A \qquad \text{(II.3) [17].}$$

- ✓ v_{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 ;

Les théories de Lewis et d'Adamczewski peuvent expliquer la variation expérimentale de la rigidité diélectrique impulsionnelle des hydrocarbures liquides très purs, en fonction de leurs propriétés physiques et chimiques. Il existe aussi d'autres théories électroniques de claquage des liquides et dont la formulation générale est très proche de la théorie de Townsend pour la disruption des gaz. Ces théories restent encore peu développées.

II.3.2. Mécanisme de claquage avec phase gazeuse

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

II.3.2.1. Mécanisme Thermique

Les pertes diélectriques de polarisation et de conduction provoquent un dégagement de chaleur dans les isolants. Tant que la quantité de chaleur ainsi produite est supérieure à celle que peut évacuer l'isolant, la température augmente. Avec l'augmentation de la température, la conductivité augmente entrainant un accroissement de la chaleur produite par effet joule. La chaleur dégagée par les pertes diélectriques de polarisation augmente également.

Le fait que la rigidité diélectrique décroisse quand la température augmente favorise l'apparition du claquage thermique. Parfois, celui-ci est précédé de la décomposition chimique ou de la fusion de l'isolant [9].

D'après Watson et Sharbaugh, une bulle de vapeur est générée dans le liquide par une injection de courant, à partir d'aspérités sur la cathode. Ce courant serait limité par la charge d'espace et a la forme suivante:

$$I = A.V^n \qquad \text{(II.4) [17].}$$

$$A = Cste \text{ et } 1{,}5 < n < 2.$$

Pour une tension V de durée t, l'énergie nécessaire à l'ébullition locale serait:

$$H = A.E^n.t \qquad \text{(II.5) [17].}$$

(E supposé proportionnel à la tension U).

En considérant l'énergie nécessaire à l'ébullition d'un volume de liquide donné:

$$H = C_p.(T_b - T_a) + L_v \qquad \text{(II.6) [17].}$$

- ✓ C_p: Chaleur spécifique moyenne ;
- ✓ T_b: Température d'ébullition ;
- ✓ T_a: Température ambiante ;
- ✓ L_v: Chaleur latente de vaporisation ;

Watson et Sharbaugh ont établi un critère de claquage vérifié dans les n-alcanes, en identifiant les deux énergies ci-dessus. Le modèle de ces deux auteurs utilise 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 [17].

II.3.2.2. Mécanisme de cavitation

Si un liquide est chauffé à pression constante (ébullition), ou s'il est soumis à une dépression à température constante (cavitation), il apparaît des bulles ou cavités de vapeur ou de mélange de vapeur et de gaz. La cavitation désigne toute la séquence de formation, d'expansion et de disparition de la cavité. Elle peut se produire dans le liquide ou sur les parois.

a. D'après Krasucki

Les bulles se forment en des points où le champ est élevé (particules solides de très petites dimensions dans le liquide ou attachées aux électrodes). Pour qu'il y ait formation d'une cavité, le critère de pression nulle est:

$$P_{em} = P_h + P_s \qquad \text{(II.7) [17].}$$

- ✓ P_{em}: pression électromécanique (champ E) ;
- ✓ P_h: pression hydrostatique ;
- ✓ P_s: pression due à la tension superficielle du liquide ;

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

Partant de ces hypothèses, Krasucki et Thomas, ont établi des critères de claquage.

b. Ecoulements Electrohydodynamiques EHD

L'apparition d'une phase gazeuse pourrait résulter d'une cavitation due à des écoulements EHD induits par l'injection unipolaire de charges dans le liquide. Dans ce cas, la variation de pression serait, en vertu du théorème de Bernoulli, proportionnelle au carré de la vitesse EHD du liquide:

$$\Delta_p = \frac{1}{2}.\rho v_{EHD}^2 \qquad \text{(II.8) [17].}$$

(ρ: Masse volumique du liquide).

II.3.3. Mécanisme de claquage par pont

Dans les isolants liquides utilisés en technique, peuvent apparaître, en suspension, des impuretés de différentes natures (bulles de gaz, gouttelettes d'eau, particules solides isolantes ou conductrices). La présence d'impuretés conduit au renforcement local du champ électrique.

La déformation du champ dépend de plusieurs paramètres comme:

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

Le champ local E_{local} est généralement déterminé en attribuant aux impuretés des géométries simples (sphères, ellipsoïde).

L'élévation du champ peut conduire à des claquages partiels dans le liquide, dans le cas des impuretés solides conductrices. Dans le cas des impuretés solides isolantes, celles-ci se polarisent dans le champ électrique et tendent à se déplacer vers les zones où le champ est le plus intense ($\varepsilon_{\text{impuretés solides}} > \varepsilon_{\text{liquide}}$).

Si on considère des particules sphériques polarisées, de permittivité ε_P, la force agissant sur une particule serait:

$$F = \frac{1}{2} r^3 . \frac{\varepsilon_P - \varepsilon_L}{\varepsilon_P + 2.\varepsilon_L} . \Delta E^2 \approx \frac{1}{2} . r^3 . \Delta E^2 \qquad \text{(II.9) [17].}$$

- ✓ ε_P: permittivité de la particule ;
- ✓ ε_L: permittivité du liquide ;
- ✓ E: champ électrique ;
- ✓ r: rayon de la particule ;

Pour qu'un pont de particules se forme entre les électrodes, il faut que le temps d'application de la tension soit relativement long. Ce pont nécessite en effet une grande concentration d'impuretés au voisinage des électrodes. Quand ce pont relie les électrodes, il s'établit un fort courant circulant à travers ce pont, qui est plus conducteur que le liquide. On aura ainsi, un échauffement local important, pouvant engendrer le claquage. Le claquage peut aussi avoir lieu durant la formation du pont (champ élevé en tête de pont).

Parmi les théories de claquage par pont, la plus connue est celle de Kok. Le critère établi par Kok, définit une valeur moyenne du champ électrique, au-dessus de laquelle la vitesse des particules se dirigeant vers le domaine de champ maximum devient supérieure à celle des particules repoussées vers l'extérieur (ce qui augmente la concentration des particules). Cette valeur limite du champ définit selon Kok, la rigidité diélectrique du liquide pendant le claquage par pont:

$$E_c = \frac{1}{2} . \sqrt{\frac{k.T}{r^3}} \qquad \text{(II.10) [17].}$$

- ✓ k: constante de Boltzmann ;
- ✓ T: température du liquide ;
- ✓ r: rayon des particules impures ;

II.4. Influence de différents paramètres sur le claquage

Il existe plusieurs facteurs qui influent directement sur le claquage des diélectriques liquide. Parmi ces facteurs : l'humidité, les impuretés, les gaz dissous dans le liquide, la pression hydrostatique, la configuration des électrodes, la température, la durée d'application de la tension et l'état antérieur du liquide [17].

II.4.1. Humidité

La présence d'humidité dans le liquide diminue considérablement la rigidité diélectrique de ce dernier. La figure ci-dessous illustre bien cet effet sur la rigidité diélectrique à 50Hz de l'huile de transformateur [17].

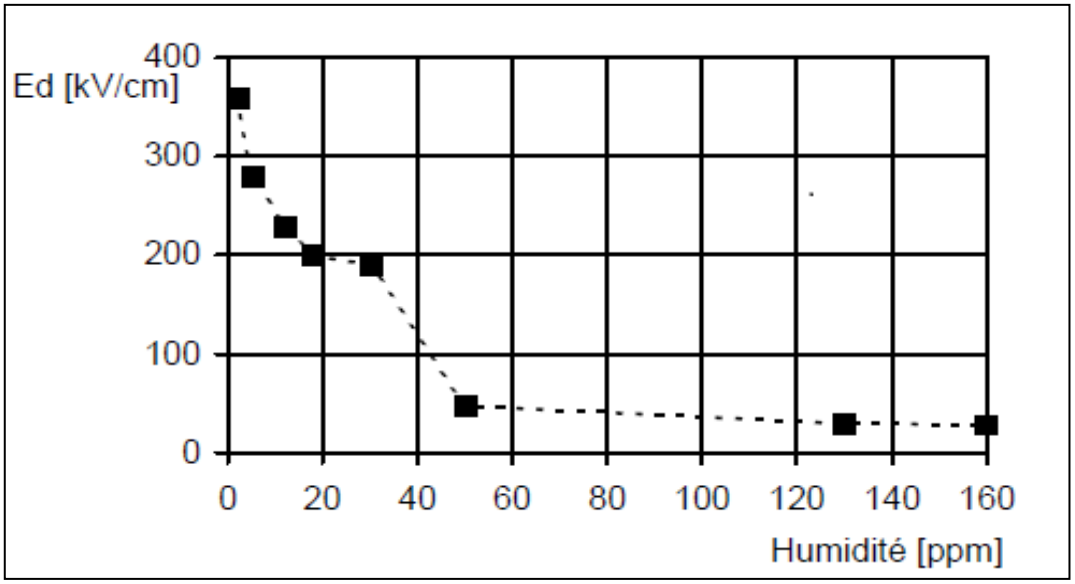


Figure II.2 : Influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'huile de transformateur [17].

II.4.2. Pression hydrostatique

L'augmentation de la pression hydrostatique améliore la rigidité diélectrique du liquide [17]. Des auteurs ont mis en évidence l'augmentation de la rigidité diélectrique et de la tension de claquage avec un accroissement de la pression [7].

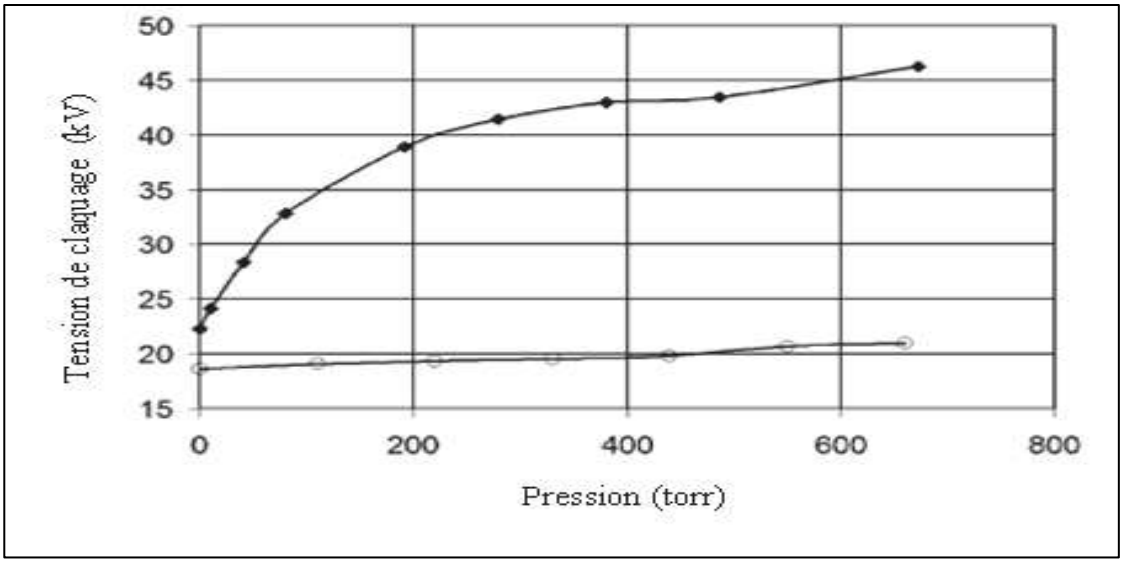


Figure II.3 : Variation de la tension de claquage avec la pression [7].

II.4.3. Distance entre les électrodes et géométrie des électrodes

En augmentant la distance entre les électrodes, la tension de claquage augmente mais la rigidité diélectrique du liquide diminue.

Plusieurs cellules ont été élaborées pour des études fondamentales réalisées sous tension alternative à 50Hz, présentant plusieurs similarités de conception et de mise en œuvre. Au début, des réalisations simples sont faites pour des mesures de tension de claquage ; la distance entre les électrodes est fixe (quelques millimètres à quelques centimètres), les essais se font à température ambiante et sous pression atmosphérique, et les profils d'électrodes et leur écartement sont fixés par les normes (figure II.4). Ces configurations d'électrodes créent un champ uniforme et quasi uniforme [7].

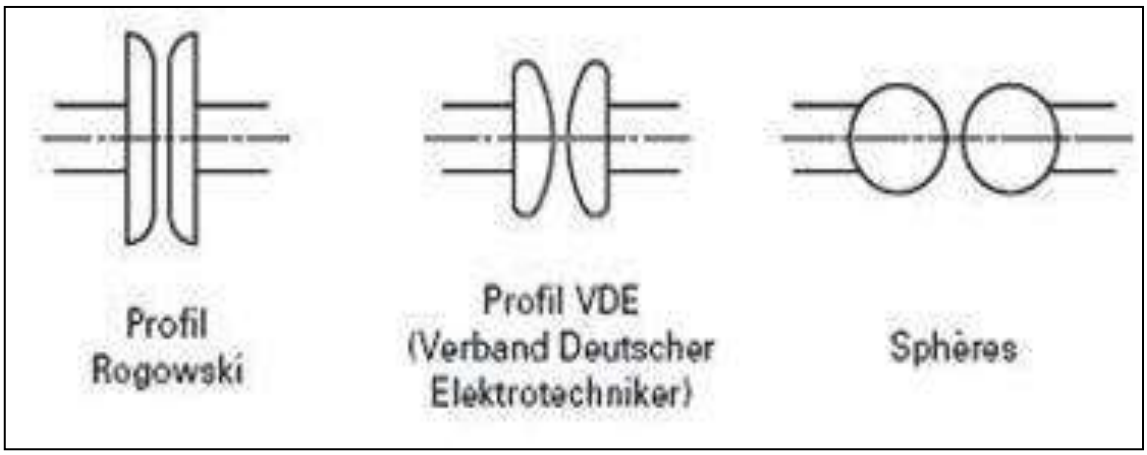


Figure II.4 : Configurations d'électrodes utilisées pour l'étude du claquage en champs uniforme et quasi-uniforme [7].

D'autres réalisations plus complexes permettent la mesure simultanée de diverses grandeurs (courant, émission lumineuse) et de faire varier plusieurs paramètres (distance entre-électrodes, pression appliquée au liquide, température, rayon de courbure des électrodes) (Figure II.5) [7].

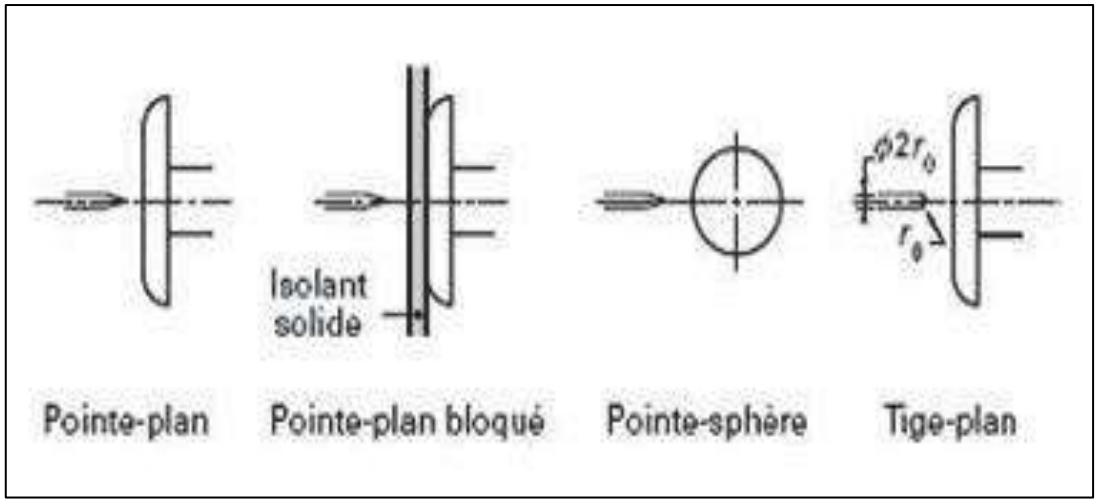


Figure II.5 : Configurations d'électrodes utilisées pour l'étude du claquage en champs divergent ou très divergent [18].

Les résultats obtenus suite à une étude réalisée par R. Musil et al, et qui sont présentés sur le tableau II.1, montre que la tension de claquage est très influencée par la géométrie des électrodes [7].

Table II.1 : Influence de la géométrie des électrodes sur la tension de claquage en champ uniforme sur une huile minérale [7].

Géométrie des électrodes	Profil VDE (rayon = 25 mm)	Sphériques (rayon =6,25 mm)	Profil Rogowsky (rayon =25,4 mm)
UC en kV (Moyenne de 15 mesures)	82,3	66,3	48,0

Il à été observée par beaucoup de chercheur que la tension de claquage augmente avec l'augmentation de la distance entre les électrodes.

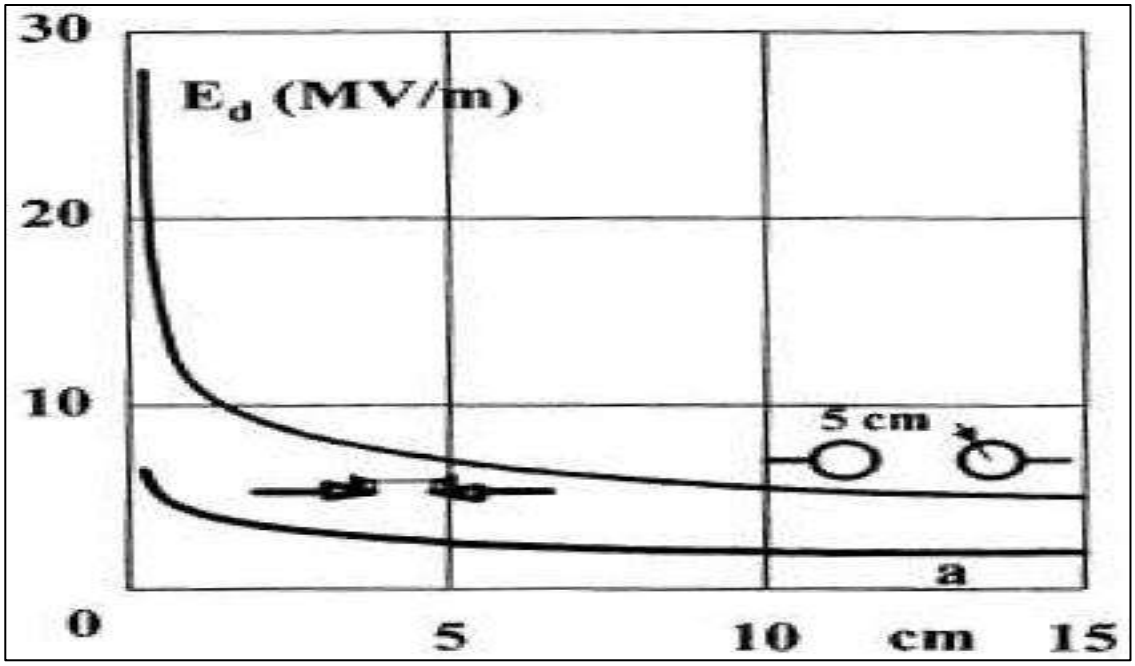


Figure II.6 : Variation de la tension de claquage de l'huile transformateur en fonction de l'intervalle inter électrode pour un système pointe – pointe et un système Sphère – sphère [19].

II.4.4. Température

L'influence de la température est double. En augmentant la température, la concentration de gaz et de l'humidité diminue dans le liquide. 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 [17].

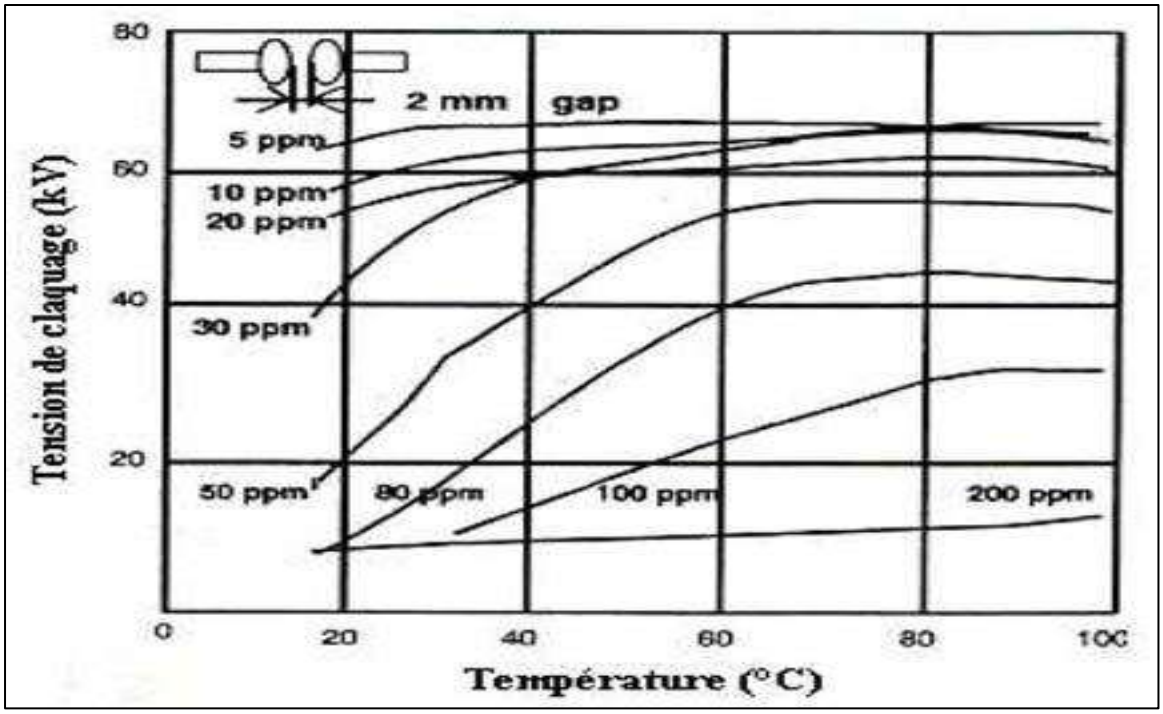


Figure II.7 : Evolution de la tension de claquage (kV) avec les variations de la teneur en eau et en fonction de la température pour une même huile minérale [7].

La tension de claquage de l'huile, sèche et bien filtrée, ne dépend pas généralement de la température dans l'intervalle allant de 0 °C – 80 °C environ. Dans une huile pure mais humide, la dépendance de la tension de claquage dans l'intervalle 0 °C – 80 °C s'explique par la température permettant à l'eau, sous forme d'émulsions, de passer sous forme dissoute.

Lorsque la température est > 80 °C, la diminution de la tension de claquage est liée à la vaporisation de l'eau et à la formation de bulles de gaz. L'augmentation de la tension de claquage à température < 0 °C est liée à la viscosité de l'huile et au mouvement des particules de glace et des impuretés qui devient plus difficile en présence d'un champ électrique.

II.4.5. Durée d'application de la tension

Si la durée d'application de la tension diminue, la tension de claquage augmente. La figure ci-dessous présente la caractéristique $U_c(t)$, tension de claquage en fonction du temps, de l'huile de transformateur. Plus la durée d'application augmente, plus l'effet des différentes impuretés se fait ressentir et la tension de claquage diminue. Pour les temps inférieurs à 10µs, le claquage à un caractère électrique et pour les longues durées, il a un caractère thermoélectrique [17].

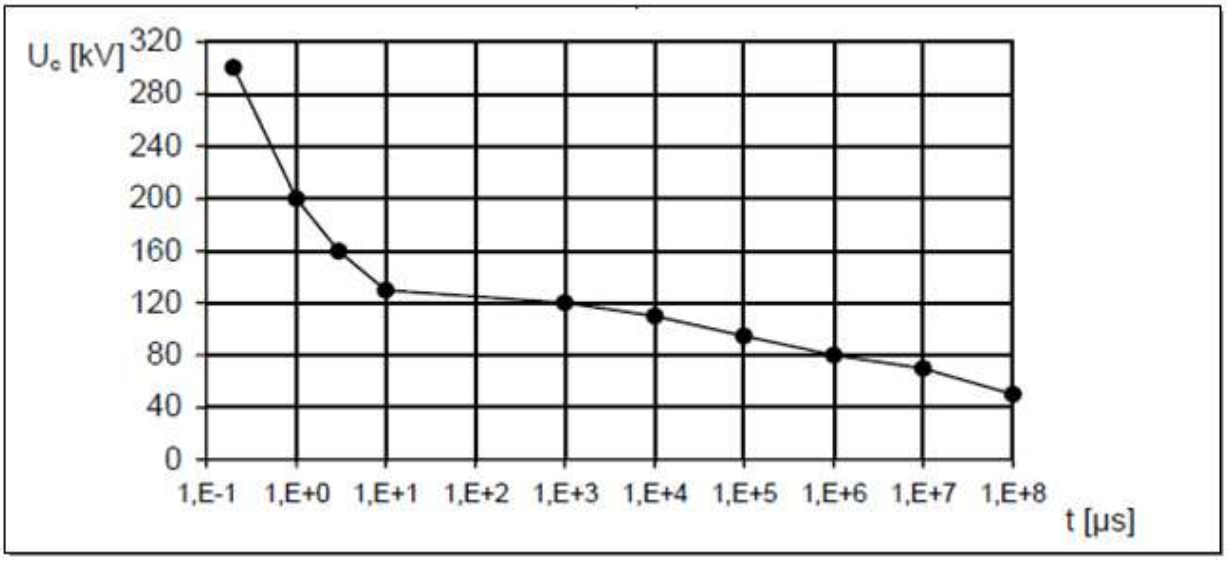


Figure II.8 : La caractéristique $U_c(t)$, tension de claquage en fonction du temps, de l'huile de transformateur [17].

II.4.6. Nombre de claquages

Il a été observé par plusieurs chercheurs, que la tension de claquage de l'huile, dans un système de configuration donnée, 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 [17].

II.4.7. Influence des écrans

Pour améliorer la rigidité diélectrique d'un système d'isolation, soit qu'on recouvre les électrodes avec une couche mince isolante, soit qu'on introduit une barrière isolante entre les électrodes. Il existe une position optimale de la barrière dans l'intervalle, pour laquelle la rigidité du système est la plus élevée. Dans le cas du système pointe-plan, l'augmentation est observée dans les cas de la pointe sous haute tension de polarité positive ou alternative 50Hz, lorsque la barrière est située à proximité de la pointe [20].

En champ divergent, la présence de barrières au voisinage immédiat de l'électrode acérée permet d'améliorer de façon significative la tension de claquage de la structure. De même, le recouvrement des électrodes (Figure II.9) par une couche isolante ou un dépôt isolant permet de relever la tension de claquage [21, 22, 19].

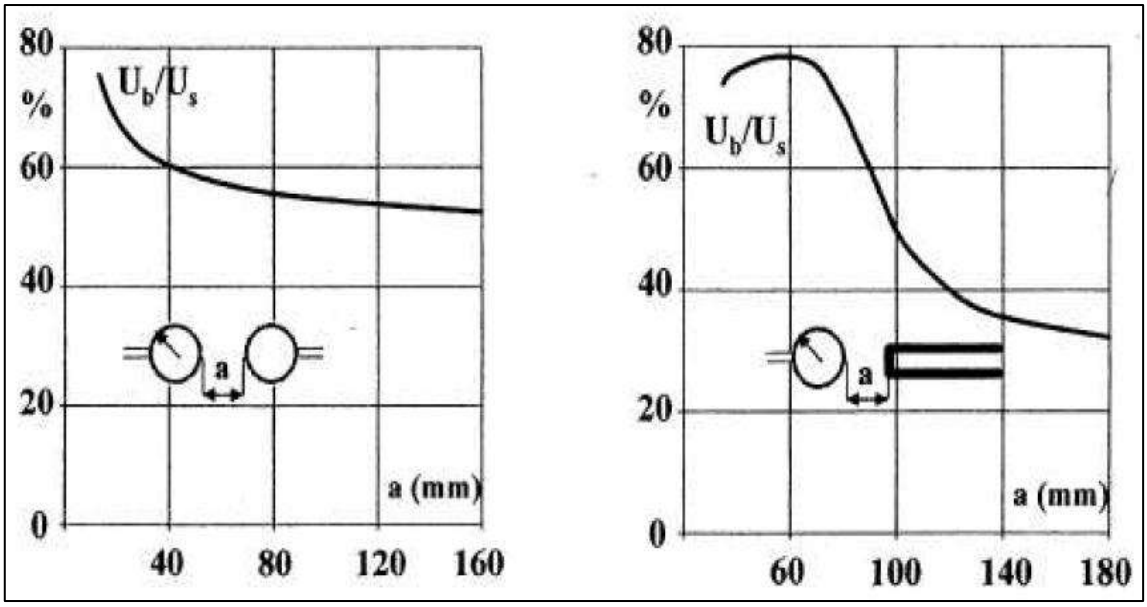


Figure II.9: Influence du recouvrement des électrodes sur la tension de claquage de l'huile dans une géométrie : (a) sphère – sphère et (b) tige – sphère [19].

II.5.Conclusion

Il ressort de cette analyse bibliographique, que les mécanismes de claquage dans les diélectriques liquides sont complexes. Ils dépendent de plusieurs paramètres : la géométrie des électrodes (intervalle inter électrodes et rayon de courbure), la tension appliquée (forme, polarité, amplitude), structure du liquide (présence ou non d'halogènes dans la structure moléculaire), présence ou non d'additifs spécifiques, la pression et la température. À ces paramètres, il faut ajouter les paramètres extérieurs comme l'humidité et la présence d'impuretés conductrices ou non conductrices particules déformables : bulles de gaz, eau en suspension ; ou des particules non déformables : solides [19].

Le claquage des liquides peut être expliqué par des mécanismes tels que le mécanisme électronique, le mécanisme avec phase gazeux et le mécanisme par pont.

CHAPITRE III

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

III.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les essais effectués sur l'huile de transformateur. Dans le but de déterminer, la modélisation du claquage de l'huile, et l'influence des différents paramètres sur le claquage.

III.2. Cellule de test

La cellule de test utilisée est une cellule fabriquée d'un isolant solide qui est le polycarbonate, et qui contient deux électrodes sphériques d'un diamètre de 25,38 mm chacune la capacité de la cellule est de 500 ml d'huile, mais la quantité d'huile utilisée à l'essai est de telle sorte que les électrodes sont complètement submergées à l'huile. La distance inter-électrodes est variée entre 1mm et 5mm, avec l'utilisation de nouveaux échantillons d'huile après chaque claquage [23].

La méthode de nettoyage de la cellule et de l'échenillage de l'huile est faite selon la norme CEI 60156[10].

La cellule de test est remplie d'huile neuve à chaque test. Ce remplissage est réalisé jusqu'à ce que les électrodes soient complètement submergées dans l'huile (Figure III.1).



Figure III.1. Cellule de test remplie d'huile neuve [7].

III.3. Test expérimental

III.3.1. Tests sous tension alternative

Un dispositif Hipotronics AC Diélectrique Test Set a été utilisé comme source d'essai ayant une tension nominal de 75 kV*eff*. Il contient un contrôleur PLC permettant un contrôle manuel et automatique de la tension. La borne HT est connectée à une des électrodes sphérique, et l'autre électrode est mise à la terre [23].

L'augmentation de la tension se fait automatiquement à trois vitesses différentes ; 0,5kV/s, 2kV/s et 3,5kV/s, et cela pour chaque distance inter-électrodes.

En plus du diviseur de tension interne au dispositif d'essai Hipotronics, la variation instantanée de la tension est mesurée grâce à un diviseur capacitif d'un rapport de division égale à 40600. La tension de claquage est la moyenne arithmétique de six mesures, avec un temps de repos de 2mn entre deux claquages successifs. Le courant de claquage est mesuré à travers un transformateur de courant d'une sensibilité de 0,1 V/A, et ce, en utilisant un oscilloscope électronique Lecroy 100 MHz, 1 GS/s. Les variations du courant et de la tension au moment du claquage sont enregistrées sur mémoire incorporée dans l'oscilloscope (Figure III.2) [24].

Le transformateur est équipé d'un système de protection qui utilise un temps de retard de 40 ms après chaque événement de claquage, dans le but d'éliminer le défaut dû à ce claquage. La tension de claquage ainsi que le courant de claquage sont estimés durant cette période entre l'évènement du claquage et l'instant d'élimination.

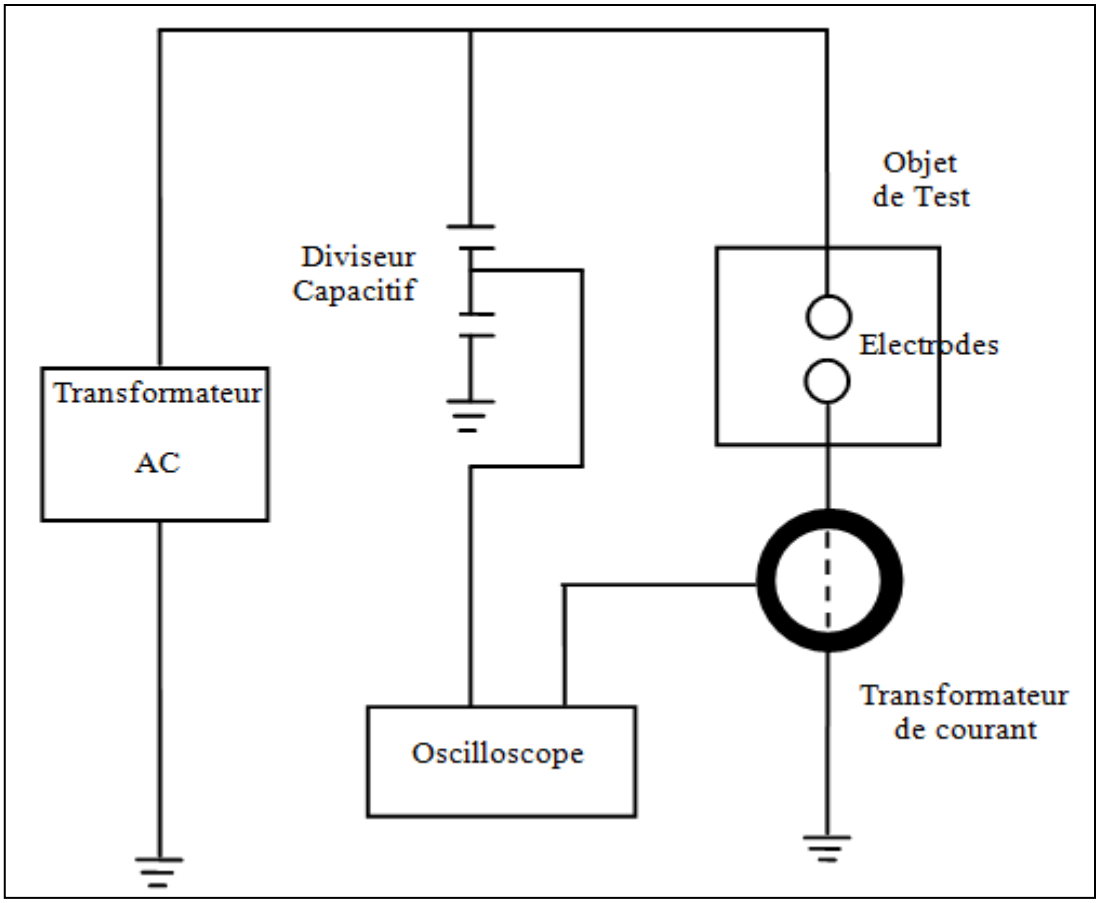


Figure III.2 : Schéma simplifié du circuit d'essai de claquage AC [24].

III.3.2. Tests sous tension impulsionnelle

III.3.2.1. L'onde de choc

La tension de choc (ou impulsion) est une très haute tension unidirectionnelle, appliquée pendant un temps très bref de l'ordre de quelques µs. C'est un courant ou une tension qui croit rapidement jusqu'à une valeur crête, puis décroit jusqu'à zéro.

Les générateurs de choc sont nécessaires pour : [20]

- ✓ Simuler les surtensions des lignes comme l'onde de la foudre par exemple, pour l'étude et la recherche.
- ✓ réaliser des tests d'essais sur les appareillages haute tension destines à fonctionner lors des surtensions, tels que les appareils de protection contre les surtensions.

L'impact d'un coup de foudre sur un réseau électrique génère une onde de tension sur la ligne qui crée dans l'enroulement des transformateurs une distribution inégale du potentiel et provoque la détérioration de l'isolement.

Tous les générateurs de choc sont identifiés par les deux constantes de temps t_1 et t_2:

$$t_1 = 1.67(T_{90} - T_{10}) \; et \; t_2 = T_{50} \qquad \text{(III.1) [20].}$$

L'onde de choc standard normalisée pour l'étude de :

- ✓ la foudre est l'onde 1,2/50µs

$$(t_1 = 1.2\mu s \; et \; t_2 = 50\mu s).$$

- ✓ la surtension de manœuvre : l'onde 250/2500µs

$$(t_1 = 250\mu s \; et \; t_2 = 2500\mu s).$$

Le temps T_{cr} de montée a la valeur crête n'est pas utilise, car sur l'oscillogramme la crête est souvent plate et on distingue mal le maximum. Le temps de montée à la valeur crête T_{cr} est appelé temps de front, et le temps de diminution T_{50} est appelé temps de queue [20].

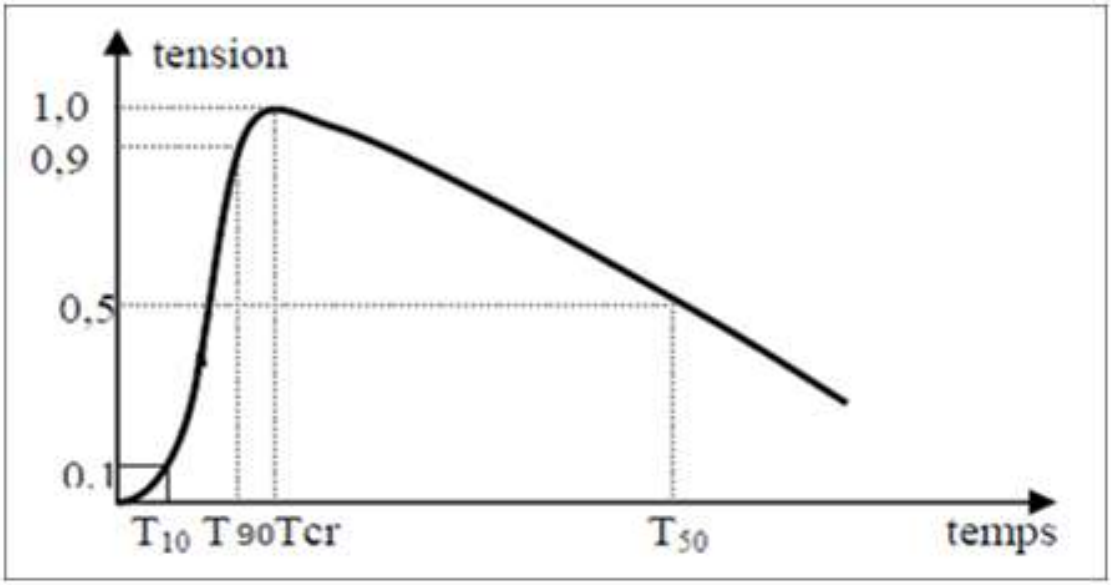


Figure III.3 : Onde de choc conventionnelle [20].

III.3.2.2. Installation expérimentale

Un générateur de choc (de Marx) donnant différents tensions impulsionnelles a été utilisé, la tension de claquage est mesurée a travers un diviseur capacitif d'un rapport de 27931 :1. Et le courant de claquage est mesuré à travers un transformateur de courant d'une sensibilité 0.1V/A, et capturé simultanément avec la tension en utilisant un oscilloscope digital de marque Lecroy 1GS/s.

Des série de test ont été conduites avec une résistance non inductrice de 50Ω,

connectée en série à la cellule de test pour trois distance inter-électrodes ; 1 mm, 2.5 mm et 5 mm. La méthode d'essai est réglée selon le CEI 60060-1 [25].

Autre série de test a été conduite avec la distance d'inter-électrodes de 1mm ; premièrement, sans utilisation de résistance non inductive, et deuxièment avec la mise en série de différentes résistances non inductive ; 50Ω, 4.8 k Ω et 9.6 k Ω connectées en série à la cellule de test [23].

Un diagramme simplifié montrant l'installation expérimentale est montré sur la figure III.4.

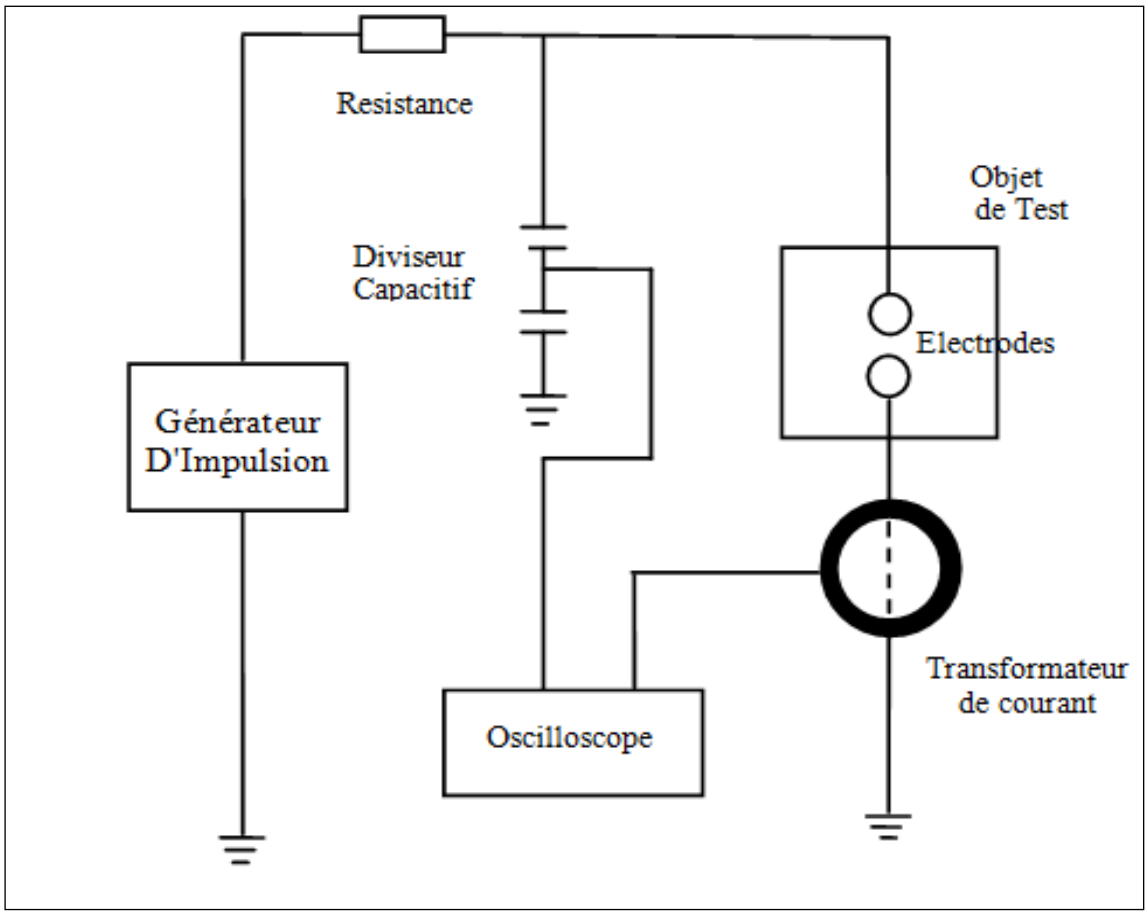


Figure III.4 : Schéma simplifié du circuit d'essai de claquage impulsionnelle [23].

CHAPITRE IV

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux de la caractérisation dynamique de l'huile lors d'un claquage en courant alternatif et impulsionnelle.

Nous avons d'abord analysé les variations du courant, de la tension et l'impédance au moment du claquage pour une huile isolantes soumise à une tension alternative, et cela pour différentes distance inter-électrodes de 1mm, 2,5mm et 5mm avec différentes vitesses d'augmentation de la tension 0,5 kV/s, 2 kV/s et 3,5 kV/s.

On second lieu, nous avons caractérisé le comportement dynamique de l'huile soumise à une tension impulsionnelle, pour cela les variations du courant, de la tension et de l'impédance sont déterminer avec différents distances inter-électrodes 1mm, 2,5mm et 5mm, et avec différents résistance ces mise en série avec la cellule de test.

PARTIE I. TENSION ALTERNATIVE :

IV.2. Variation de la tension de claquage en fonction de la vitesse d'augmentation de la tension à différentes distances inter-électrodes

Les figures IV.1, IV.2, illustrent les variations de la tension de claquage et de la rigidité diélectrique de l'huile pour les distances inter-électrodes de 1mm, 2,5mm et 5mm à différentes vitesse d'augmentation de la tension 0,5 kV/s, 2 kV/s et 3,5 kV/s.

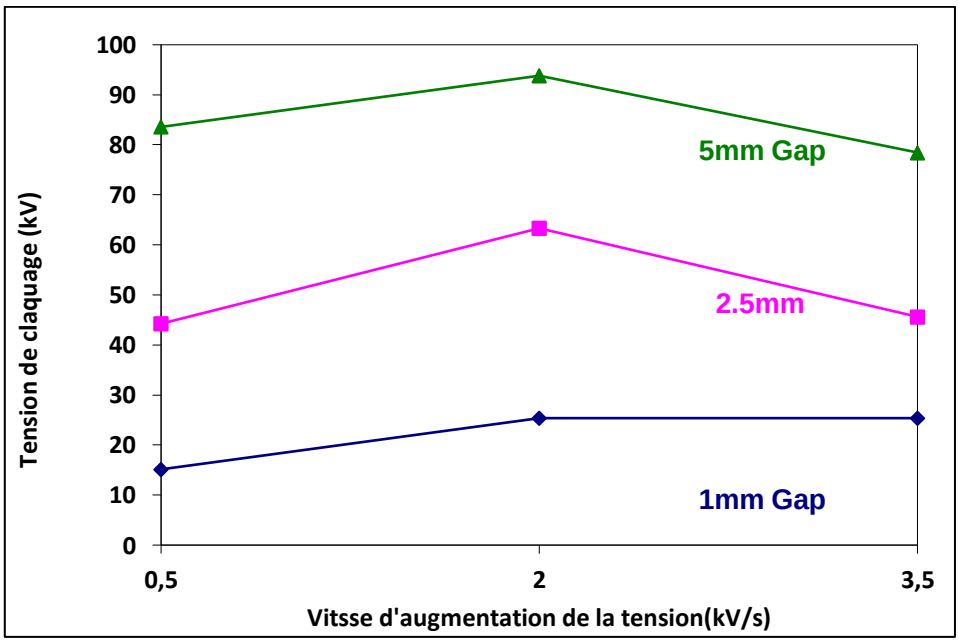


Figure IV.1 : Variation de la tension de claquage en fonction de la vitesse d'augmentation de la tension.

IV.3. La rigidité diélectrique Système sphérique- sphérique

La rigidité diélectrique est calculée selon l'équation suivante :

$$E_{max} = \beta \frac{U}{a} \qquad \text{(IV.1) [26].}$$

- $\beta = f(\frac{a}{r})$.

Tableau IV.1 : valeurs de β symétrique ou non-symétrique au Système sphérique-sphérique [26].

a/r	0	0.2	0.5	1
β_{sym}	1	1.07	1.17	1.36
β_{n-sym}	1	1.07	1.2	1.56

- ✓ E_{max} : La rigidité diélectrique ;
- ✓ β : Facteur géométrique ;
- ✓ U : Tension de claquage ;
- ✓ a : Distance entre les électrodes ;
- ✓ r : Rayon de sphère ;

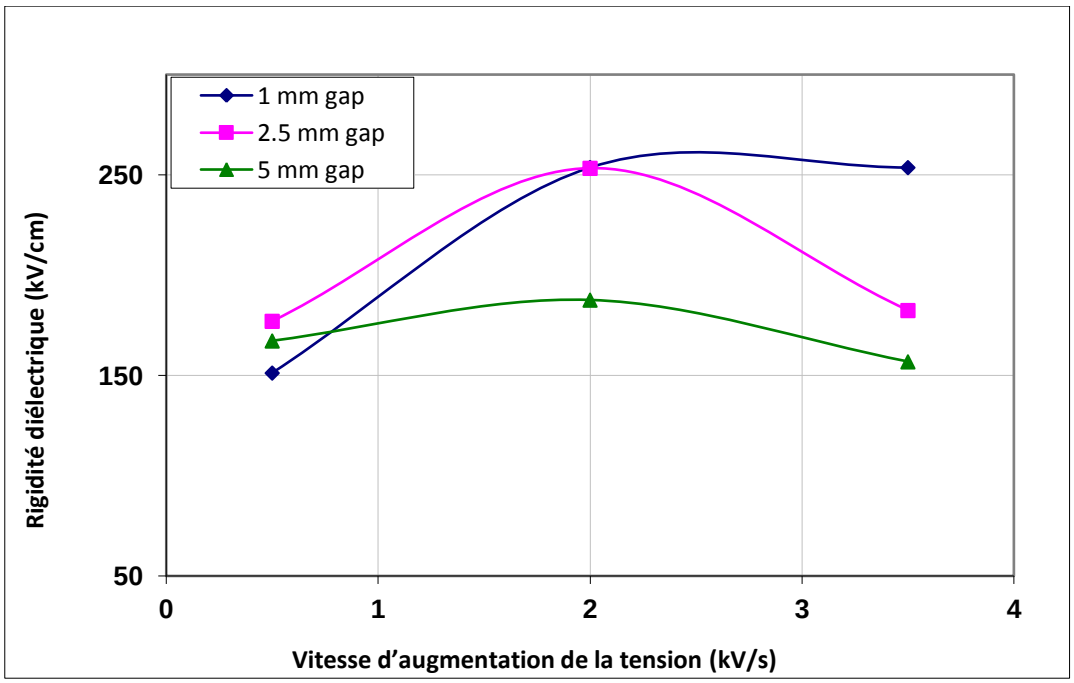


Figure IV.2 : Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la vitesse d'augmentation de la tension.

Nous remarquons dans la figure IV.1 que la tension de claquage augmente avec l'augmentation de la distance inter-électrodes ; elle passe par exemple pour une vitesse d'augmentation de la tension de 2 kV/s de 25.37 kV pour 1mm à 63,33 kV pour 2,5mm, et atteint 93,8 kV pour la distance inter-électrode de 5mm. Ceci est dû essentiellement à la diminution du champ électrique appliqué entre les électrodes dans le cas où la distance est grande, tandis que si la distance est petite, le champ électrique atteint des valeurs importantes.

Par ailleurs, la tension de claquage subit un petit changement avec l'évolution de la vitesse d'augmentation de la tension, ceci est dû essentiellement à une légère variation de la mobilité des porteurs de charge suite à ce changement de la vitesse.

Les résultats obtenus de la tension de claquage sont en accord avec ceux rapportés avec d'autres auteurs [2, 27 ,28].

En ce qui concerne la rigidité diélectrique, nous constatons que pour les distances inter-électrodes de 2,5mm et 5mm à des vitesses d'augmentation de la tension de 0,5 kV/s et 3,5 kV/s, la rigidité diélectrique est inférieure à celle correspondante à la vitesse de 2kV/s. Cette dernière vitesse correspond à celle recommandée par la norme CEI 60156 [10] pour l'essai de claquage des huiles de transformateur.

En se référant à la littérature, la variation de la rigidité est due au renforcement d'un champ électrique élevé entre les électrodes lorsque la distance inter-électrodes est très petite 1mm [27, 29]. Cette variation est due aussi à la présence d'ions qui se créent dans l'huile sous l'effet du champ électrique. Tout en restant du domaine de l'investigation, la présence d'ions pourrait expliquer l'augmentation de la rigidité à 2,5mm. Pour 5mm de distance inter-électrodes, la tension de claquage est plus grande que pour 2,5mm, mais la rigidité diélectrique est moins grande.

Il est très clair des résultats obtenus de la tension de claquage et de la rigidité diélectrique, que l'effet de la variation de la vitesse d'augmentation de la tension est moins important que celui de la distance inter-électrodes. Le champ électrique est influencé par la distance inter-électrodes, plus que la vitesse d'augmentation de la tension.

IV.4. Variation de la tension et du courant de claquage en fonction du temps

IV.4.1. Distance inter-électrodes de 1mm

Les figures IV.3.(a ,b, et c) présentent respectivement les variations des signaux de tension et de courant immédiatement après le claquage pour la distance inter-électrodes de 1mm et les trois vitesses d'augmentation de la tension 0,5 kV/s, 2 kV/s et 3,5 kV/s.

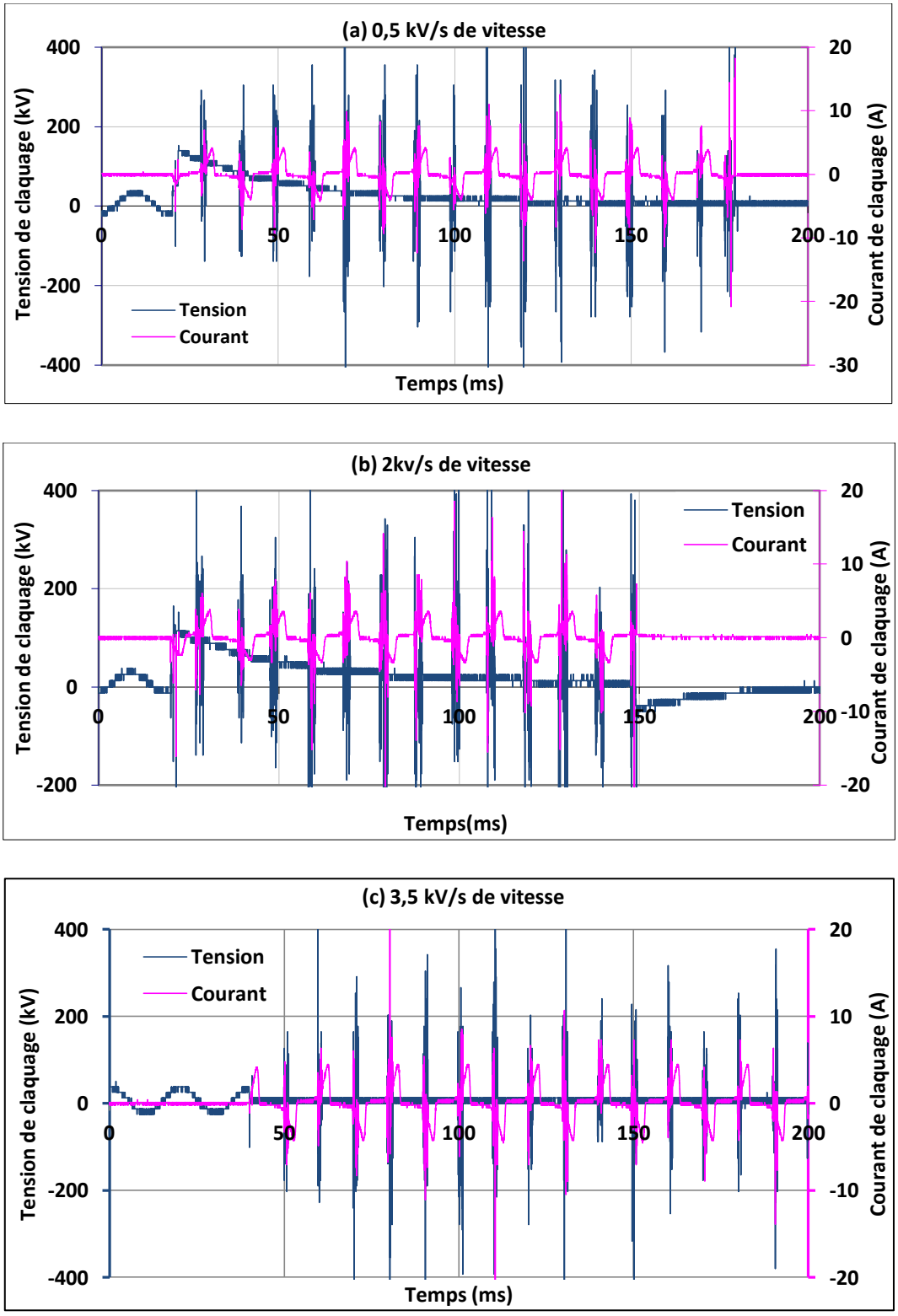


Figure IV.3 : Variation de la tension et du courant à l'instant du claquage en fonction du temps pour la distance inter-électrodes de 1mm.

Le claquage de l'huile est caractérisé par une augmentation rapide du courant, suivi par une série d'oscillations de grandes amplitudes, avec des variations rapides de la tension. Pour les trois figures, on remarque que la forme des signaux de courant et de tension est similaire en subissant une série d'oscillation ; augmentations et diminutions.

Nous remarquons que la période de claquage pour la vitesse d'augmentation de tension la plus grande correspondante à 3,5 kV/s est de 150 ms. Cette période est inférieure à celles enregistrées pour les autres vitesses de 0,5 kV/s et 2 kV/s. On voie aussi que l'amplitude maximale de la tension de claquage pour la vitesse de 3,5 kV/s est inférieure à celles mesurées pour les vitesses de 0,5 kV/s et 2 kV/s. Ceci est dû essentiellement à l'augmentation de l'émission des ions entre les électrodes lorsque la vitesse d'augmentation de la tension est la plus grande, ce qui mène à une formation rapide de l'avalanche, et par conséquent, l'initiation du claquage [18, 30, 31].

IV.4.2. Distance inter-électrodes de 2,5mm

Les variations des courants et des tensions à l'instant du claquage pour la distance inter-électrodes de 2,5mm et les vitesses d'augmentation de la tension de 0,5 kV/s, 2 kV/s et 3,5 kV/s sont illustrées aux figures IV.4 (a, b et c) respectivement.

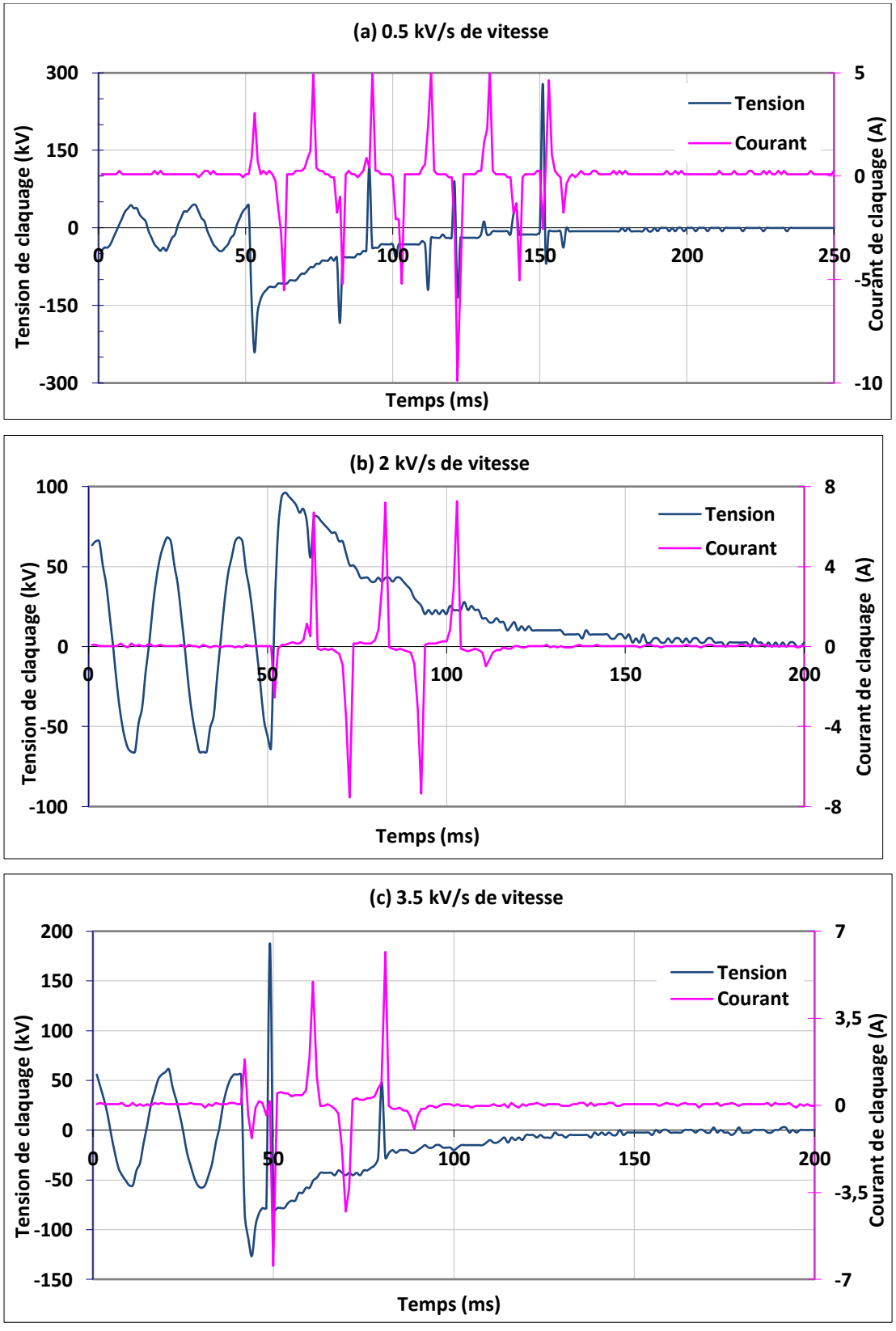


Figure IV .4 : Variation de la tension et du courant à l'instant du claquage en fonction du temps pour la distance inter-électrodes de 2,5mm.

Les signaux des courants et des tensions pour la distance de 2,5mm sont similaires à ceux observés pour la distance de 1mm. On remarque toujours une série d'oscillations ; augmentation et diminution du courant au moment du claquage, avec des variations brusques de la tension de claquage.

Toutefois, le claquage se développe à un temps court lorsque la vitesse d'augmentation de la tension est la plus supérieure ; sa valeur passe de 110 ms pour la vitesse de 0,5 kV/s à 70 ms pour la vitesse de 2 kV/s, pour enfin atteindre un temps de 50 ms pour la vitesse de 3,5 kV/s.

La vitesse d'augmentation de la tension a une grande influence sur la période du claquage. Ceci est dû particulièrement à l'augmentation de la mobilité des charges qui a pour effet l'apparition des petits courants de conduction, et finalement un claquage qui se réalise à un temps relativement inférieur [18,32].

Nous remarquons aussi pour cette distance que le nombre d'oscillations du signal de courant diminue avec l'augmentation de la vitesse de tension, ceci est lié directement à la période de claquage qui diminue lorsque la vitesse de tension augmente sous l'effet des courants de conduction des charges d'espaces.

Le temps de la période de claquage pour la distance inter-électrodes de 2,5mm est inférieur à celui pris par le claquage pour la distance de 1mm. Cela est dû à l'effet du champ électrique qui a une valeur supérieure pour la distance inter-électrodes la plus petite de 1mm, ce qui engendre plus de temps pour que le système de protection du transformateur fonctionne pour protéger le matériel [29].

IV.4.3. Distance inter-électrodes de 5mm

Les résultats obtenus pour les courants et les tensions à l'instant du claquage pour la distance inter-électrodes de 5mm à différentes vitesses d'augmentation de la tension de 0,5 kV/s, 2 kV/s et 3,5 kV/s sont donnés respectivement par les figures IV.5 (a, b et c).

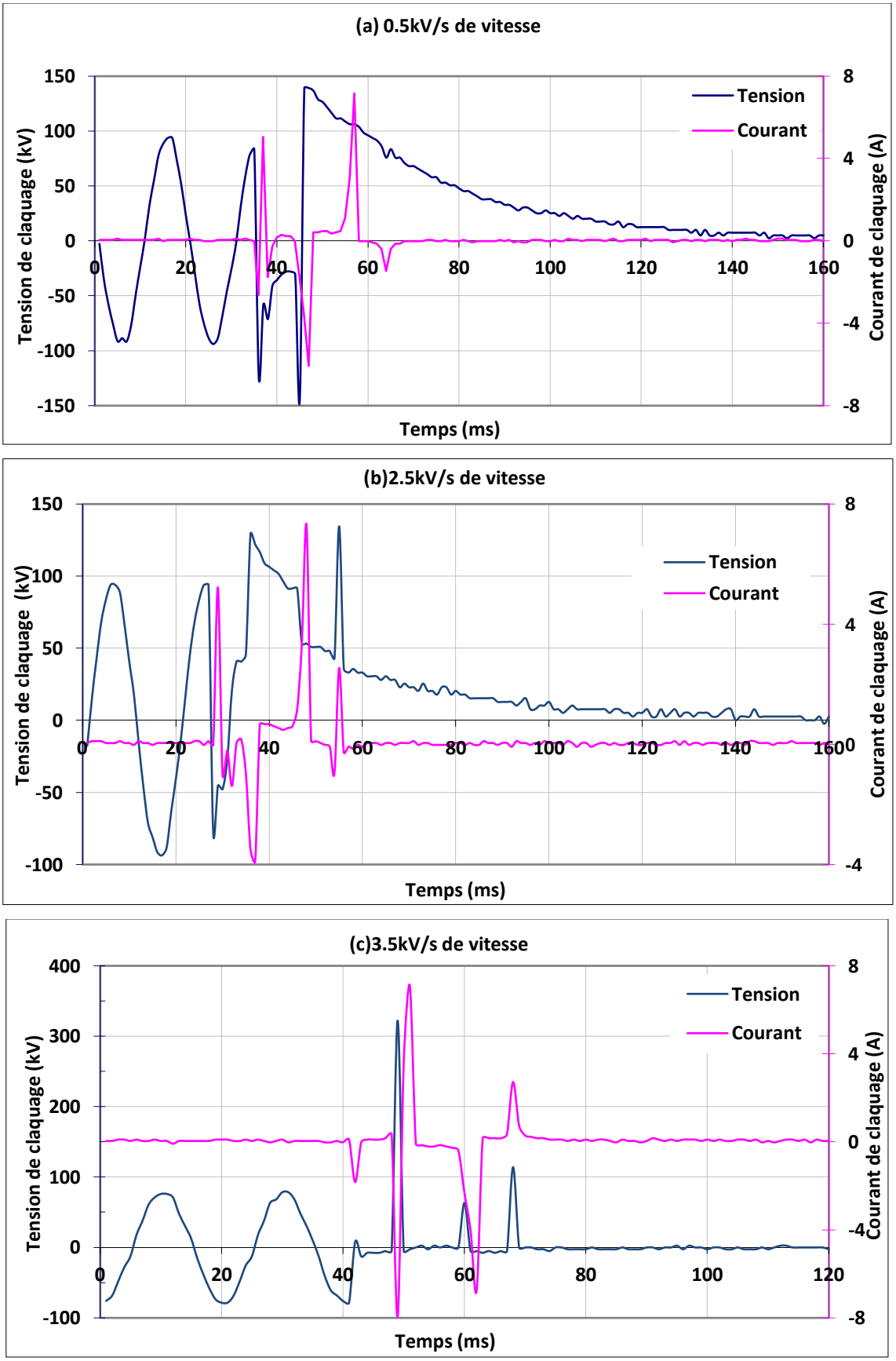


Figure IV.5 : Variation de la tension et du courant à l'instant du claquage en fonction du temps pour la distance inter-électrodes de 5mm.

Les figures représentants les variations des courants et des tensions pour la distance de 5mm sont similaires à celles observées dans le cas des distances inter-électrodes de 1mm et 2,5mm. Cependant, le temps pris par le claquage pour la distance de 5mm est le plus court par rapport aux deux autres distances. Ceci est dû au fait que le champ électrique correspondant à la distance inter-électrodes de 5mm est faible.

Nous remarquons aussi pour la distance de 5mm, que le temps pris par le claquage est inférieur pour la vitesse d'augmentation de la tension de 3,5 kV/s ; il passe de 35 ms pour les deux vitesses de 0,5 kV/s et 2 kV/s, et diminue jusqu'à 36 ms pour la vitesse de 3,5 kV/s, ce qui confirme les mêmes résultats obtenus pour les autres distances.

IV.5. Discussion des résultats

Les résultats obtenus pour le courant et la tension à l'instant du claquage montrent clairement que le temps de saturation ; qui est le passage du courant initial jusqu'à la chute vers zéro, diminue en fonction de l'augmentation de la distance inter-électrodes. Il passe par exemple pour la vitesse d'augmentation de tension de 0,5 kV/s de ~ 170 ms pour la distance inter-électrodes de 1mm, à 110 ms pour 2,5mm, pour enfin atteindre ~ 35ms pour 5mm.

L'augmentation de la distance inter-électrodes provoque l'augmentation de la tension de claquage, tandis que le temps pris par le claquage est plus court.

IV.6. Variation de la tension et du courant de claquage en fonction du temps lors de la première phase de claquage

Pour les variations de la tension et du courant aux premiers instants du claquage (intervalle de temps de 4ms), nous présentons les résultats obtenus pour les trois vitesses d'augmentation de la tension 0,5 kV/s, 2 kV/s et 3,5 kV/s, et les distances inter-électrodes de 1mm, 2,5mm et 5mm.

IV.6.1. Distance inter-électrodes de 1mm

Les figures IV.6 (a, b et c) présentent respectivement ces variations pour les vitesses d'augmentation de la tension 0,5 kV/s, 2 kV/s et 3,5 kV/s à la distance inter électrodes de1mm.

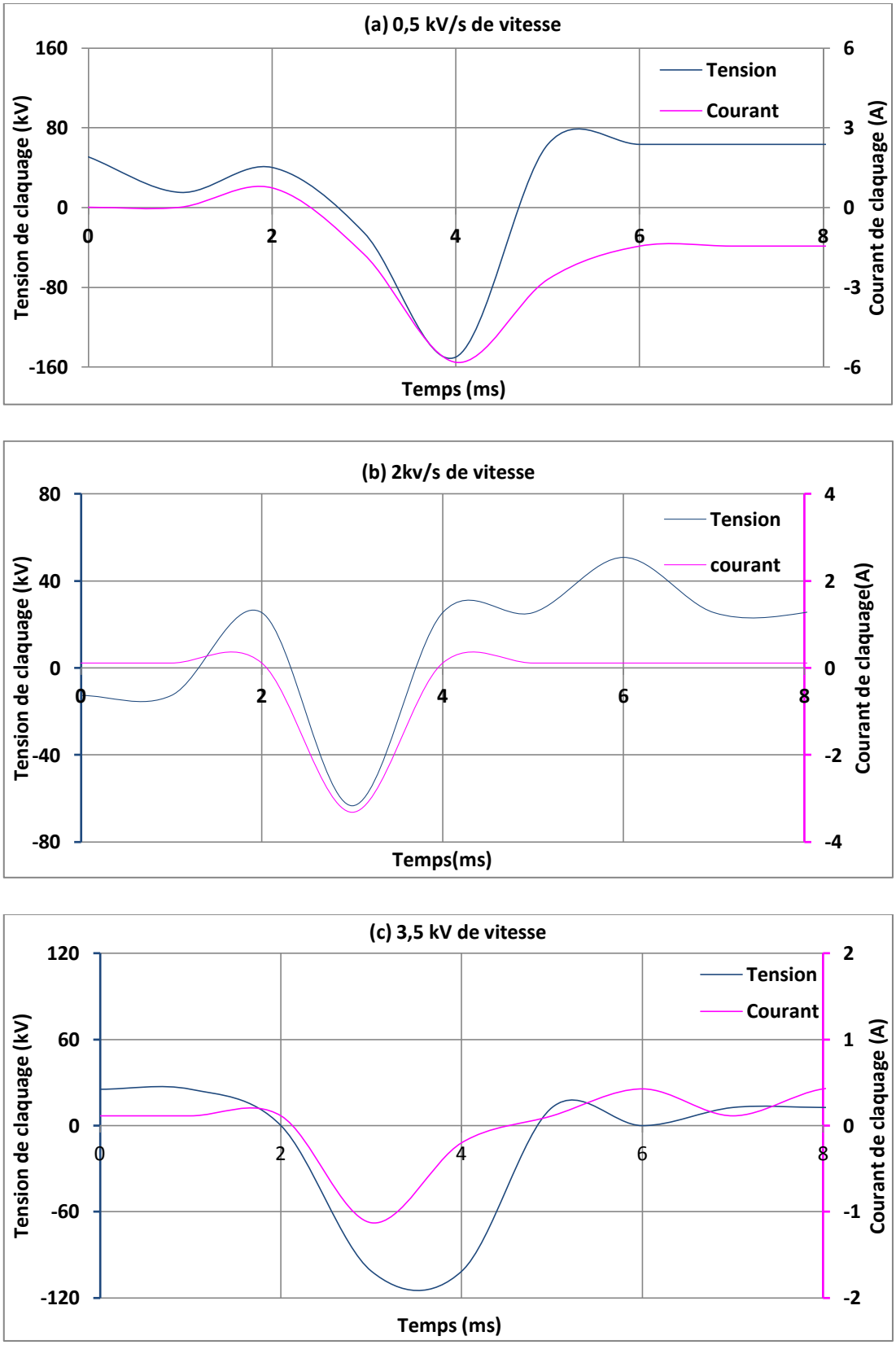


Figure IV.6 : Variation de la tension et du courant aux premiers instants du claquage en fonction du temps pour la distance inter-électrodes de 1mm.

Nous remarquons d'après les figures IV.6 (a, b et c) que pour les trois vitesses d'augmentation de la tension, le courant aux premiers instants du claquage réalise une augmentation brusque avant de tendre vers zéro. La polarité de la tension aux premiers instants du claquage est positive pour différentes vitesses. Les valeurs du courant de claquage pour les trois vitesses d'augmentation sont positives.

Nous constatons que pour la vitesse d'augmentation de la tension de 0,5 kV/s, la valeur du courant de claquage avant de tendre vers zéro est de 5.82 A. Cette valeur est supérieure à celle correspondante à 2 kV/s (3.32 A), et cette dernière est supérieure à celle correspondante à 3,5 kV/s (1,13A).

IV.6.2. Distance inter-électrodes de 2,5mm

Pour la distance inter-électrodes de 2,5mm, les variations des signaux de tension et de courant aux premiers instants du claquage sont représentées aux figures IV.7 (a, b et c).

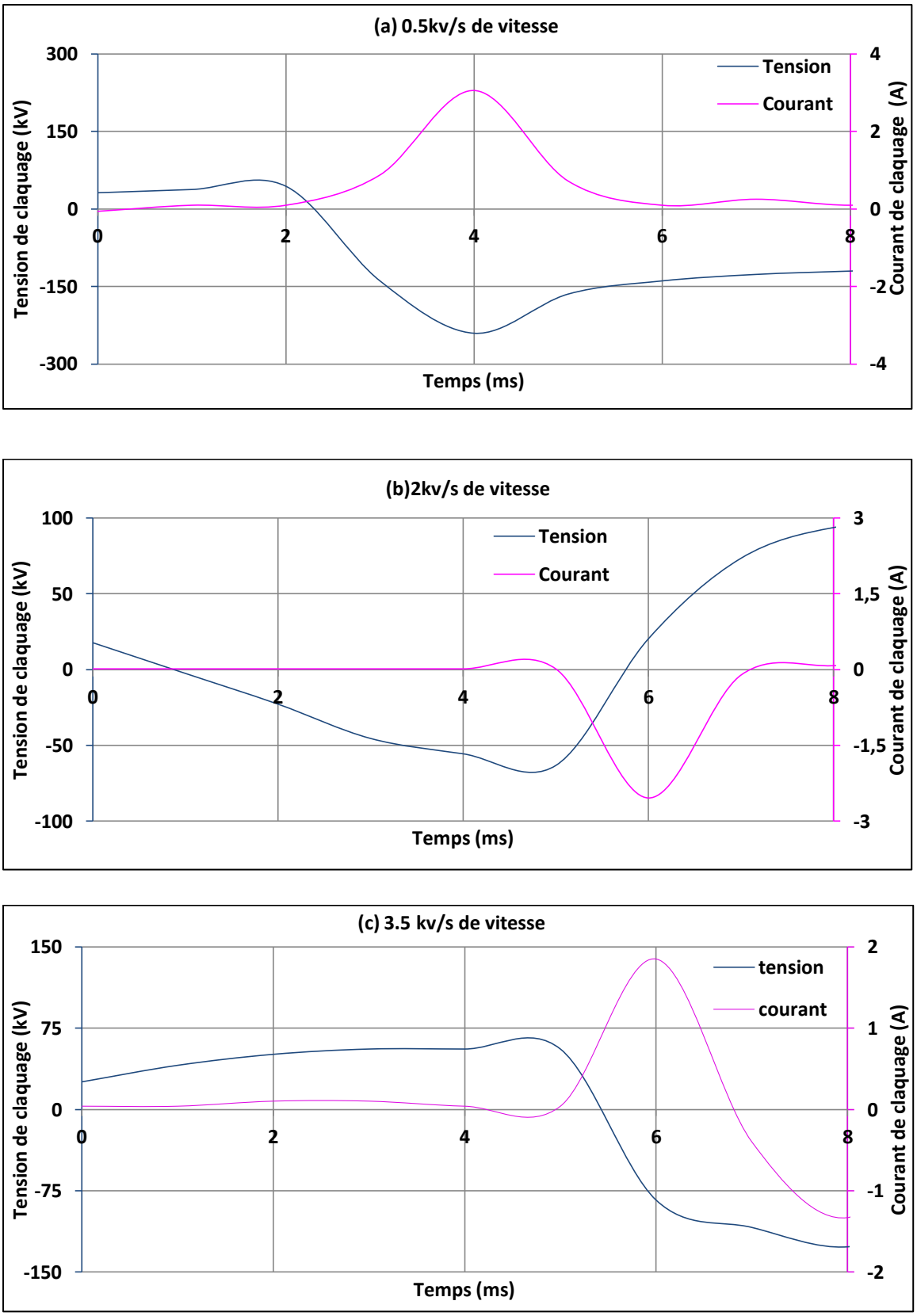


Figure IV.7 : Variation de la tension et du courant aux premiers instants du claquage en fonction du temps pour la distance inter-électrodes de 2,5mm.

Comme nous l'avons remarqué pour la distance inter-électrodes de 1mm, le courant à cette distance réalise la même variation. Il augmente brusquement puis il tend vers zéro.

Nous remarquons que le courant aux premiers instants du claquage est positif pour les deux vitesses de 0,5 kV/s et 3,5 kV/s, et est négatif pour la vitesse de 2 kV/s. Ces polarités du courant pour les trois vitesses d'augmentation de la tension correspondent directement avec la polarité de la tension au moment du claquage.

La valeur du courant de claquage pour la distance de 2,5mm à la vitesse d'augmentation de la tension de 0,5 kV/s est de 3,06 A. Cette valeur est supérieure à celle correspondante à 2 kV/s (2,54 A). Cette dernière est supérieure à celle correspondante à 3,5 kV/s (1,85 A). Toutefois, nous remarquons que l'amplitude des courants de claquage pour la distance de 2,5mm est petite par rapport à celle enregistrée pour la distance inter-électrodes de 1mm. Ceci concorde avec la tension de claquage qui devient grande lorsque la distance inter-électrodes augmente.

IV.6.3. Distance inter-électrodes de 5mm

Les figures IV .8 (a, b et c) présentent les variations des signaux de tension et de courant aux premiers instants du claquage pour la distance inter-électrodes de 5mm.

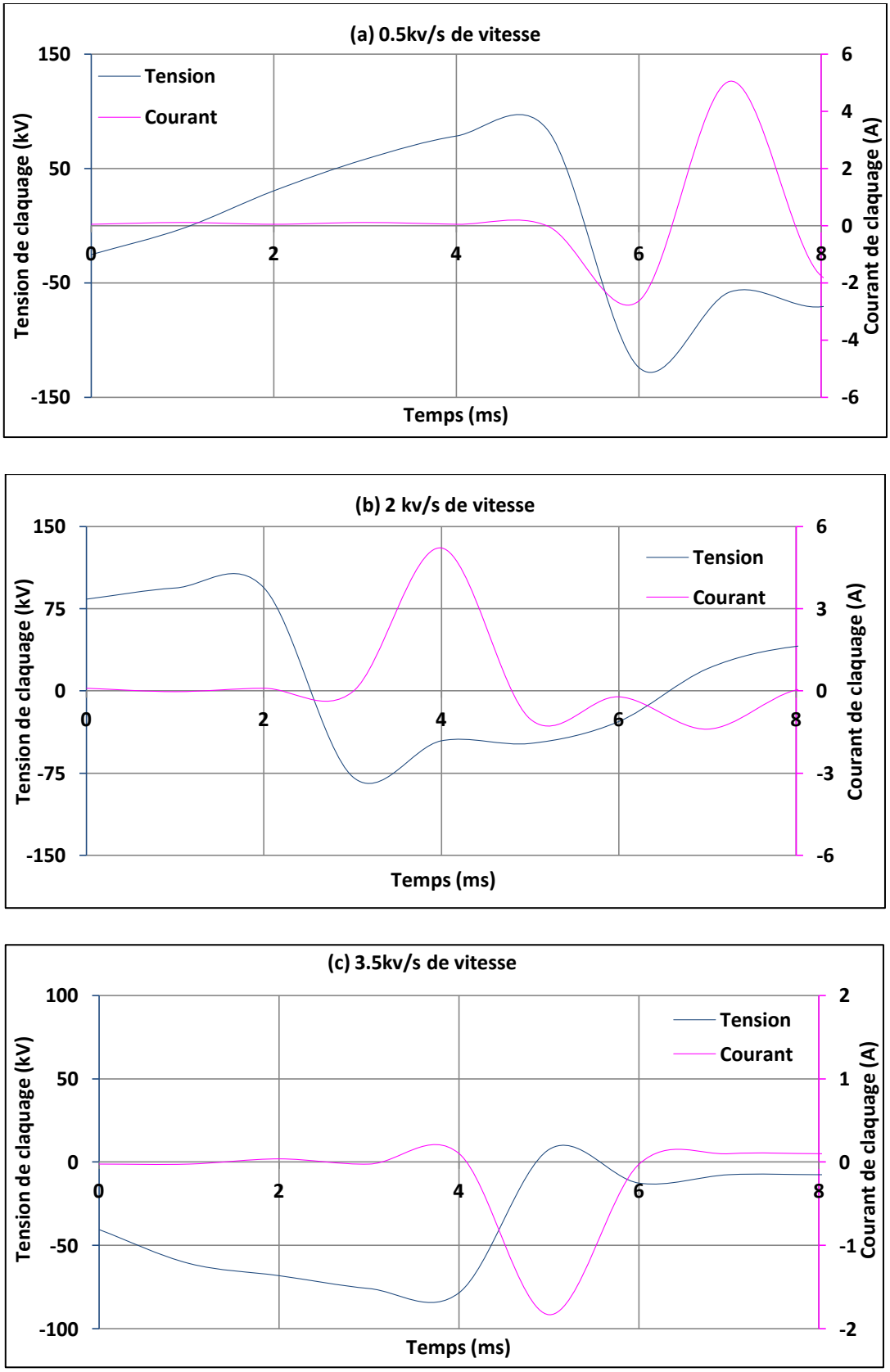


Figure IV.8 : Variation de la tension et du courant aux premiers instants du claquage en fonction du temps pour la distance inter-électrodes de 5mm.

Le courant de claquage pour la distance inter-électrodes de 5mm prend la même allure que celle remarquée pour les distances inter-électrodes de 1mm et 2,5mm. Il augmente brusquement puis tend vers zéro, et ce pour les trois vitesses d'augmentation de la tension.

La polarité du courant aux premiers instants du claquage à la distance de 5mm est négative pour les deux vitesses de 0,5 kV/s et 3,5 kV/s, et est positive pour la vitesse de 2 kV/s. Nous remarquons que pour les deux vitesses de 2 kV/s et 3,5 kV/s, la polarité du courant correspond à la polarité de la tension. Tandis que pour la vitesse de 0,5 kV/s, le claquage se réalise à une tension positive, alors que le courant est négatif.

La valeur maximale du courant de claquage pour la distance de 5mm est enregistrée à la vitesse d'augmentation de la tension de 2 kV/s (5,22 A). Cette valeur est supérieure à celle correspondant à 0,5 kV/s (2,64 A), et cette dernière est supérieure à celle correspondant à 3,5 kV/s (1,83 A). La variation du courant à la distance de 5mm pour les trois vitesses d'augmentation de la tension concorde avec la variation de la rigidité diélectrique.

La rigidité est la plus grande pour la vitesse de 2 kV/s qui est la vitesse recommandée par la norme [10].

IV.7. Discussion des résultats

Les résultats obtenus pour le courant et la tension aux premiers instants du claquage montrent clairement que le courant de claquage réalise la même variation pour les différentes distances inter-électrodes et les trois vitesses d'augmentation de la tension. Il augmente brusquement pour atteindre une valeur maximale, puis enfin il tend vers zéro.

D'après les résultats obtenus, la polarité du courant est la même que la polarité de la tension, sauf pour l'essai correspondant à la distance de 5mm et la vitesse de 0,5 kV/s, et la vitesse 2kV/s où nous avons remarqué deux polarités différentes.

La valeur maximale du courant de claquage correspond à la petite vitesse de 0,5 kV/s pour les distances inter-électrodes de 1mm et 2,5mm. Pour la distance inter-électrodes de 5mm, la valeur maximale du courant est enregistrée pour la vitesse de 2 kV/s, qui correspond à la vitesse recommandée par la norme [10].

IV.8. Variation de l'impédance de l'huile à l'instant du claquage

Les valeurs instantanées de l'impédance de l'huile à l'instant du claquage sont calculées à partir des valeurs instantanées du courant et de la tension enregistrées lors d'un claquage de l'huile selon l'équation suivante :

$$Z_t = V_t / I_t \qquad \text{(IV.2).}$$

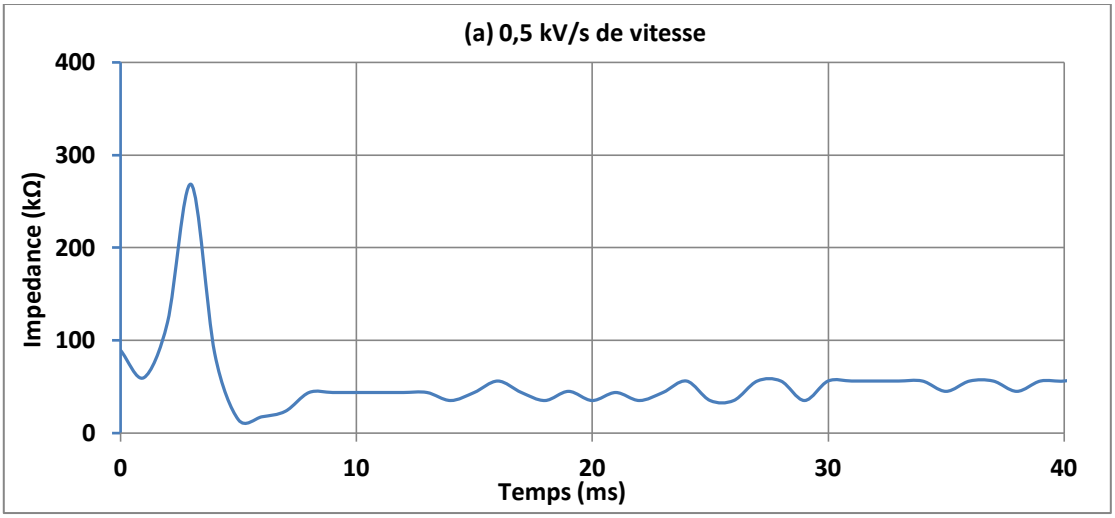
Où

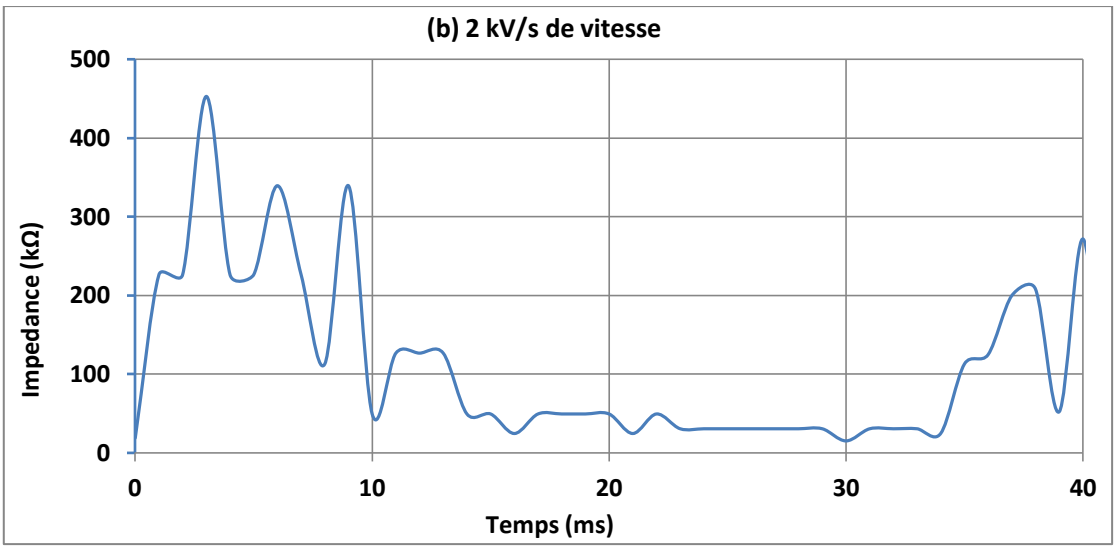
- ✓ Z_t: La valeur instantanée de l'impédance de l'huile ;
- ✓ V_t: La tension instantanée ;
- ✓ I_t: Le courant instantané ;

Une huile isolante doit conduire le moins possible le courant électrique, sa conductivité est plus faible inversement à sa résistivité qui doit être assez importante. L'impédance de l'huile comme étant sa tension sur son faible courant est assez importante comme sa résistivité [33,34]. Les variations de l'impédance de l'huile en fonction des différentes distances inter électrodes et à différentes vitesses d'augmentation de la tension sont présentées en ce qui suit.

IV.8.1. Distance inter-électrodes de 1mm

Les résultats obtenus pour l'impédance de l'huile à l'instant du claquage pour la distance inter-électrodes de 1mm et les vitesses d'augmentation de la tension de 0,5 kV/s, 2 kV/s et 3,5 kV/s sont illustrés respectivement aux figures IV.9. (a, b et c).





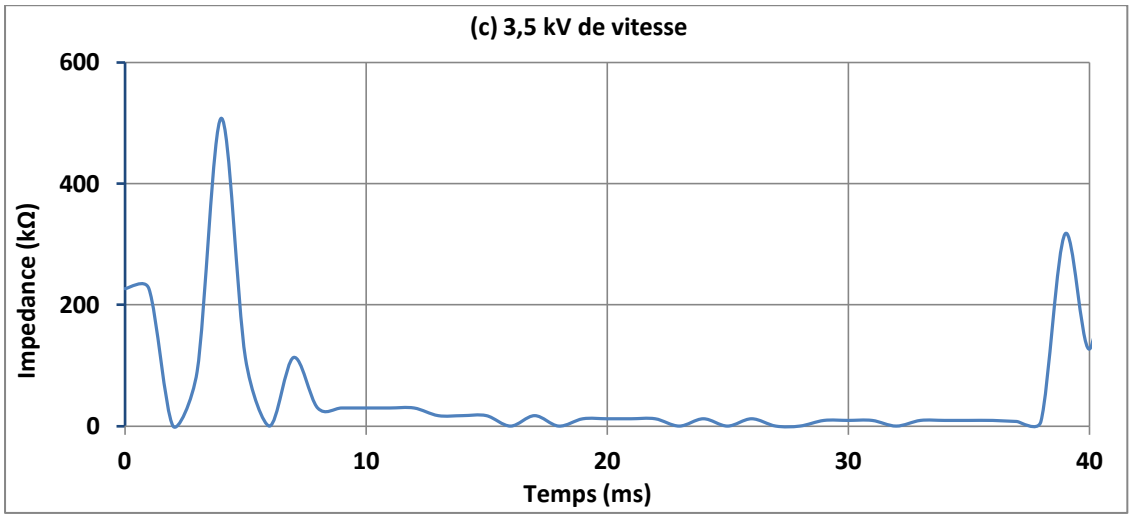


Figure IV.9 : Variation de l'impédance de l'huile à l'instant du claquage en fonction du temps pour la distance inter-électrodes de 1mm.

Le claquage est caractérisé par une chute brusque de l'impédance de l'huile suivie par une série d'oscillation. La variation de l'impédance de l'huile est similaire pour les trois vitesses 0,5 kV/s, 2kV/s et 3,5 kV/s. Cependant son amplitude est assez importante pour la vitesse la plus petite ; elle décroît de 268.35 kΩ pour 0,5 kV/s à 226kΩ pour 2 kV/s et 3,5 kV/s.

Le temps pris par l'huile pour que l'impédance atteigne une valeur de zéro est plus rapide pour la vitesse d'augmentation de la tension la plus petite ; ce temps correspond à 2ms pour 0,5 kV/s et 2 kV/s, pour enfin atteindre 3ms pour 3,5 kV/s.

IV.8.2. Distance inter-électrodes de 2,5mm

Les variations de l'impédance de l'huile à l'instant du claquage pour les trois vitesses d'augmentation de la tension de 0,5 kV/s, 2 kV/s et 3,5 kV/s à la distance inter-électrodes de 2,5mm sont représentées respectivement aux figures IV.10 (a, b et c).

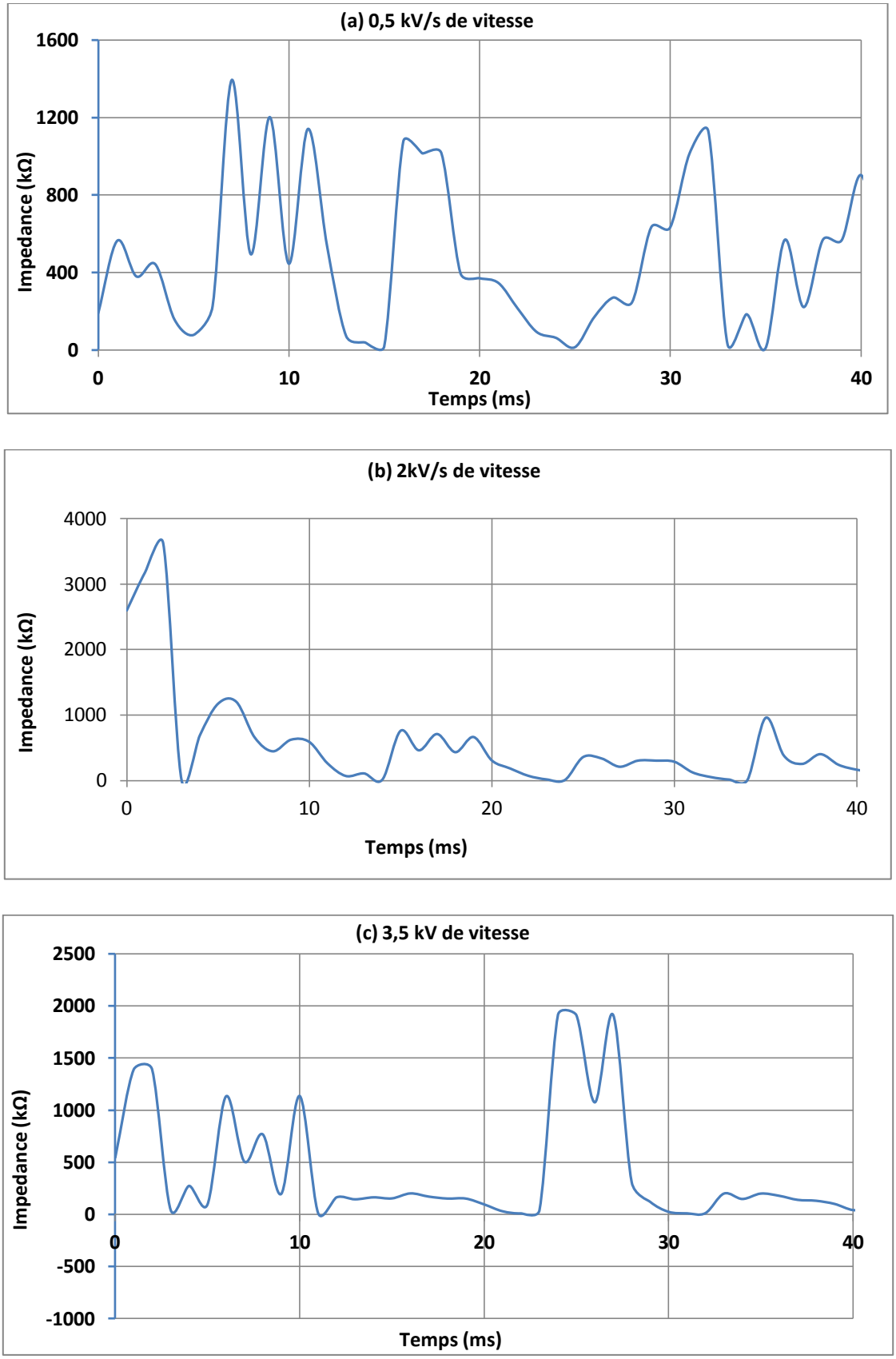


Figure IV.10 : Variation de l'impédance de l'huile à l'instant du claquage en fonction du temps pour la distance inter-électrodes de 2,5mm.

Pour cette distance, l'allure des graphes prend une forme similaire à celle constatée pour la distance inter-électrodes de 1mm. Au moment du claquage, l'impédance chute à une valeur de zéro, et puis elle réalise des fluctuations non uniformes à cause des variations brusques du courant et de la tension en ce moment de claquage. La durée de ces fluctuations diminue avec l'augmentation de la vitesse de tension ; ce temps est similaire au temps pris par les signaux de courant et de tension pour atteindre les valeurs de zéro [27].

IV.8.3. Distance inter-électrodes de 5mm

Les figures IV. 11. (a, b et c) présentent les variations de l'impédance de l'huile immédiatement après le claquage pour la distance inter-électrodes de 5mm et les vitesses d'augmentation de la tension 0,5 kV/s, 2 kV/s et 3,5 kV/s.

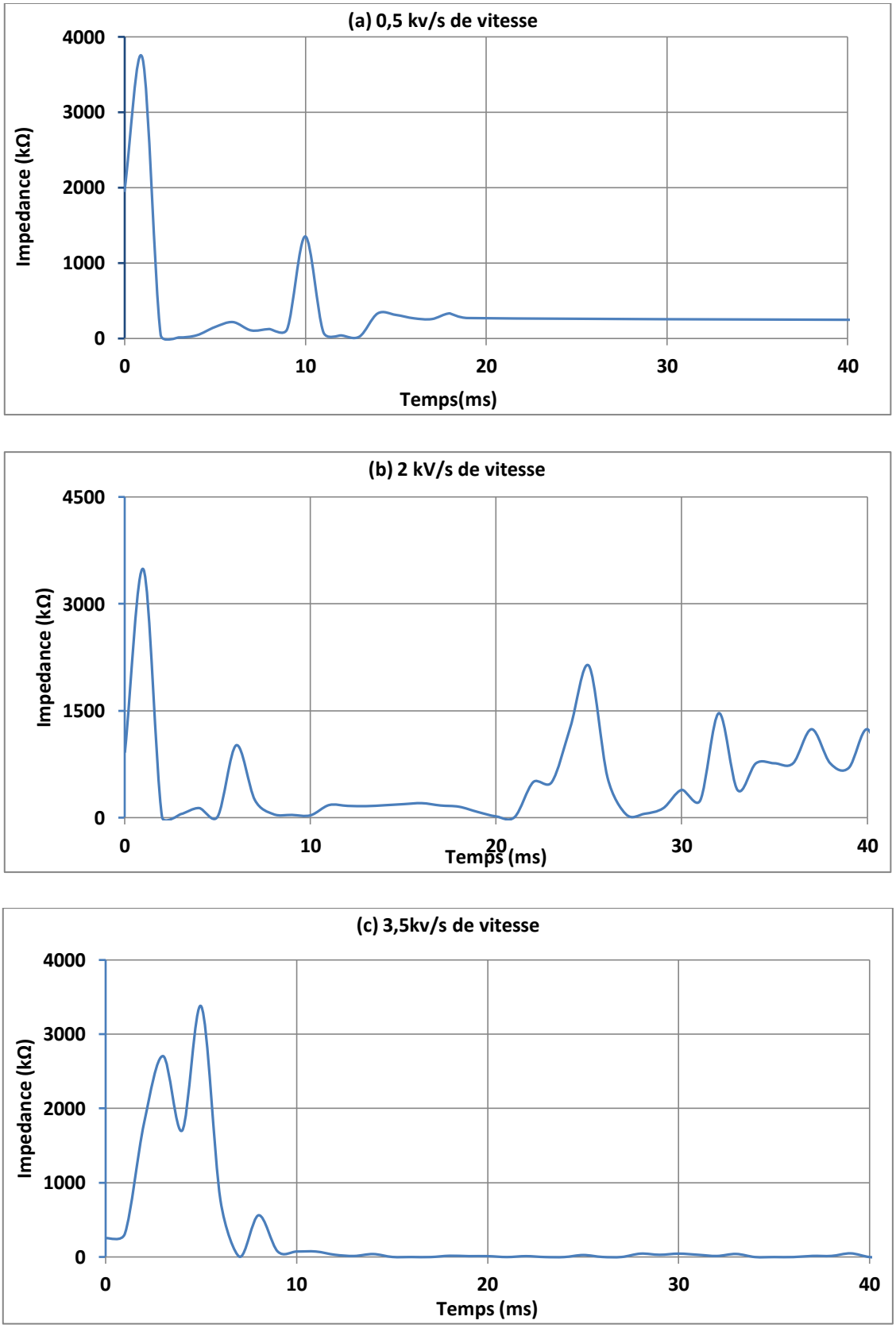


Figure IV.11 : Variation de l'impédance de l'huile à l'instant du claquage en fonction du temps pour la distance inter-électrodes de 5mm.

Nous remarquons que les formes de courbes réalisées pour la distance de 5mm sont similaires à celles réalisées pour 1mm et 2,5mm. Par contre, la période de claquage pour cette distance est plus courte que celle des deux autres distances [27]. Ceci est dû à la valeur du champ électrique entre les électrodes qui devienne petite pour la distance de 5mm par rapport aux valeurs de champ correspondantes aux distances de 1mm et 2,5mm. Ceci permet au système de protection de réagir dans un temps relativement court.

Pour cette distance, le temps de chute de l'impédance vers zéro est presque constant ; il est de 2ms pour les vitesses de 0,5 kV/s et 3,5 kV/s, et de 1ms pour la vitesse de 2 kV/s [24].

PARTIE II. TENSION IMPULSIONNELLE :

IV.9. Variation de la tension et du courant à l'instant du claquage pour différentes distances inter-électrodes (1mm, 2.5mm et 5mm).

L'essai expérimental contient une résistance de 50Ω en série avec la cellule de test. Pour cet essai, on utilise une résistance de 50Ω en série avec la cellule de test, avec différents distance inter-électrodes de 1mm, 2.5mm et 5mm. On fait augmenter la tension impulsionnelle automatiquement jusqu'au claquage.

La figure IV.12.(a, b et c) représente les variations du courant et de tension au moment du claquage pour les trois distance inter-électrodes 1mm, 2.5mm et 5mm.

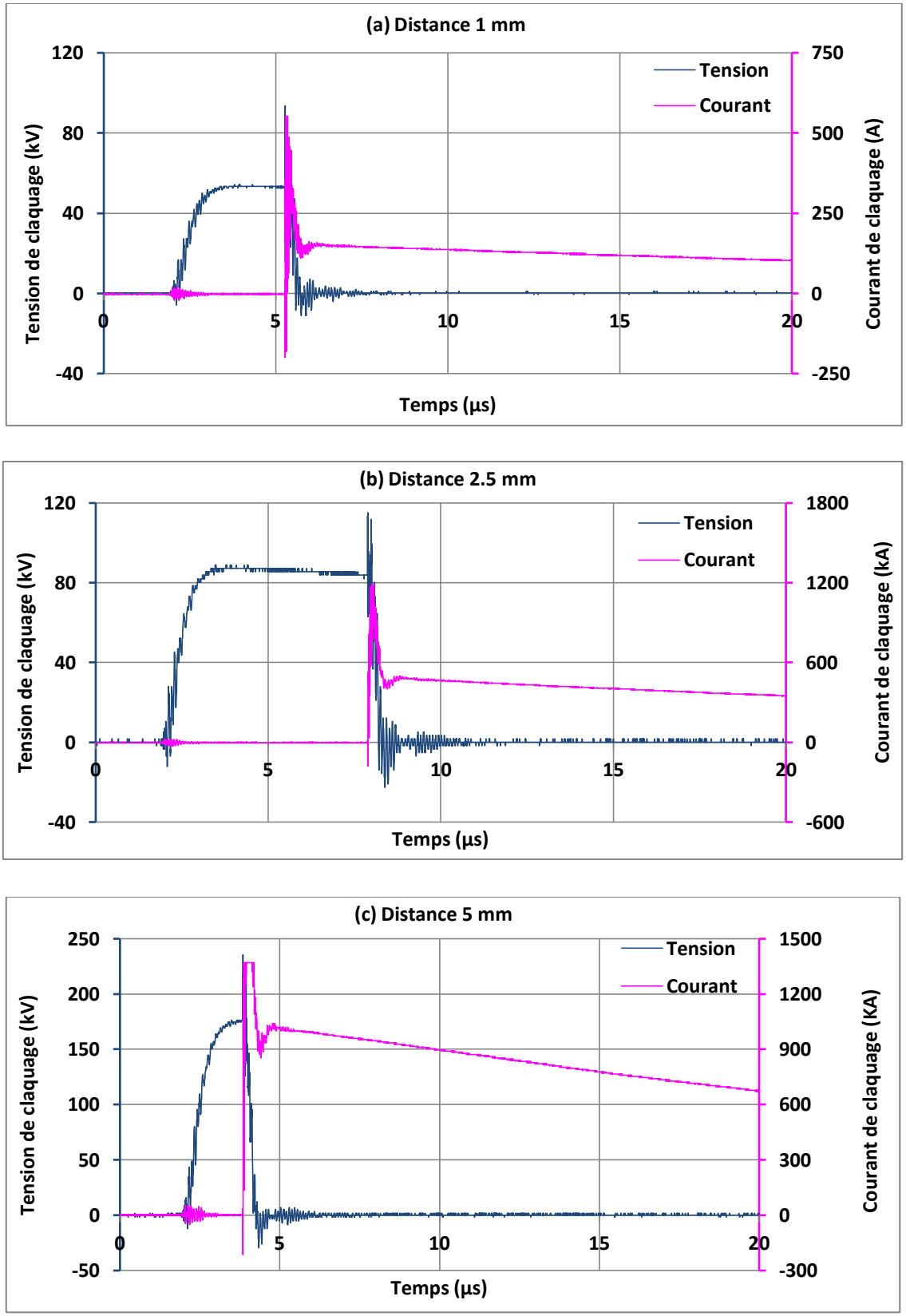


Figure IV.12 : Variation de la tension et du courant à l'instant du claquage en fonction du temps avec une résistance de 50Ω.

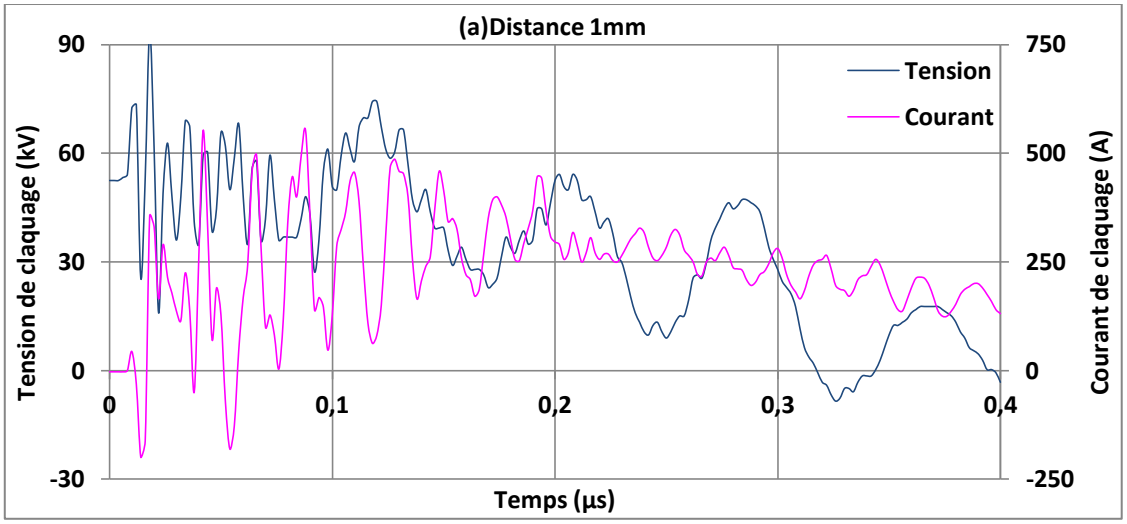
A partir de la figure IV.12 (a, b et c), nous remarquons que les variations du courant et de tension pour les différentes distances sont similaires. Le claquage est caractérisé par une grande augmentation du courant et de tension, et puis ces grandeurs tendent vers zéro.

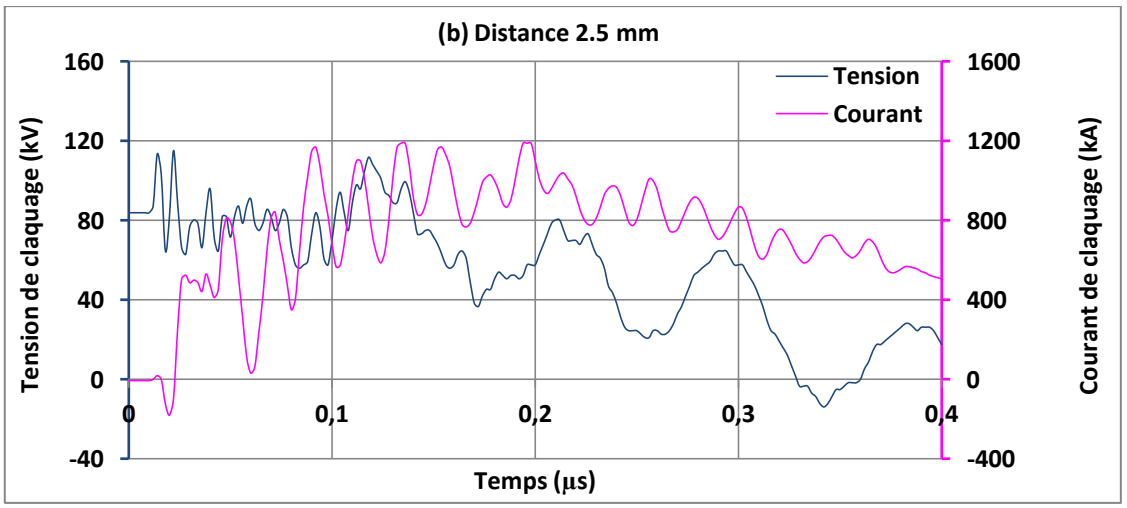
Pour les trois distances inter-électrodes, le claquage est réalisé au niveau de la queue de la tension impulsionnelle. Ceci peut être dû à la période de temps de la queue qui est une période suffisante pour qu'un claquage puisse se produire. Tandis que pour la partie front de l'onde, le temps est tellement petite (<1µs) de telle sorte que le claquage n'a pas le temps suffissent pour se produire.

La tension impulsionnelle prend un temps court pour atteindre sa valeur maximal Vmax (valeur de crête), mais au contraire il nécessite plus de temps pour tendre vers zéro, en conséquent le claquage se produit durant la queue.

IV.10. Variation de la tension et du courant aux premiers instants du claquage en fonction du temps pour résistance 50Ω

Les variations des courant et de tension au premier instant du claquage Pour les trois distance entre –électrodes sont présentées dans la figure III.13 (a, b et c).





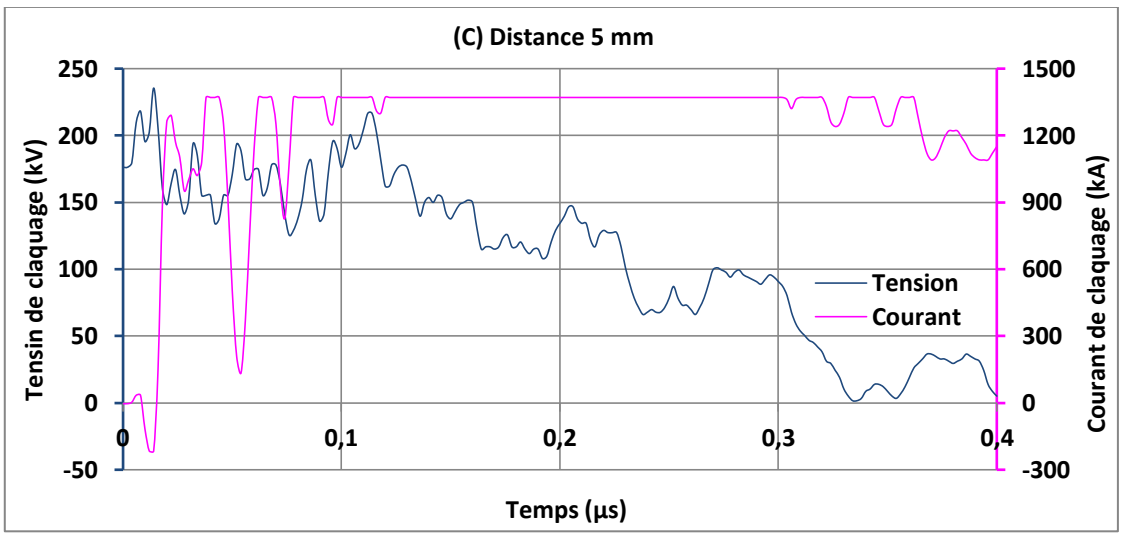


Figure IV.13 : Variation de la tension et du courant aux premiers instants du claquage en fonction du temps avec une résistance de 50Ω.

A partir des figures IV.13 (a, b, et c) nous remarquons que le temps pris par le claquage pour passer d'une tension très importante vers zéro est similaire pour les trois distances. Il est de l'ordre de 0, 35µs.

La tension de claquage augmente avec l'augmentation de la distance inter-électrode, elle passe de 54,18kV pour la distance de 1mm à 102.78kVpour la distance de 2,5mm, pour enfin atteindre 218,14kVpour la distance de 5mm.

Le courant de claquage aussi augmente avec l'augmentation de la distance inter-électrodes, il passe de 162A pour la distance de 1mm et 181A pour 2,5mm, jusqu'à 216Apour la distance de 5mm.

Cette variation de la tension et du courant au moment du claquage en fonction de la distance inter-électrode est expliquée par le fait que le mouvement de charge diminue en augmentant la distance, ce qui nécessite l'augmentation de la tension pour que le claquage se réalise.

IV.11. Variation de la tension et du courant à l'instant du claquage pour différentes résistances non inductives

Le circuit de test est composé de la cellule de test avec une distance inter-électrodes de 1mm, en premier lieu sans la mise en série d'une résistance, et puis avec différentes résistance en série avec la cellule de test 50Ω, 4800Ω et 9600Ω.

Les variations du courant et de tension sont représentées dans la figure IV.14, IV.15, IV.16.

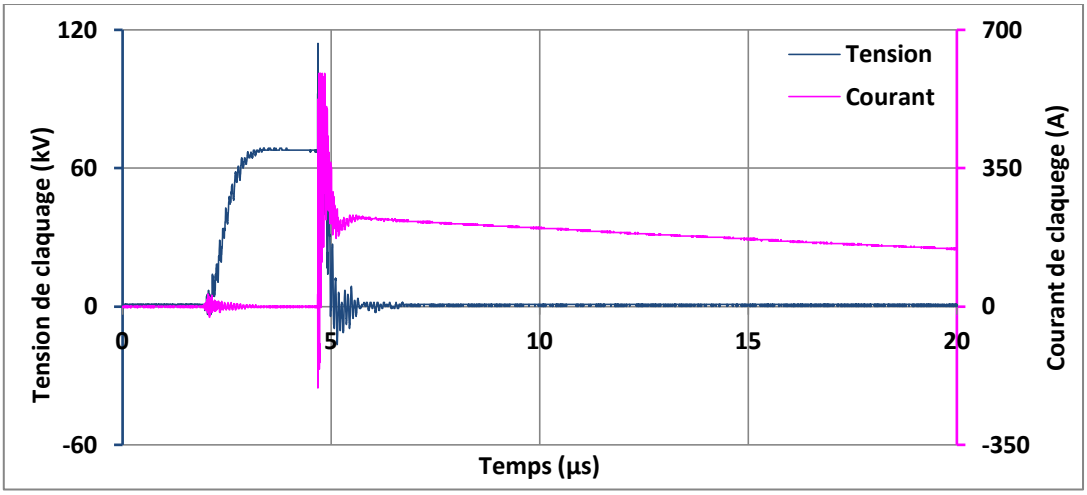


Figure IV.14 : Variation de la tension et du courant à l'instant du claquage en fonction du temps pour la distance de 1mm sans résistance.

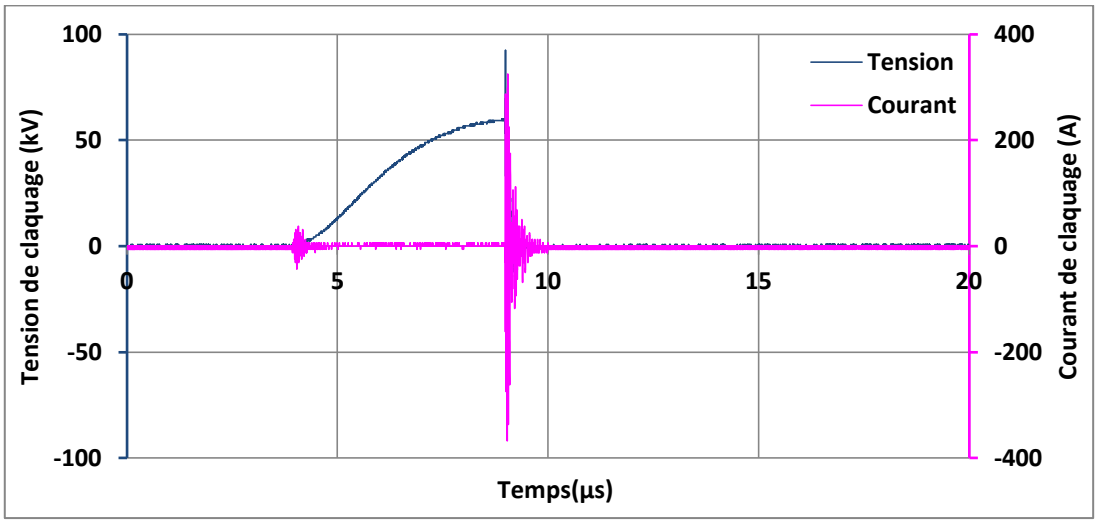


Figure IV.15 : Variation de la tension et du courant à l'instant du claquage en fonction du temps pour la distance de 1mm avec une résistance de 4800 Ω.

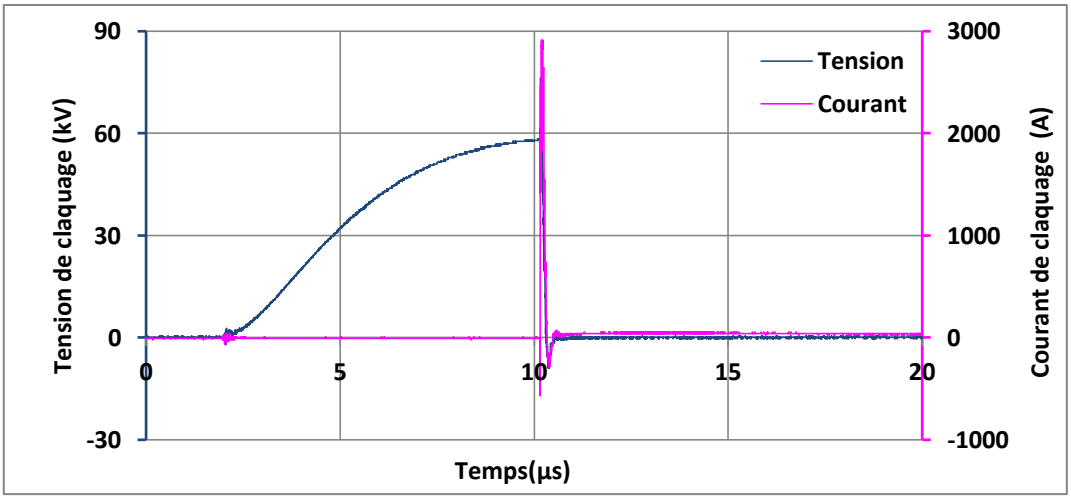


Figure IV.16 : Variation de la tension et du courant à l'instant du claquage en fonction du temps pour la distance de 1mm avec une résistance de 9600 Ω.

D'après les figures, l'effet de la résistance est de diminuer le temps de passage du courant de claquage vers zéro. On voie que pour une grande résistance le temps pris par le claquage pour passer à zéro est le plus court.

Les résultats obtenus pour le courant et la tension aux premiers instants du claquage montrent clairement que le courant de claquage réalise la même variation pour les différentes distances inter-électrodes. Il augmente brusquement pour atteindre une valeur maximale, puis il tend vers zéro.

A cause de l'augmentation de la résistance, le temps de front (de montée) devient plus grand, et donc, la probabilité que le claquage se réalise à cette période (front de l'onde) est grande par rapport à un temps de front plus court [35].

IV.12. Variation de la tension et du courant aux premiers instants du claquage pour différentes résistances non inductives

Les variations des courants et de tension au premier instant du claquage Pour les différentes résistances (sans, 50Ω, 4800Ω, et 9600Ω) sont présentées dans les figures IV.17, IV.13. (a), IV.18, et IV.19.

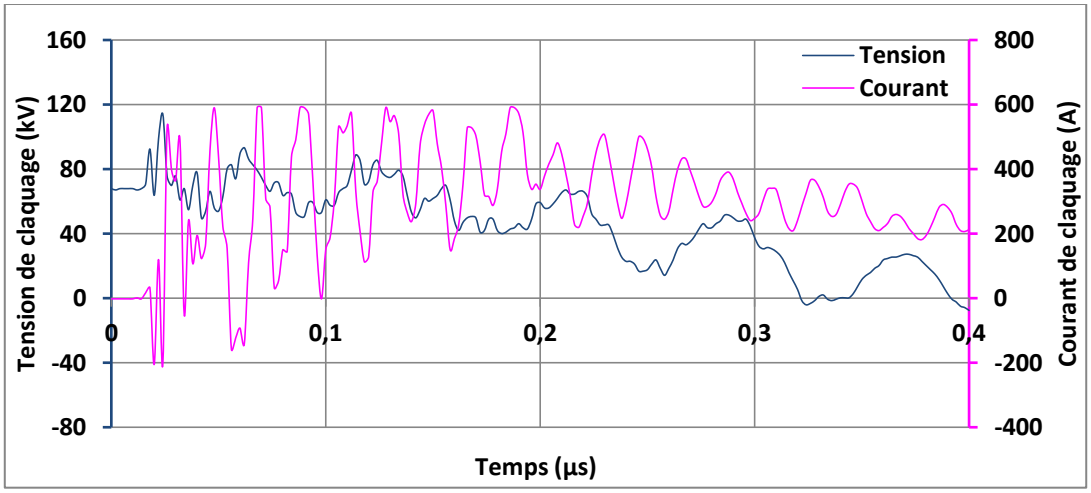


Figure IV.17 : Variation de la tension et du courant aux premiers instants du claquage en fonction du temps pour la distance de 1mm sans résistance.

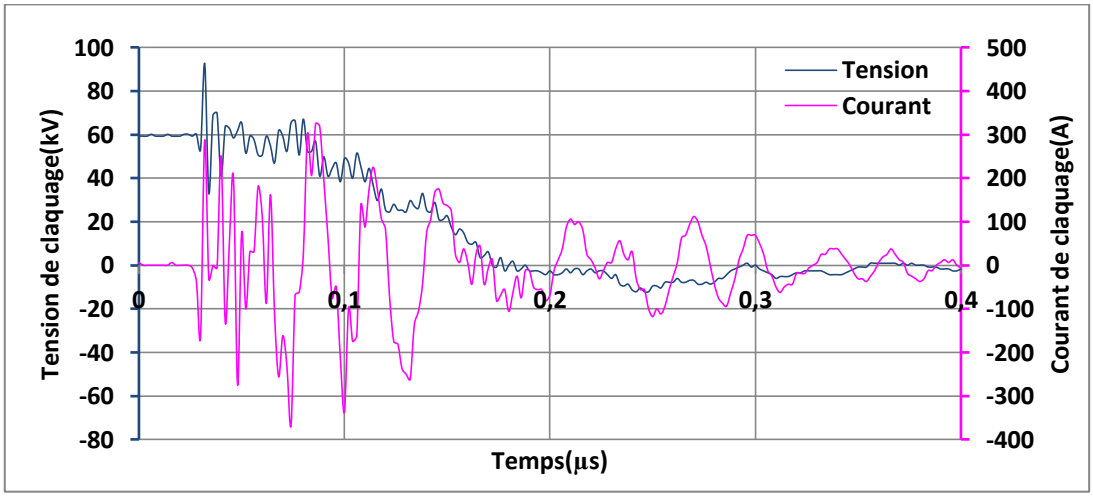


Figure IV.18 : Variation de la tension et du courant aux premiers instants du claquage en fonction du temps pour la distance de 1mm avec une résistance de 4800 Ω.

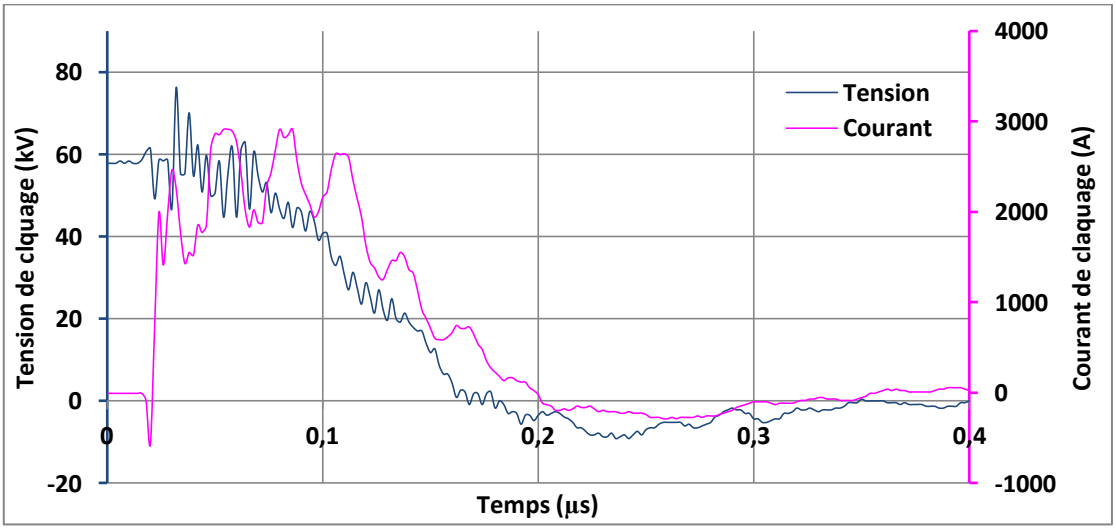


Figure IV.19 : Variation de la tension et du courant aux premiers instants du claquage en fonction du temps pour la distance de 1mm une résistance de 9600 Ω.

Le temps pris par le claquage pour passer de la grande tension vers zéro, diminue avec l'augmentation de résistance. Il passe de 0,35 µs pour le circuit sans résistance, et avec une résistance de 50Ω, jusqu'à 0.18µs pour la résistance de 4800Ω, pour enfin atteindre 0.16µs pour la résistance de 9600Ω.

IV.13. La variation de l'impédance pour différentes distance inter-électrodes

L'impédance dynamique de l'huile est calculée à partir des valeurs instantanées du courant et de la tension à l'instant du claquage selon l'équation :

$$Z = \frac{U}{I} \qquad \text{(IV.2).}$$

L'impédance dynamique de l'huile est déterminée durant le processus de claquage pour différentes distances 1mm, 2.5mm et 5mm.

Les figures IV.20 (a, b et c) les variations de l'impédance à l'instant du claquage pour les distance 1 mm, 2.5mm et 5 mm respectivement.

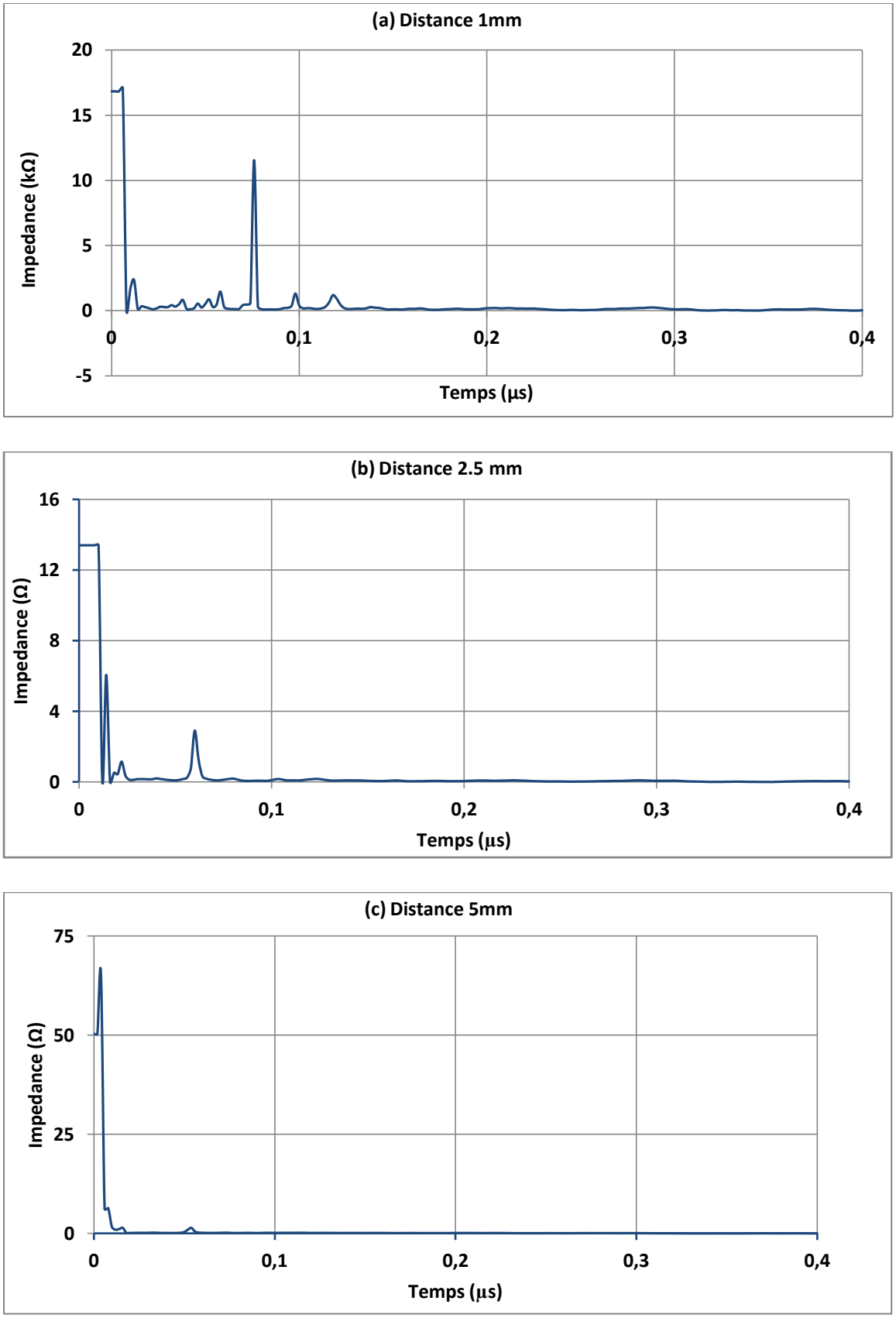


Figure IV.20 : Variation de l'impédance de l'huile à l'instant du claquage en fonction du temps pour la résistance 50 Ω.

Nous remarquons d'après la figure IV.20.a, que le claquage est caractérisé par une chute de l'impédance de l'huile suivie par une série d'oscillation qui se produit à cause des variations rapide de la tension au moment de claquage. Pour les figures IV.20 (b, c) la variation est similaire mais la chute de l'impédance vers zéro n'est pas suivie par un nombre important d'oscillation. C'est pour cela, qui le temps pris pour atteindre la valeur d'impédance zéro, diminue avec l'augmentation de la distance inter-électrodes. Ceci est dû à la mobilité de charge qui devient moins importante quand la distance inter-électrodes augmente.

L'amplitude de l'impédance à l'instant de claquage diminue d'une valeur 17 KΩ pour la distance inter-électrode de 1 mm, jusqu'à 65 Ω pour la distance de 5mm.

Les variations de l'impédance pour les trois distances sont similaires. L'impédance réalise une série de fluctuations non-uniforme avant de se tendre vers zéro. Toutefois, ces fluctuations diminuent avec l'augmentation de la distance inter-électrodes, ce que présente un temps pris par l'huile pour atteindre la valeur zéro impédance qui est le plus court pour la distance la plus grand (5 mm).

III.14. La variation de l'impédance sans résistance et avec résistance en série

Les figures IV.20.a, IV.21, IV.22 et IV.23 présente les variations de l'impédance de l'huile pour 1mm de distance inter-électrode avec résistance de 50Ω, sans résistance, avec une résistance de 4800 Ω et avec une résistance de 9600 Ω respectivement.

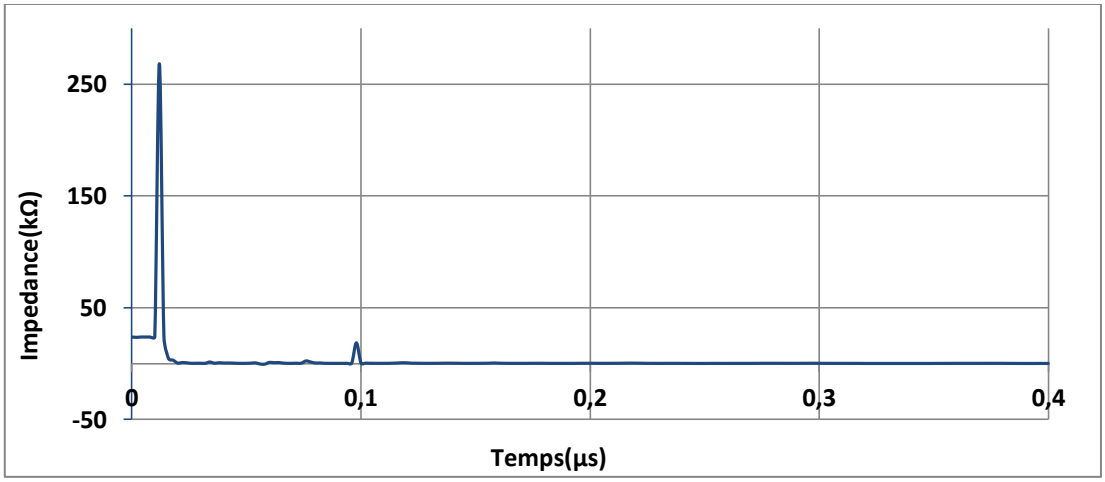


Figure IV.21 : Variation de l'impédance d'huile après claquage pour la distance de 1mm et sans résistance.

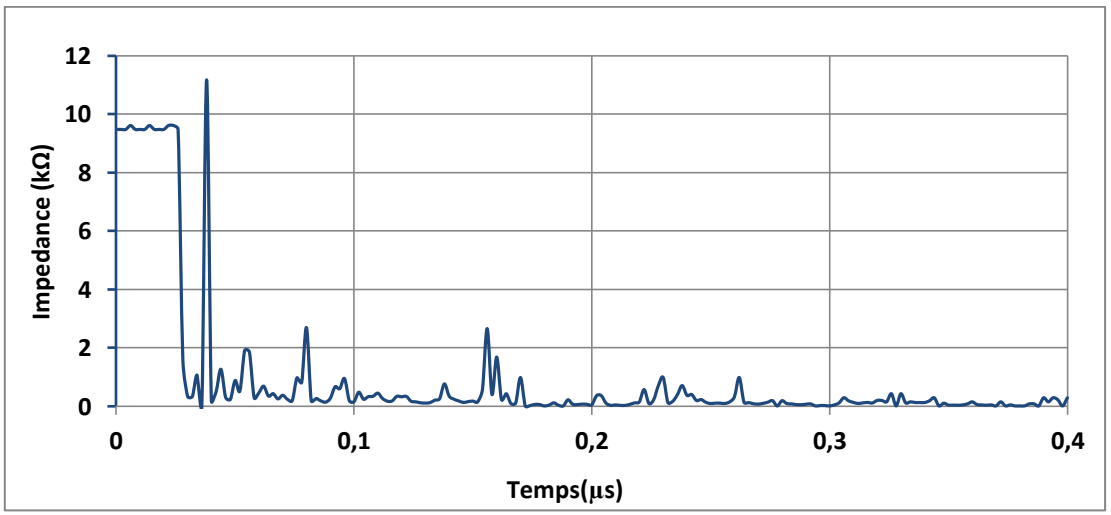


Figure IV.22 : Variation de l'impédance d'huile après claquage pour la distance de 1mm avec une résistance de 4800 Ω.

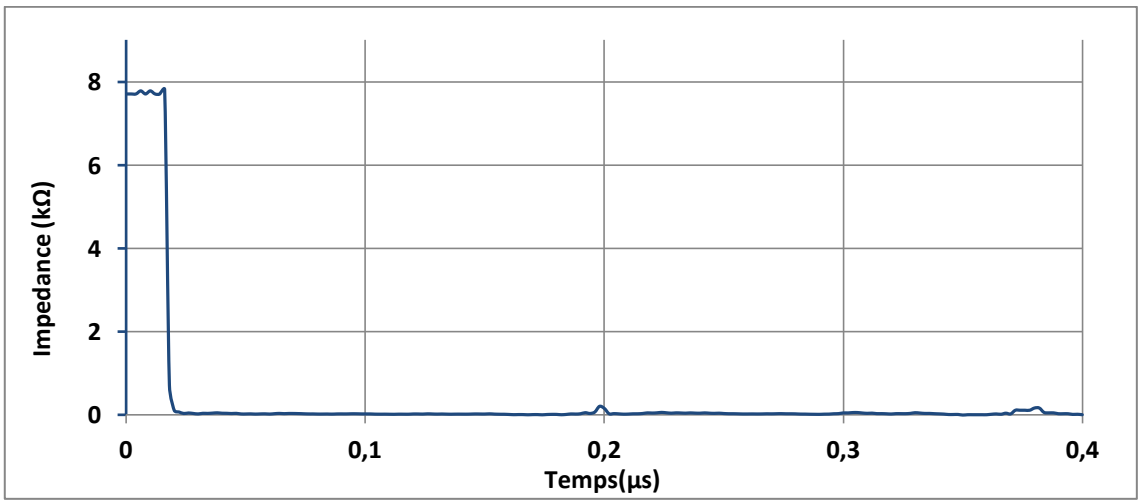


Figure IV.23 : Variation de l'impédance d'huile après claquage pour la distance de 1mm avec résistance de 9600 Ω.

Comme il à été observé pour les variations de l'impédance en fonction de la distance inter-électrode, on remarque aussi que les variations de l'impédance en fonction de la résistance mise en série avec la cellule de test présentent des courbe similaire.

L'impédance chute rapidement d'une amplitude très grande vers zéro, à travers une série des fluctuations. Cette chute rapide est due aux variations brusques du courant et de la tension.

III.15. Comparaison entre l'alternative et l'impulsionnelle

Les tableaux suivants représentent les variations des valeurs de la tension et du courant de claquage pour les différentes distances inter-électrodes 1mm, 2.5mm et 5mm sous tension alternative et impulsionnelle.

Tableau IV.2 : Tensions et courants des claquages pour la tension alternative.

vitesse de Tension (kV/s)	**1mm Gap**		**2.5mm Gap**		**5mm Gap**	
	Tension (kV)	Courant (A)	Tension (kV)	Courant (A)	Tension (kV)	Courant (A)
2	23.37	3.32	36.33	2.54	93.8	5.22

Tableau IV.3 : Tensions et courants des claquages pour la tension impulsionnelle.

La résistance (Ω)	**1mm Gap**		**2.5mm Gap**		**5mm Gap**	
50	Tension (kV)	Courant (A)	Tension (kV)	Courant (kA)	Tension (kV)	Courant (kA)
	54.18	162	102.78	181	218.14	216

D'après les tableaux IV.2, et IV.3, on remarque que pour les trois distances inter-électrodes la tension au moment du claquage pour l'impulsionnel, est très importante par rapport à la tension au moment du claquage pour l'alternatif.

Il est clair que le taux d'augmentation entre la tension alternative et impulsionnelle est d'autant plus important que la distance inter-électrodes augmente.

Pour les variations du courant, on remarque le courant de claquage est plus important pour l'impulsionnel que celui pour l'alternative. Ceci confirme le fait que les grandeurs en impulsionnelles sont très grandes par rapport à celles en alternative, mais avec des temps très courts.

IV.16. Conclusion

Le claquage de l'huile sous tension alternative est caractérisé par une augmentation rapide du courant suivi par une série d'oscillations du courant à différentes amplitudes, avec une série d'augmentations et diminutions de la tension. Ces variations du courant et de la tension au moment du claquage sont similaires pour toutes les distances inter-électrodes et pour toutes les vitesses d'augmentation de la tension.

De même, l'impédance de l'huile chute brusquement d'une valeur maximale à une valeur zéro. Cette chute est suivie par une série d'oscillations jusqu'à la fin du claquage.

La période de claquage est énormément influencée par la distance inter-électrodes et la vitesse d'augmentation de la tension. Si la distance inter-électrodes augmente, le temps pris par le claquage diminue. Aussi, lorsque la vitesse d'augmentation de la tension augmente, le temps pris par le claquage diminue.

Pour la tension impulsionnelle, le claquage est aussi caractérisé par une augmentation brusque du courant et de la tension suivie par une série d'oscillations jusqu'à atteindre les valeurs zéro.

Les valeurs du courant et de la tension au moment du claquage sont influencées par la variation de la distance inter-électrodes et l'insertion d'une résistance en série avec la cellule de test.

L'impédance de l'huile est caractérisée par une chute brusque, avec un petit nombre d'oscillations jusqu'à la valeur zéro.

Conclusion générale

L'objectif de notre travail était d'analyser le comportement dynamique d'une huile minérale isolante utilisée dans les transformateurs de puissance, sous tension alternative et impulsionnelle. Les résultats nous ont permit de tirer les points suivants :

Pour une tension alternative

- ✓ L'influence de la distance inter-électrodes sur la tension de claquage de l'huile ainsi que sa rigidité diélectrique est assez importante par rapport à l'influence de la vitesse d'augmentation de la tension. Toutefois, la tension de claquage augmente si la distance inter-électrodes augmente, tandis que la rigidité diélectrique diminue. Ceci est dû essentiellement au renforcement du champ électrique entre les électrodes lorsque la distance est petite.
- ✓ Le claquage de l'huile sous tension alternative est caractérisé par une augmentation rapide du courant suivi par une série d'oscillations du courant à différentes amplitudes, avec une série d'augmentations et diminutions de la tension. Ces variations du courant et de la tension au moment du claquage sont similaires pour toutes les distances inter-électrodes et pour toutes les vitesses d'augmentation de la tension.
- ✓ Le claquage est aussi caractérisé par une chute brusque de la valeur d'impédance jusqu'à zéro. Cette chute est suivie par une série d'oscillations jusqu'à la fin du claquage.
- ✓ La période de claquage est énormément influencée par la distance inter-électrodes et la vitesse d'augmentation de la tension. Si la distance inter-électrodes augmente, le temps pris par le claquage diminue. Aussi, lorsque la vitesse d'augmentation de la tension augmente, le temps pris par le claquage diminue.

Pour une tension impulsionnelle

- ✓ le claquage est caractérisé par une augmentation brusque du courant et de la tension suivie par une série d'oscillations jusqu'à atteindre les valeurs zéro.
- ✓ L'impédance de l'huile est caractérisée par une chute brusque, avec un petit nombre d'oscillations jusqu'à la valeur zéro.
- ✓ Les valeurs du courant et de la tension au moment du claquage sont influencées par la variation de la distance inter-électrodes et l'insertion d'une résistance en série avec la cellule de test.

En perspective, une étude de l'huile est proposée pour modéliser l'impédance de l'huile au moment de claquage, et comparer les résultats pratiques par ceux de la simulation.

Bibliographie

[1] S. Bouazabia, « Les huiles isolantes de transformateur », séminaire sur les huiles isolantes de transformateur, ENP Jan 1999.

[2] N. Berger, « Liquides isolants en électrotechnique – Présentation générale », Techniques de l'Ingénieur, Traité de génie électrique, D2470, Mai 2002.

[3] P. Christophe, « Etude des huile et des mélanges à base d'huile minérale pour transformateur de puissance recherche d'un mélange optimale », Thèse de doctorat, l'école centrale de Lyon, année 2005.

[4] M. Naouel, « Diagnostic des transformateur de puissances », Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou 2010.

[5] N. Berger, « Liquides isolants en électrotechnique – Caractéristiques des produits », Techniques de l'Ingénieur, Traité de génie électrique, D2471, Nov. 2002.

[6] P.J. Vuarchex, « Caractéristiques des diélectriques liquides » Technique d'ingénieur traité K 714, jan 1998.

[7] S. Abdi, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile de transformateur », Thèse de doctorat, l'Ecole national polytechnique, Juin 2012.

[8] A. Boubakeur, « vieillissement de l'huiles des transformateurs »,Conference ARELEC, Nov 2011.

[9] Dj. Belkacemi, « Etude des caractéristiques des matériaux isolants pour transformateurs », Thèse de Magister en Electrotechnique, Juin 2012.

[10] Norme CEI 60156, « Liquides isolants – Mesure de la tension de claquage à fréquence industrielle - Méthode d'essai », Août 1995.

[11] Norme ISO 3016, « Petroleum and its Product- Détermination of pour point », 1994.

[12] Norme ISO 3675, « Pétroles bruts et produits pétroliers liquides - Détermination en laboratoire de la masse volumique ou de la densité relative - Méthode à l'aréomètre », Juin 1998.

[13] P.J. Vurchex, « carctirestique des liquides diélectrique », technique de l'ingénieur K717, jan 1988.

[14] Norme CEI 296, « Spécifications des huiles minérales isolants neuves pour transformateurs et appareillage de connexion », Aout 2004.

[15] P.J. Vuarchex, « Huiles minérales isolantes », Techniques de l'ingénieur, D231, 1986.

[16] M. Mohammedi, « Schémas et Automates Programmables », Master Commande électrique, Université Mohamed Khider – Biskra, 2011/2012.

Bibliographie

[17] A. Boubakeur, « Claquage des diélectriques liquides », Article E.N.P, jan 2004.

[18] R. Tobazeon, « Préclaquage et claquage des liquides diélectriques », Techniques de l'Ingénieur, Traité de génie électrique, D2450, Nov 1997.

[19] Viet Hung Dang, « Etude des phénomènes de préclaquage et de claquage des huiles végétales, minérales et synthétiques – caractérisation des décharges aux interfaces », Thèse de Doctorat, École centrale de Lyon, Mars 2011.

[20] A. Tilmatine «Techniques de la haute tension», Cours de HT université Djillali liabes.

[21] W. Rottenberg, « Étude des phénomènes de préclaquage dans les huiles isolantes dans des systèmes d'électrodes couverts de couches mines », Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon, 2000.

[22] A. Zouaghi, « Étude de l'influence des barrières isolantes sur la tenue diélectrique d'intervalles d'huile en chocs de foudre et en continu», Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon, 1997.

[23] S. Abdi, A. Boubakeur, A. Haddad, and N. Harid, « Investigation on Transformer Oil Impedance during Breakdown under Impulse Voltage», Electrical insulation confirance, USA, 2014.

[24] S. Abdi, A. Boubakeur, N. Harid and A. Haddad, « Investigation on transformer oil impedance during breakdown under AC voltage », IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectrics Phenomena (CEIDP), pp. 549-552, USA, 18-21 October 2009.

[25] IEC 60060-1, « High-voltage test techniques Part 1: General definitions and test requirements », 2010.

[26] S. Abdi, « Rappelle sur le champs électrique », cours de HT pour 3^{eme} année licence reseau, 2011.

[27] S. Abdi, A. Boubakeur, N. Harid and A. Haddad, « Dynamic characteristics of Breakdown in transformer oil under AC voltage », Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), pp. 1-6, Cape Town (South Africa), August 2009.

[28] V. Wasserberg, H. Borsi and E. Gokenbakh, « A novel system for the prolongation of life time of power transformer by reduced oxidation and ageing », IEEE Conference Record of the International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), pp. 233-236, Indianapolis (USA), 19-22 September 2004.

Bibliographie

[29] J.M. Lehr, F.J. Agee, R. Copeland and W.D. Prather, « Measurement of the Electric Breakdown strength of transformer oil in the sub-nanosecond regime », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, n°6, pp. 857-861, Dec 1998.

[30] R. Tobazeon, « Conduction électrique dans les liquides », Techniques de l'Ingénieur, Traité de génie électrique, D2430, Nov 1996.

[31] A. Beroual and R. Tobazeon, « Prebreakdown phenomena in liquid dielectrics », IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-21, n°4, pp. 613-627, August 1986.

[32] C. T. Duy, O. Lesaint, N. Bonifaci, A. Denat and Y. Bertrand, « High voltage Breakdown and pre-breakdown properties in rape-seed insulating oil », IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 623-626, 14-17, Oct 2007.

[33] M. Kohtoh, G. Ueta and S. Okabe, « Transformer insulating oil characteristics changes observed using accelerated degradation in consideration of field transformer condition », 134 IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 17, n°3, pp. 808-818, Jun 2010.

[34] M. Kohtoh, S. Kaneko, S. Okabe and T. Amimoto,« Aging effect on electrical characteristics of insulating oil in field transformer », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, n°6, pp. 1698-1706, Dec 2009.

[35] O. Shigemitsu, T. Toshihiro, and U. Genyo, « Study on Lightning Impulse Test Waveform for UHV-class Electric Power Equipment », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical insulation, Vol. 19, No. 3, Jun 2012.