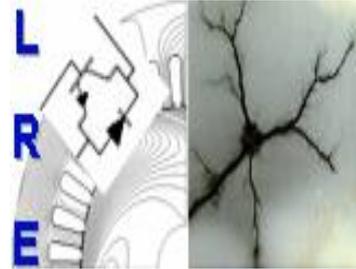


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
**Ecole Nationale Polytechnique**



**Département d'ELECTROTECHNIQUE**  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'  
**Ingénieur d'Etat en Electrotechnique**

Intitulé

**Décharges partielles dans l'isolation des circuits d'un véhicule électrique**

Présenté par

**Taibi Ahmed Wissam Eddine**

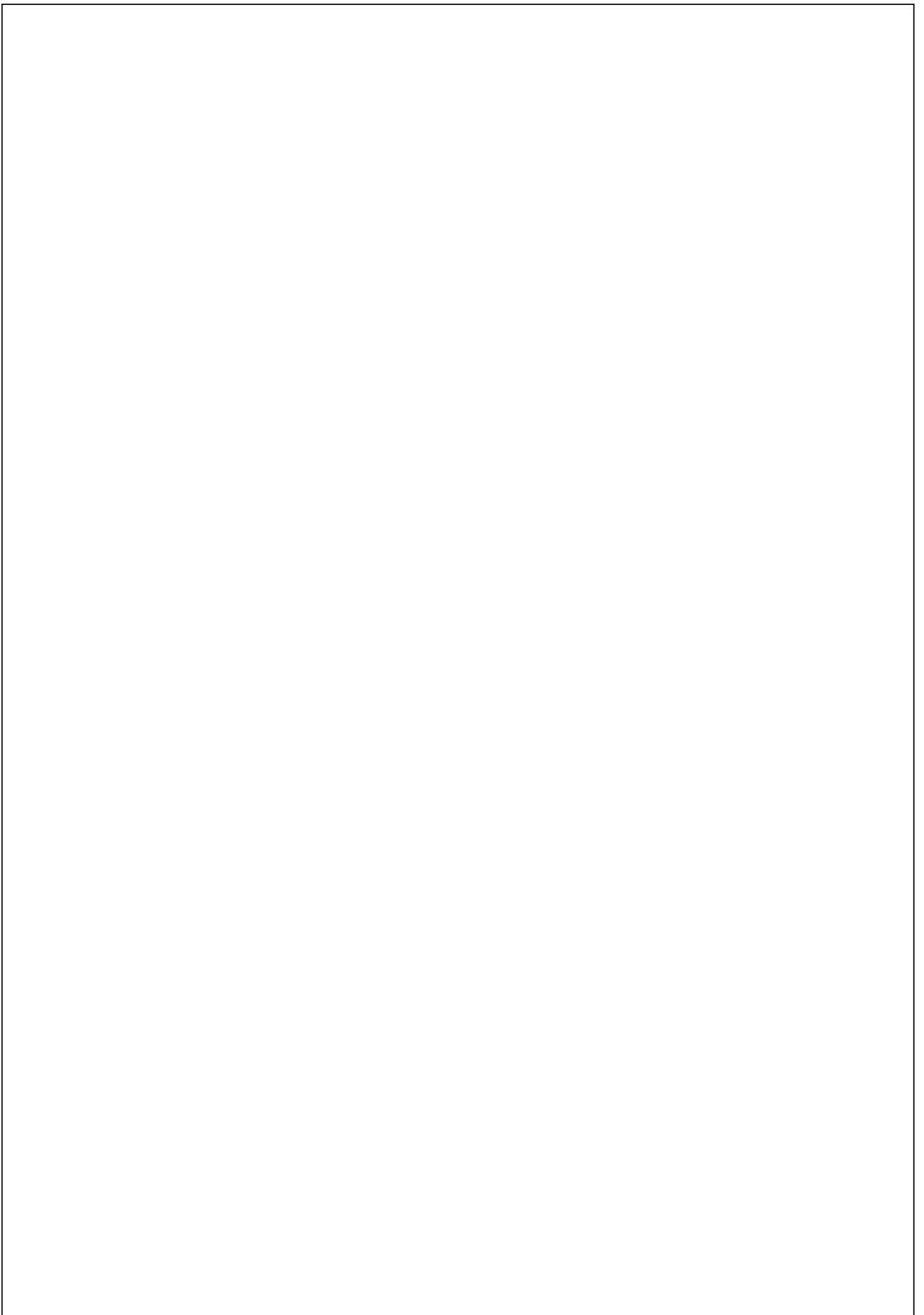
Sous la direction de **Pr A Mekhaldi** et **Pr A.Boubakeur**  
Soutenu publiquement le 19 juin 2018

**Membres du Jury**

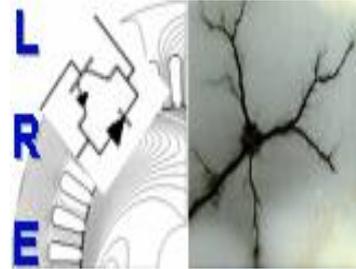
Président :	M.Teguar , Professeur à l'ENP
Rapporteur :	A.Boubakeur, Professeur à l'ENP
Rapporteur :	A Mekhaldi, Professeur à l'ENP
Examineur :	R.Tahmi , Professeur à l'ENP

**ENP 2018**

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (LRE) - Ecole Nationale Polytechnique (ENP)  
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
**Ecole Nationale Polytechnique**



**Département d'ELECTROTECHNIQUE**  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'  
**Ingénieur d'Etat en Electrotechnique**

Intitulé

**Décharges partielles dans l'isolation des circuits d'un véhicule électrique**

Présenté par

**Taibi Ahmed Wissam Eddine**

Sous la direction de **Pr A Mekhaldi** et **Pr A.Boubakeur**  
Soutenu publiquement le 19 juin 2018

**Membres du Jury**

Président :	M.Teguar , Professeur à l'ENP
Rapporteur :	A.Boubakeur, Professeur à l'ENP
Rapporteur :	A Mekhaldi, Professeur à l'ENP
Examineur :	R.Tahmi , Professeur à l'ENP

**ENP 2018**

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (LRE) - Ecole Nationale Polytechnique (ENP)  
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

## Remercîment

J'adresse mes sincères remerciements à tous mes professeurs les de l'Ecole National Polytechnique, à tous les Intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches et spécialement

Au Professeur **Ahmed Boubakeur** qui m'a généreusement aidé grâce à son enseignement et ses conseils le long de mon parcours à ENP.

Au Professeur **Abdelouahab Mekhaldi** qui m'a fait confiance et qui m'a aidé dans ce modeste travail par, ses remarques et son orientations.

*Je tiens à exprimer mes meilleurs sentiments de gratitude à Monsieur **Madjid Tegar**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique qui a aimablement accepté de participer à ce jury d'examen.*

*À Monsieur **redoune Tahmi**, Professeur et directeur des études à l'Ecole Nationale Polytechnique qui a aimablement accepté de participer à ce jury d'examen.*

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi, « Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier ». Je remercie mes frères pour leur encouragement. Je remercie très spécialement Redha Wiki, Djilali Lfil, zinou pour leur soutien inconditionnel et leur encouragement, Pour leur sincère amitié et confiance, et à qui je dois ma reconnaissance et mon attachement Je remercie aussi mes amis et mes camarade Reda ,Okba safsaf, Brahim boyka qui ont toujours été là pour moi. ,à Rania saoudi celle qui me sauve la vie tout le temps Je tiens à remercier mon ami d'enfance et mon meilleur ami Said khodjaoui, pour son amitié et son soutien merci mon pote. À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

## ملخص

في هذا العمل درسنا ظاهرة الانهيار الكهربائي, ومظهر التصريف الجزئي في السوائل, استنادا إلى نظرية انهيار مرحلة الغاز ، واستخدام آلية انهيار الحرارية لبناء نموذج لتحديد جهد التفريغ الجزئي وتفريغ الجهد في عزل محركات الجر الكهربائية. يستند العمل على نمذجة تكوينات العزل أو أنظمة العزل الموجودة في المحركات الكهربائية ، من خلال العناصر المحدودة تحت بيئة COMSOL ,ومعالجة البيانات الآلية في بيئة MATLAB

**الكلمات الدالة:** العزل الكهربائي ، التصريف الجزئي ، العناصر المحدودة ، COMSOL ، MATLAB

## Abstract

The present work deals with the study of insulation by liquid dielectrics in rotating machines. This work we studied the phenomenon of breakdown and appearance of partial discharges in liquids based on the theory of gas phase breakdown, and using the thermal breakdown mechanism to construct a model to determine the partial discharge discharge voltage and the breakdown voltage in the insulation of electric traction motors. The work is based on the modeling of Insulation configurations or insulation systems present in electric motors, by finite elements under the COMSOL environment and automatic data processing in the MATLAB environment

**Keywords:** electrical insulation, partial discharges, finite elements, COMSOL, MATLAB

## Résumé

Le travail présent porte sur l'étude de l'isolation par les diélectriques liquides dans les machines tournantes. Dans ce travail nous avons étudié le phénomène de claquage et d'apparition des décharge partielles dans les liquides, en se basant sur la théorie du claquage par phase gazeuse, et en utilisant le mécanisme de claquage thermique pour construire un modèle permettant de déterminer la tension d'apparition des décharge partielles et la tension de claquage dans l'isolation des moteurs de traction électriques. Le travail est basé sur la modélisation des configurations d'isolement ou systèmes d'isolation présents dans les moteurs électriques, par éléments finis sous l'environnement COMSOL et un traitement de données automatique sous l'environnement MATLAB.

**Mots-clés :** isolation électrique, décharges partielles, éléments finis, COMSOL, MATLAB.

## Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction .....	9
Les diélectriques liquides .....	10
1.1 Types des diélectriques liquides .....	10
1.2 Propriétés physico-chimiques des diélectriques liquides.....	12
1.2.1 Propriétés électriques :.....	12
1.2.1.1 Permittivité .....	12
1.2.1.2 Résistivité / Conductivité.....	12
1.2.1.3 Facteur de dissipation .....	13
1.2.1.4 Rigidité diélectrique et tension de claquage .....	14
1.2.2 Propriétés thermiques .....	14
1.2.2.1 Capacité thermique .....	15
1.2.2.2 La conductivité thermique.....	15
1.2.2.3 Masse volumique .....	15
1.3 Les mécanismes de claquages dans les diélectriques liquides .....	16
1.3.1 Claquage Electronique : .....	17
1.3.2 Claquage par pont de particules .....	18
1.3.3 Mécanisme de claquage par phase gazeuse.....	19
1.3.3.1 Mécanisme thermique .....	19
1.3.3.2 Claquage par cavitation.....	19
1.4 Préclaquage des diélectriques liquides .....	20
1.5 Conclusion :.....	21
2 Chapitre 2 Modélisation des configurations d'isolement de la motorette sous COMSOL.....	22
2.1 Présentation de l'isolement des moteurs.....	22
2.2 Modélisation de l'isolement sous COMSOL.....	23
2.2.1 Système entre spires.....	24
2.2.2 Système entre phase et masse.....	24
2.3 Etude des configurations : .....	25
2.3.1 Champ et potentiel électrique : .....	25
2.3.2 Echauffement et pertes Joules : .....	27
2.4 Conclusion :.....	30
3 Mise en équation de la phase de préclaquage :.....	31
3.1 Modélisation en vue de simulation du phénomène de claquage.....	31
3.2 Détermination de la capacité du schéma équivalent.....	33
3.3 Couplage électrothermique lors de la phase de pré décharge .....	34
4 Résultats et interprétations.....	36
4.1 Système entre spires .....	36
4.1.1 Estimation primaire : .....	36
4.1.1.1 Conclusion : .....	37

4.1.2	Influence de la taille de l'email.....	38
4.1.2.1	Influence de la taille de l'email sur la tension de claquage :.....	38
4.1.2.2	Influence de la taille de l'email sur la TADP :.....	39
4.1.2.3	Conclusion :.....	39
4.1.3	Influence de la distance inter électrode .....	40
4.1.3.1	Influence de la distance inter électrode sur la tension de claquage : .....	40
4.1.3.2	Influence de la distance inter électrode sur la TADP : .....	41
4.1.3.3	Conclusion :.....	41
4.1.4	Influence du désémaillage .....	42
4.1.4.1	Influence du désémaillage sur la tension de claquage :.....	42
4.1.4.2	Influence du désémaillage sur la TADP : .....	43
4.1.4.3	Conclusion.....	43
4.1.5	Influence des conditions de température et de pression.....	44
4.1.5.1	Influence de la température .....	44
4.1.5.1.1	Influence de la température sur l'énergie de vaporisation : .....	44
4.1.5.1.2	Influence de la température sur la tension de claquage : .....	45
4.1.5.1.3	Influence de la température sur la TADP : .....	46
4.1.5.1.4	Conclusion : .....	46
4.1.5.2	Influence de la pression.....	47
4.1.5.2.1	Influence de la pression sur l'énergie de vaporisation : .....	47
4.1.5.2.2	Influence de la pression sur la tension de claquage : .....	47
4.1.5.2.3	Influence de la pression sur la TADP.....	48
4.1.5.2.4	Conclusion : .....	48
4.2	Configuration entre phases et masse.....	49
4.2.1	Estimation primaire .....	49
4.2.1.1	Conclusion :.....	50
4.2.2	Influence de la taille de l'email.....	51
4.2.2.1	Influence de la taille de l'email sur la tension de claquage :.....	51
4.2.2.2	Influence de la taille de l'email sur la TADP :.....	52
4.2.2.3	Conclusion :.....	52
4.2.3	Influence de la distance inter électrode .....	53
4.2.3.1	1.3.1 Influence de la distance inter électrode sur la tension de claquage :.....	53
4.2.3.2	Influence de la distance inter électrode sur la TADP : .....	54
4.2.3.3	Conclusion :.....	54
4.2.4	Influence du désémaillage .....	55
4.2.4.1	Influence du désémaillage sur la tension de claquage :.....	55
4.2.4.2	Influence du désémaillage sur la TADP : .....	56
4.2.4.3	Conclusion.....	56
4.2.5	Influence des conditions de température et de pression.....	57
4.2.5.1	Influence de la température .....	57

4.2.5.1.1	Influence de la température sur la tension de claquage : .....	57
4.2.5.1.2	Influence de la température sur la TADP : .....	58
4.2.5.1.3	Conclusion : .....	58
4.2.5.2	Influence de la pression.....	59
4.2.5.2.1	Influence de la pression sur la tension de claquage : .....	59
4.2.5.2.2	Influence de la pression sur la TADP : .....	59
4.2.5.2.3	Conclusion : .....	60
5	Conclusion : .....	61
BIBLIOGRAPHIE .....		62

## Liste des Tableaux

Tableau 1: Différents diélectriques liquides et leurs domaines d'application [1] .....	11
Tableau 2: champ électrique en fonction de la tension appliquée .....	26
Tableau 3 variation e la température en fonction de la tension .....	29
Tableau 4:tension de claquage en fonction de l'épaisseur de l'email .....	38
Tableau 5: tension de claquage en fonction de l'épaisseur de l'email.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Tableau 6:TADP en fonction de l'épaisseur de l'email .....	39
Tableau 7:TADP en fonction de la distance.....	41
Tableau 8:Tension de claquage en fonction du désémaillage .....	42
Tableau 9: TADP en fonction du désémaillage .....	43
Tableau 10: énergie consommée en fonction de la température .....	44
Tableau 11: énergie consommée en fonction de la pression .....	47
Tableau 12 tension de claquage en fonction de la pression.....	47
Tableau 13: : TADP en fonction de la pression.....	48
Tableau 14 : tension de claquage en fonction de l'épaisseur de l'email (spire masse) .....	51
Tableau 15 :TADP en fonction de l'épaisseur de l'email (spire masse) .....	52
Tableau 16:Tension de claquage en fonction de la distance (spire masse).....	53
Tableau 17TADP en fonction de la distance (spire masse).....	54
Tableau 18: Tension de claquage en fonction du désémaillage (spire masse) .....	55
Tableau 17 : Tableau 19 TADP en fonction du désémaillage (spire masse) .....	56
Tableau 20 tension de claquage en fonction de la température (spire masse) .....	57
Tableau 21 : TADP en fonction de la température (spire masse).....	58
Tableau 22: tension de claquage en fonction de la pression (spire masse) .....	59
Tableau 23: TADP en fonction de la pression (spire masse) .....	59

## Liste des Figures

Figure 1 Représentation schématique de l'angle de pertes .....	14
Figure 2: Schéma d'isolation d'un moteur électrique [6] .....	22
Figure 3 : Motorette fabriquée selon la norme IEEE 117-1974 [6]. .....	23
Figure 4 : Système d'isolation entre spires. ....	24
Figure 5: Maillage du système d'isolation entre spires. ....	24
Figure 6 : Système d'isolation entre phase et masse. ....	25
Figure 7: Maillage du système d'isolation entre phase et masse .....	25
Figure 8 Champs électrique simulé (configuration entre spires) .....	26
Figure 9: Champ électrique en fonction de la tension appliquée .....	27
Figure 10: Répartition de la température pour une configuration entre spires .....	28
Figure 11 : Répartition du potentiel électrique pour une configuration entre spires .....	29
Figure 12: variation e la température en fonction de la tension .....	29
Figure 13 variation de l'amplitude de la tension fonction du temps [1] .....	31
Figure 14 schéma équivalent.....	31
Figure 15 domaine d'étude (configuration entre spires).....	33
Figure 16 variation de la température en fonction de la tension .....	35
Figure 17: évolution du rayon de la bulle de gaz en fonction de la tension appliquée .....	36
Figure 18: isolation système entre spires .....	38
Figure 19: TADP en fonction de l'épaisseur de l'émail .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 20: isolation système entre spires .....	40
Figure 21 : Tension de claquage en fonction de la distance .....	41
Figure 22: TADP en fonction de la distance .....	41
Figure 23: Désémaillage .....	42
Figure 24: Tension de claquage en fonction du désémaillage .....	42
Figure 25: TADP en fonction du désémaillage .....	43
Figure 26: énergie consommée en fonction de la température .....	45
Figure 27: tension de claquage en fonction de la température.....	45
Figure 28: énergie consommée en fonction de la pression.....	47
Figure 29: tension de claquage en fonction de la pression .....	47
Figure 30 : TADP en fonction de la pression .....	48
Figure 31 évolution du rayon de la bulle de gaz en fonction de la tension appliquée (entre phases et masse) ..	49
Figure 32: isolation système spire masse .....	51
Figure 33: tension de claquage en fonction de l'épaisseur de l'émail (spire masse).....	52
Figure 34: TADP en fonction de l'épaisseur de l'émail (spire masse) .....	52
Figure 35: Tension de claquage en fonction de la distance (spire masse) .....	53
Figure 36: TADP en fonction de la distance (spire masse).....	54
Figure 37 : Désémaillage (spire masse).....	55
Figure 38: Tension de claquage en fonction du désémaillage (spire masse) .....	55
Figure 39 : TADP en fonction du désémaillage (spire masse) .....	56
Figure 40: tension de claquage en fonction de la température (spire masse) .....	57
Figure 41: TADP en fonction de la température (spire masse) .....	58
Figure 42 tension de claquage en fonction de la pression (spire masse) .....	59
Figure 43: TADP en fonction de la pression (spire masse).....	60

## Introduction

La dégradation des matériaux isolants des machines électriques du point de vue électrique est due principalement à la présence des décharges partielles. L'objectif de notre travail, sera de déterminer le niveau seuil de tension susceptible de produire des décharges partielles dans les liquides qui sont utilisés comme isolants dans les moteurs de tractions électriques de l'entreprise Renault. .

Grâce à la modélisation des configurations types de l'isolation des machines électriques et à la simulation du phénomène de claquage et en tenant compte de plusieurs paramètres influent sur l'apparition de décharges telles que la géométrie des systèmes d'isolation, les dimensions et les propriétés des isolants, les conditions de pression et de température ; ainsi que la présence de défauts (désémaillage, espacements entre isolants...).

Le chapitre 1 est dédié à la présentation des diélectriques liquides et les notions physiques liées à notre sujet. Nous commençons d'abord par la classification des diélectriques liquides et leurs domaines d'application [1]. Par la suite, nous présentons les propriétés physico-chimiques des diélectriques liquides [2] ainsi que présentons les mécanismes de claquage dans ces derniers [4-5]. Le but de ce chapitre est de présenter les notions de base nécessaires à l'étude de l'apparition des décharges partielles et du claquage des isolations liquides dans les moteurs électriques.

Dans le chapitre 2 nous commençons par présenter les différentes parties du système d'isolation électrique dans les moteurs électriques [2]. Par la suite nous modélisons les configurations d'isolation sous l'environnement COMSOL Multiphysics. Dans ce chapitre nous allons aussi faire quelques exemples de simulations sur COMSOL Multiphysics pour mettre en évidence l'étroite liaison entre l'application d'un potentiel électrique aux phases du moteur et la répartition du champ électrique dans l'isolation d'une part, et, l'échauffement induit dans le diélectrique liquide d'autre part.

Le chapitre 3 est dédié à l'élaboration d'un modèle analytique permettant d'estimer la tension de claquage et la tension d'apparition des décharges partielles dans l'isolation. Dans cette partie de l'étude nous proposons un schéma électrique équivalent caractérisant le phénomène de préclaquage et dont les paramètres sont déterminés en utilisant l'environnement COMSOL Multiphysics. Par la suite nous identifions l'énergie fournie par le système d'électrode à l'énergie nécessaire à la création d'une bulle de gaz dans le diélectrique liquide afin de déterminer une équation reliant la tension appliquée au système au rayon de la bulle de gaz créée.

Le chapitre 4 est consacré à l'évaluation de la rigidité des configurations types d'isolation dans les moteurs électriques. Dans ce chapitre nous étudions la variation de la tension de claquage par rapport à plusieurs facteurs tel que la distance entre électrodes, la dimension de l'émail, la température et la pression.

# Les diélectriques liquides

Les isolants électriques ou les diélectriques sont des matériaux ayant une conductivité électrique faible. Ils peuvent être de nature solide, liquide ou gazeux, Cependant au-delà d'une certaine valeur de tension appliquée ou de champ électrique, tous les isolants deviennent des conducteurs électriques. Ce phénomène de transition est caractérisé par la notion de rupture diélectrique ou de rigidité diélectrique. La valeur de la rigidité diélectrique des liquides n'est pas une donnée universelle car elle dépend d'un ensemble de paramètres : le type de liquide considéré, la forme de l'onde de tension appliquée (continue, alternative, impulsionnelle), l'homogénéité du champ électrique, la polarité, la présence d'impuretés...

## 1.1 Types des diélectriques liquides

Il est difficile de choisir un système de classification des liquides isolants. Nous pouvons par exemple choisir de les classer en fonction de leurs origines (tableau 1). Quatre principales catégories ressortent de cette classification :

Les huiles végétales : ce sont des liquides naturels et biodégradables mais qui présentent une faible résistance à l'oxydation et une faible rigidité diélectrique. En conséquence, ces huiles sont relativement peu utilisées [1].

Les huiles minérales : ce sont des produits naturels obtenus après raffinage puis distillation du pétrole. En fonction de l'origine du brut on distingue les huiles naphthéniques des huiles paraffiniques. Le faible coût de ces huiles couplé à une rigidité diélectrique intéressante conduit à leur utilisation massive dans les équipements électriques Hautes Tension tels que les transformateurs, les diviseurs, les disjoncteurs ou encore les câbles [1].

Les liquides de synthèse : ces liquides présentent l'avantage d'être d'une composition chimique plus simple que les huiles minérales. Ils possèdent donc des propriétés plus stables. Leur coût étant élevé, ils sont utilisés chaque fois que les performances demandées ne sont pas atteintes par les huiles minérales. C'est notamment le cas lorsqu'il s'agit d'améliorer la résistance au feu (transformateurs) ou lorsque l'on recherche une meilleure stabilité thermique et de grandes performances diélectriques (câbles et condensateurs) [1].

L'eau : c'est un liquide de permittivité relative très élevée ( $\epsilon_r = 80$ ) dont la conductivité électrique varie de quelques dixièmes à plusieurs centaines de  $\mu\text{S}/\text{cm}$  [1]

<b>Origine</b>		<b>Applications</b>	<b>Caractéristiques Propres</b>
Huiles Végétales		Isolation Condensateurs	Biodégradable Faible coût
Huiles Minérales		Matériels à haute tension	Bas point d'écoulement Stabilité à l'oxydation Bon indice de viscosité
Liquides isolants synthèse	Hydrocarbures de synthèse	Câbles  Traversées  Condensateurs	Faibles pertes diélectriques Viscosité ajustable Absorption gazeuse sous décharges partielles Bonne rigidité diélectrique au choc de foudre, Biodégradabilité
	Hydrocarbures halogènes	Transformateurs de distribution Condensateurs Transformateurs	Ininflammabilité et biodégradabilité
	Esters organiques	Condensateurs pour générateur de choc Condensateurs au papier Remplacement des PCB en mélange avec d'autres liquides Transformateurs de distribution et de traction	Faibles pertes diélectriques à $f > 1000\text{Hz}$ et $\epsilon_r > 5$ à $20^\circ\text{C}$ Utilisés pour augmenter le point de feu des liquides $> 300^\circ\text{C}$
	Huiles silicones	Transformateurs de distribution et de traction	Bon indice de viscosité ; point de feu $> 300^\circ\text{C}$ Absorption gazeuse sous décharges partielles
	Liquides divers	Condensateurs Matériels cryogéniques et supraconducteurs	$\epsilon_r > 3$ à $20^\circ\text{C}$ Adaptabilité Réduction ou suppression de perte Joule
	Eau	Ligne de transmission Commutateur cf. section 1.3	$\epsilon_r = 80$ Faible Coût Très faible viscosité Conductivité de $0,5\mu\text{S/cm}$ à $20\text{mS/cm}$

Tableau 1: Différents diélectriques liquides et leurs domaines d'application [1]

## 1.2 Propriétés physico-chimiques des diélectriques liquides

### 1.2.1 Propriétés électriques :

#### 1.2.1.1 Permittivité

La permittivité est la constante macroscopique fondamentale qui caractérise un diélectrique. Elle est définie par la relation suivante :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$$

où

$\varepsilon$  : est la permittivité absolue de l'huile (F/m) ;

$\varepsilon_0$  : est la permittivité du vide ( $\varepsilon_0 = 1/36 \cdot \pi \cdot 10^9 = 8,85 \text{ pF/m}$ ) ;

$\varepsilon_r$  : est la permittivité relative de l'huile (sans unité).

La permittivité relative  $\varepsilon_r$  est aussi appelé constante diélectrique, elle est définie par le rapport entre la capacité d'un condensateur rempli d'huile ( $C_p$ ) et la capacité du même condensateur sous vide ( $C_0$ ). Dans la pratique, la valeur de référence de  $\varepsilon_r$  est obtenue en comparant le condensateur plein au condensateur dans l'air :

$$\varepsilon_r = C_p / C_0$$

La permittivité est une caractéristique intrinsèque car elle dépend essentiellement de la structure chimique du produit. Elle caractérise la polarité de la molécule. C'est ainsi on peut distinguer les liquides polaires ( $\varepsilon_r > 2,5$ ) des liquides peu polaires ou non polaires ( $1,5 \leq \varepsilon_r \leq 2,5$ ) comme les huiles minérales.

La permittivité décroît avec l'augmentation de la température et de la fréquence. Le milieu dont la permittivité est la plus faible peut supporter une contrainte électrique assez élevée [2].

#### 1.2.1.2 Résistivité / Conductivité

Un isolant électrique doit conduire le moins possible le courant électrique lorsqu'une tension lui est appliquée. Sa résistivité  $\rho$  doit être la plus forte possible inversement sa conductivité  $\sigma$  qui doit être la plus faible possible ( $\rho = 1/\sigma$ ).

La conductivité d'un liquide isolant est due à la présence de charges libres qui se déplacent sous l'effet d'un champ électrique provoquant ainsi un courant de conduction [2].

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 dissociables en ions est forte, et plus la mobilité des ions est grande [2], et par conséquent plus la conductivité est élevée.

La résistivité d'un liquide diminue donc lorsque la température augmente [2]. C'est pour cette raison que la plupart des spécifications des produits indiquent une valeur de résistivité à 90°C (température moyenne de fonctionnement d'un transformateur).

L'ordre de grandeur de la résistivité pour les liquides diélectriques utilisés dans l'industrie varie de  $10^{11}$  à  $10^{17} \Omega.m$  [2].

### 1.2.1.3 Facteur de dissipation

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. La représentation de ces pertes par un schéma équivalent (condensateur C et résistance en parallèle R) permet d'écrire [2] :

$$\tan\delta = 1/R.C.\omega$$

Pour un isolant parfait ( $\sigma = 0$ ), la différence de phase  $\phi$  entre la tension appliquée et le courant qui en résulte est :  $\phi = \pi/2$ . 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,  $\phi + \delta = \pi/2$ , où  $\delta$  est appelée angle de pertes. Plus  $\delta$  est grande, plus les pertes diélectriques seront élevées (Figure 1).

Le facteur de perte  $\tan \delta$  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  $\eta$  [2]. 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  $\tan\delta$  et certains paramètres, tels que l'acidité et les dépôts, ainsi qu'avec l'oxydation de l'huile [2]. C'est pourquoi, dans l'industrie,  $\tan\delta$  est pris comme critère de vieillissement. En effet, une valeur élevée de  $\tan\delta$  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

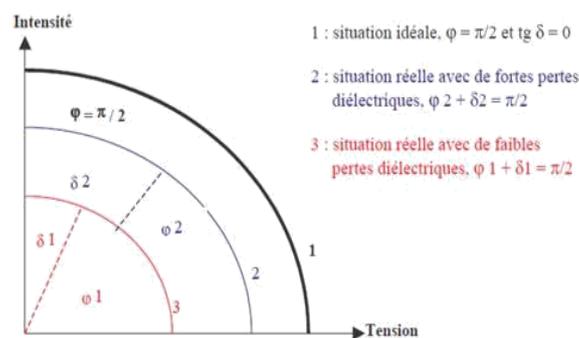


Figure 1 Représentation schématique de l'angle de pertes

Dans les meilleurs cas,  $\tan\delta$  d'une huile neuve traitée est de l'ordre de  $2$  à  $5.10^{-4}$  à  $90^\circ\text{C}$  et peut atteindre en service des valeurs très élevées et supérieures à  $1$ , liées notamment à l'oxydation [2].

#### 1.2.1.4 Rigidité diélectrique et tension de claquage

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 :

$$E_c = U_c / d$$

avec

$E_c$  : est la rigidité diélectrique kV/cm ;

$U_c$  : est la tension de claquage en kV ;

$d$  : est la distance entre les deux électrodes en cm .

Dans l'industrie et pour définir la tenue diélectrique d'un matériau, on parle de la tension de claquage qui désigne l'apparition soudaine d'un arc électrique traversant l'isolation. Les solides ont une tension de claquage supérieure à celle des liquides, et les liquides ont une tension de claquage supérieure à celle des gaz. D'où le liquide est considéré comme étant la partie faible des isolations imprégnées, tout en évitant la présence des gaz. A titre d'exemple, la tension de claquage à 50Hz, à pression atmosphérique, entre des électrodes de diamètre 12,5mm et écartées de 2,5mm, est d'environ 6kV pour l'air. Elle est de 50 à 100kV pour les huiles diélectriques et supérieure à 200kV pour les solides [2].

Dans un liquide, le claquage est le résultat de l'initiation, puis la propagation d'un streamer (canal gazeux ionisé provoquant une décharge lumineuse) d'une électrode à l'autre [2]. Le déclenchement de ce phénomène, outre les propriétés intrinsèques liquide, dépend des conditions de mesure [2] telles que la nature, l'état de surface et la géométrie des électrodes (rayon, écartement), le temps d'application et la forme de la tension (fréquence), la température et la pression, mais aussi de la présence d'impuretés telles que l'eau, les particules solides ou les bulles gazeuses (c'est d'ailleurs pourquoi les huiles subissent toujours un traitement avant leur utilisation). Quand on mesure un grand nombre de fois la tension de claquage d'une huile, la valeur varie d'un essai à l'autre. Cette dispersion due principalement aux impuretés amène à utiliser les transformateurs à des contraintes électriques toujours très inférieures à la rigidité de l'isolant, pour avoir un coefficient de sécurité élevé.

#### 1.2.2 Propriétés thermiques

Les propriétés liées au transfert de chaleur de l'huile sont d'autant importantes que celle de sa fonction principale qui est l'isolation.

### 1.2.2.1 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. Ainsi, pour une huile de transformateur, plus la valeur de chaleur spécifique est élevée, moins le moteur s'échauffera.

La capacité thermique croît avec la température et décroît avec la masse volumique (puisque cette dernière décroît avec la température). Elle s'étend pour les liquides isolants de 1000 à 2300 J/kg.K, et peut être calculée par la relation suivante [2] :

$$E_c = (1684 - 3,39 \cdot \theta) / \sqrt{m_{v15}}$$

avec

$C_p$  : est la chaleur spécifique (J/kg.K) ;

$\theta$  : est la température (K) ;

$m_{v15}$  : est la masse volumique à 15°C.

### 1.2.2.2 conductivité thermique

Elle indique 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 augmentent, et s'étend de manière générale de 0,10 à 0,16 W/m.K pour les liquides isolants. On utilise la formule de Cragoe pour la calculer :

$$\lambda = 0,117 \cdot (1 - a \cdot \theta) / d_{15}$$

avec :

$\lambda$  : est la conductivité thermique (W/m.K) ;

$a$  : est une constante égale à  $5,4 \cdot 10^{-4}$

$\theta$  : est la température (K) ;

$d_{15}$  : est la densité à 15°C ;

### 1.2.2.3 Masse volumique

La masse volumique  $\rho_\theta$  est une caractéristique intrinsèque d'un produit qui dépend de sa composition chimique. Elle est définie comme le rapport d'une masse  $m$  de liquide sur son volume  $V$ , mesurée à la température  $\theta$ , et s'exprime en kilogramme par mètre cube :

$$\rho_\theta = m/V$$

avec

m : est la masse du liquide (kg) ;  
V : est le volume du liquide ( $m^3$ ).

La masse volumique d'une huile est déterminée à 20°C, et s'étend de 800 à 2000  $kg/m^3$ . En effet, il est préférable de prendre des huiles ayant une masse volumique inférieure à celle de l'eau ( $1000 kg/m^3$ ), pour que cette dernière ne vienne pas à la surface de l'huile en cas d'émulsion et conduise à l'apparition d'arcs électriques.

La masse volumique diminue quand la température augmente. Le coefficient de dilatation volumique  $\alpha_v$  ( $K^{-1}$ ) caractérise cette variation. Il varie de  $5.10^{-4}$  à  $10.10^{-4} K^{-1}$  et peut être écrit sous la forme suivante [2]

$$\rho_\theta = \rho_{20}(1 - \alpha_v \cdot [\theta - 20])$$

avec

$\rho_\theta$  : est la masse volumique de l'huile à la température  $\vartheta$  ( $kg/m^3$ )  
 $\rho_{20}$  : est la masse volumique de l'huile à 20°C ( $kg/m^3$ )  
 $\theta$  : est la température de l'huile (°C)  
 $\alpha_v$  : est le coefficient de dilatation volumique ( $K^{-1}$ )

### 1.3 Les mécanismes de claquages dans les diélectriques liquides

L'état général des connaissances sur le claquage électrique des diélectriques liquides est moins avancé que dans le cas de gaz ou solides. La raison principale pour cette situation est la grande variété des liquides utilisés ainsi que des additifs qui leur sont joint.

Les plus importants travaux publiés sur le sujet ont été données par Lewis, **Sharbaugh** et **Watson**, par **Swann** et par **Beroual**. Leur travail fait sortir deux écoles de pensée très distinctes. Notons que **Beroual** a montré que les deux pensées sont complémentaires [4].

Ainsi, les principaux mécanismes peuvent être présentés en ce qui concerne le claquage des diélectriques liquides :

- Mécanisme électronique,
- 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. Ce dernier mécanisme est le plus proche de celui concernant les huiles de transformateur. Ces dernières sont soumises à différentes contraintes en exploitation, plus particulièrement au vieillissement électrique et au vieillissement thermique en présence d'impuretés de différentes natures. Ajoutons à cela, les phénomènes EHD et d'électrisation.

### 1.3.1 Claquage Electronique :

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. Le courant cathodique tient son origine des mécanismes d'émission par effet de champ et d'émission thermoélectronique [4].

D'après **Von Hippel** : la condition limite d'apparition d'une ionisation électronique des particules du liquide est donnée par [4] :

$$e.E.\lambda = C.h.\mu$$

Où

$E$  : est le champ appliqué (V/m)

$\lambda$  : est le libre parcours moyen de l'électron (m)

$h\mu$  : est le quantum d'énergie perdu par ionisation de la molécule (eV)

$C$  : est une constante arbitraire (sana unité)

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 diélectrique  $E_R$  peut être formulée par [4] :

$$E_R = \frac{C.h.\mu_{C-H}}{e} N \sum n_i q_i$$

où

$h$  : est la constante de Planck (J/s) ;

$\mu_{C-H}$  : est fréquence de vibration des liaisons C-H ( $s^{-1}$ ) ;

$N$  : est le nombre de particules par unité de volume ;

$n_i$  : est nombre de groupes (CH, CH<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>) dont la section efficace correspond à la collision avec un électron de charge  $q_i$  ;

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 [4] :

$$E_R = \frac{h.\mu_{C-H}}{e} d.l.N(n-1) \frac{\delta}{M} A$$

où

$\mu_{C-H}$  : est la fréquence de vibration des liaisons chimiques C-C ( $s^{-1}$ ) ;  
d : est la distance moyenne entre les axes des molécules (m) ;  
l : est la longueur de la projection des liaisons C-C sur l'axe des molécules (m).  
N : est le nombre d'atomes de carbone dans la molécule ;  
 $\delta$  : est la densité du liquide ;  
M : sa masse moléculaire (g/mol) ;  
A : le 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.

Cependant, la théorie électronique est moins satisfaisante quand elle est utilisée pour prévoir les temps de retard de claquage. Les temps de retard observés dans les liquides isolants sont beaucoup plus longs que ce qui est prévu par la théorie électronique.

### 1.3.2 Claquage par pont de particules

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 ( $\epsilon_{impuretés/solides} > \epsilon_{liquide}$ ).

Pour qu'un pont de particules se forment 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) [4].

Parmi les théories de claquage par pont, la plus connue est celle de *Kok*. Son critère 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).

### 1.3.3 Mécanisme de claquage par phase gazeuse

#### 1.3.3.1 Mécanisme thermique

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

**WASTON** et **SHARBOUGH** ont établi un critère de claquage vérifié dans les n-alcanes, en identifiant les deux énergies ci-dessus ( $\Delta H=H$ ) :

$$\Delta H = m(C_p(T - T_0) + L_v) \quad \text{Et} \quad H = aE^{3/2}\tau$$

Une fois que la bulle est formée le claquage est le résultat de la bulle en croissance à une taille critique ou par son allongement total de l'intervalle. Dans l'un ou l'autre cas la décharge suit la faible rigidité diélectrique de vapeur [5].

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 [5].

#### 1.3.3.2 Claquage par cavitation

Les expériences ont montré une forte influence de la pression hydrostatique sur le champ disruptif d'un liquide isolant, indiquant qu'un changement de phase peut être impliqué dans l'état critique du développement de claquage. 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 déformation, d'expansion et de disparition de la cavité. Elle peut se produire dans le liquide ou sur les parois. Kao a proposé un mécanisme de claquage par bulles. La bulle est supposée être formée par un des procédés suivants :

- Des poches de gaz sur la surface des électrodes.
- Répulsion électrostatique des charges d'espace qui peuvent être suffisantes à créer une tension de surface.
- Dissociation de produits par collisions des électrons donnant une augmentation de produits gazeux.
- Vaporisation du liquide par des décharges de type couronne produits par les points et irrégularités sur les électrodes.

Une fois que la bulle est formée, elle tendra à s'allonger dans la direction de E de telle sorte à minimiser son énergie potentielle dans le champ. Pour obtenir le critère de claquage, **Kao** a supposé que le volume de la bulle reste constant pendant son allongement et le claquage

survient quand la chute de tension le long de la bulle atteint la valeur minimale sur la courbe de Paschen pour un gaz donné dans la bulle [5].

#### 1.4 Préclaquage des diélectriques liquides

Avant le claquage, où se développe l'arc, il existe une période de pré-disruptive dans laquelle on voit l'apparition et le développement de petites décharges appelées « streamers ». Cette période comprend elle-même deux phases :

- Phase de génération correspondant à l'apparition d'une perturbation (de quelques mm de diamètre) au voisinage de l'électrode. L'instabilité à la surface de cette perturbation conduit à la génération de structures plus ou moins ramifiées : le streamer. L'origine de cette génération est due à l'injection et multiplication localisées de charges dans le liquide
- Phase de propagation de la perturbation précédemment créée (le streamer). La perturbation observée dans la phase de génération est une bulle de gaz résultant d'un échauffement local du liquide. Sa génération suit les premières impulsions de courants lorsque la tension est augmentée progressivement. Chaque impulsion de courant résulterait d'une avalanche électronique en phase liquide.

Il se dégage des théories existantes, deux conceptions différentes. La première est basée sur le phénomène d'ionisation en avalanche dans le liquide (comme dans les gaz) donnant lieu à une phase gazeuse ionisée. Par contre, la deuxième est basée sur le phénomène d'ionisation en avalanche dans les bulles de gaz résultant d'une vaporisation locale du liquide [4].

**KATTAN** et **AI** ont observé juste après un premier pic de courant, la formation d'une première bulle gazeuse, qui pour eux est la conséquence d'une avalanche électronique dans le liquide suivie d'une vaporisation. Ils établissent une relation entre l'énergie injectée  $W$ , la pression  $P$  appliquée au liquide et le rayon maximum  $R_m$ , de la bulle générée par [5].

$$R_m = k_R \left( \frac{W}{P} \right)^{1/3} \quad \text{Avec} \quad k_R = \left( \frac{3RT_b}{4\pi} U_{int} \right)^{1/3}$$

Où

$R$  est la constante des gaz parfaits,

$T_b$  la température de vaporisation du liquide

$U_{int}$  l'énergie nécessaire à vaporiser localement le liquide.

Ils estiment que dans la phase gazeuse de la première bulle, les électrons peuvent être accélérés sous l'action du champ électrique et acquérir une énergie importante afin d'y favoriser les décharges et conduire à la formation de bulles successives [5].

**WATSON** et **SHARBAUGH** considèrent que le claquage est dû à des phénomènes d'ionisation en avalanche dans une bulle qui résulterait de la vaporisation d'une masse  $m$  de diélectrique liquide aux voisinages d'aspérités cathodiques où l'énergie  $H$  nécessaire à la vaporisation est :

$$H = m[C_p(T_v - T_0) + L_v]$$

Avec  $C_p$ ,  $L_v$ ,  $T_0$  et  $T_b$  respectivement la chaleur spécifique, la chaleur latente de vaporisation, la température ambiante et la température d'ébullition [5].

Ils ont aussi établi une relation reliant le champ E et l'énergie H en supposant le courant limité par charge :

$$H = a_{cte} E^{1/2} \tau_s$$

avec

$a_{cte}$  : une constante ;

$\tau_s$ : le temps de séjour du liquide dans la région de champ important (s) ;

E : champ électrique (V/m) ;

H : énergie (J) ;

L'étude de la dynamique d'expansion de la bulle est un problème complexe du fait de la présence de l'onde de choc qui comprime et met en mouvement le liquide derrière elle, ce qui induit une modification du champ de pression à l'interface.

En ce qui concerne la phase d'implosion qui lui fait suite, sa dynamique dépend pour beaucoup des caractéristiques du liquide (viscosité en particulier) et de l'énergie injectée. De plus, la bulle perd une grande partie de son énergie sous la forme d'une émission d'une onde de pression à la fin de chaque phase d'implosion, lorsque son volume est minimal.

Quelle que soit la pression appliquée, la durée des rebonds (cycle expansion/implosion) d'une bulle augmente avec la température du liquide.

La plupart des théories relatives à la dynamique des bulles générées dans les diélectriques liquides sont inspirées de la théorie de RAYLEIGH. Cette théorie est basée sur une dynamique contrôlée par l'inertie du liquide environnant la bulle. Elle ne fait donc pas intervenir l'action du champ électrique. Plusieurs autres théories ont introduit cet effet en considérant des configurations plan-plan et pointe-plan[5].

$$R \frac{d^2R}{dt^2} + 1.5 \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{P}{\rho} = 0$$

où

R : rayon de la bulle (m) ;

p : la masse volumique du liquide ( $\text{kg m}^{-3}$ ) ;

P : la pression (Pa).

### 1.5 Conclusion :

Durant ce chapitre nous avons présenté des notions de base sur les diélectrique liquides et les différents mécanismes de claquage électrique dans ces milieux. Nous avons pu constater la complexité et le nombre important des théories qui se dégagent sur ce sujet. Dans notre cas de notre étude nous allons nous baser sur le mécanisme thermique pour essayer de

construire un modèle permettant de déterminer la tension d'apparition des décharge partielles et la tension de claquage.

## 2 Chapitre 2 Modélisation des configurations d'isolement de la motorette sous COMSOL

### 2.1 Présentation de l'isolement des moteurs

L'un des composants essentiels des moteurs électriques est le bobinage. Ce dernier est parcouru par un courant électrique, suivant la technologie et le type du moteur. Le système d'isolement du moteur est nécessaire afin d'isoler les différentes parties électriques du moteur entre elles. Il se compose de quatre éléments principaux (Figure 2):

- L'émail autour des fils de cuivre
- Le papier isolant
- La résine (ou le vernis) d'imprégnation.
- L'huile d'isolement

Dans le moteur, différents types d'isolations existent :

- Une isolation entre les fils de même phase (n°3 de la figure1) est appliquée : il s'agit de l'isolation entre spires. Ceci est assuré par l'émail et par la résine d'imprégnation.
- L'isolation entre phases (n°1 de la figure1) qui est assuré à la fois par l'émail, la résine d'imprégnation et le papier isolant
- Une isolation entre la phase et la masse est nécessaire (n°2 de la figure1) pour laquelle, comme l'isolation entre phases, les trois types d'isolation sont utilisées.

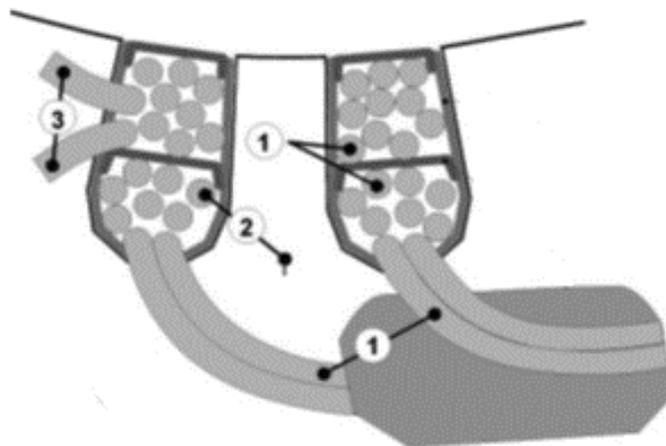


Figure 2: Schéma d'isolement d'un moteur électrique [6]

Afin de se rapprocher de l'étude de l'isolement du moteur électrique, nous allons considérer un système se rapprochant du modèle du moteur lui-même appelé la motorette.

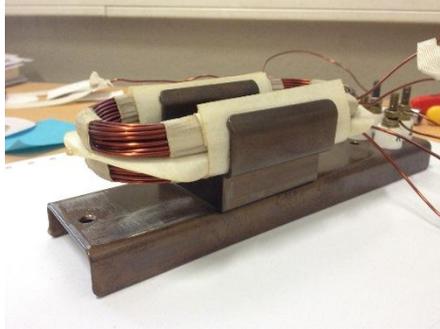


Figure 3 : Motorette fabriquée selon la norme IEEE 117-1974 [6].

La motorette est une maquette décrite dans la norme IEEE 117-1974. Elle est utilisée dans la procédure d'évaluation des systèmes de matériaux isolants de moteurs électriques à bobinage aléatoire alimenté en courant alternatif. Elle est composée de deux ensembles de deux bobines séparées par un papier isolant (Figure 2), [1].

Les isolants utilisés sont :

#### **L'émail**

L'émail est un isolant qui recouvre les conducteurs en cuivre, doté d'une épaisseur de  $38\mu\text{m}$  et est composé de deux sous-couches :

- Polyester-imide côté cuivre (75% de l'épaisseur de l'émail) de permittivité relative 3,35.
- Polyamide-imide côté extérieur (25% de l'épaisseur de l'émail) de permittivité relative 4.

#### **Le papier NPN**

Un papier isolant de  $310\ \mu\text{m}$  d'épaisseur placé entre les spires et le stack (carcasse métallique), sa permittivité relative est de 3,67 à  $20^\circ\text{C}$ .

#### **L'huile**

Le système est plongé dans de l'huile isolante de permittivité relative 2,4

## 2.2 Modélisation de l'isolement sous COMSOL

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation basé sur la méthode des éléments finis. Il est constitué de plusieurs modules, chaque module est destiné à une application en ingénierie.

Dans le cas de notre étude, la bibliothèque utilisée est « AC/DC ». Elle nous permet d'étudier la répartition du potentiel électrique, du champ électrique, du courant électrique, des pertes d'énergie, de l'évolution temporelle de ces paramètres ainsi que des charges électriques dans différents systèmes d'électrodes.

### 2.2.1 Système entre spires

Dans ce système, nous nous intéressons à l'isolation entre deux rangées de spires, une rangée est mise sous un potentiel électrique et l'autre est mise à la masse (Figure 4).

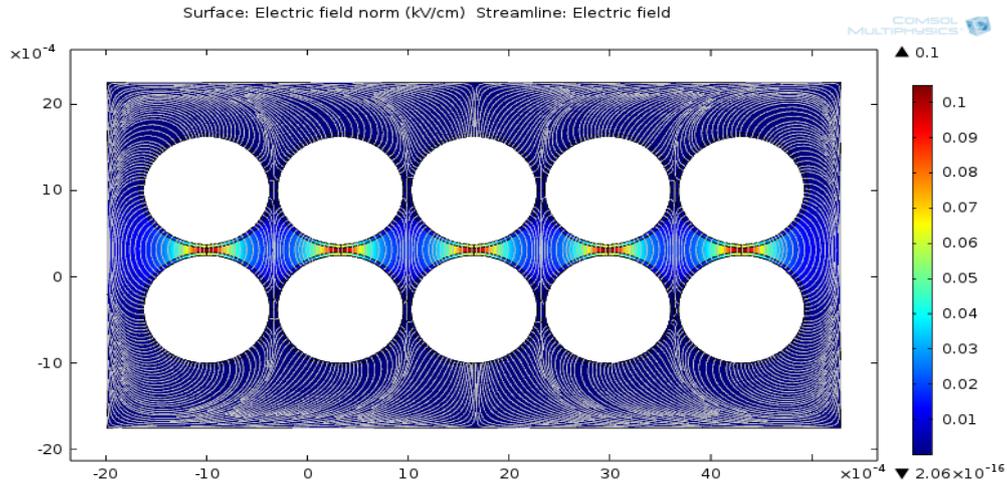


Figure 4 : Système d'isolation entre spires.

Un maillage extrêmement fin est utilisé pour le calcul du potentiel, du champ électrique, des pertes d'énergie et la variation de températures. Dans cette simulation, le nombre d'éléments que nous avons utilisé est de 105420 (Figure 5).

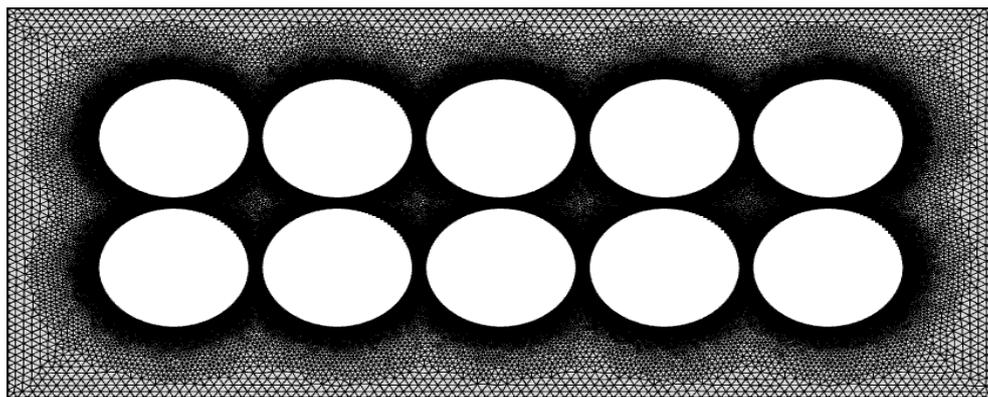


Figure 5: Maillage du système d'isolation entre spires.

### 2.2.2 Système entre phase et masse

Le système entre phase et masse est constitué d'une rangée de spires mise sous un potentiel électrique, séparée du stack (carcasse métallique) par le papier isolant NPN où la carcasse métallique est mise à un potentiel (0V) (Figure 6).

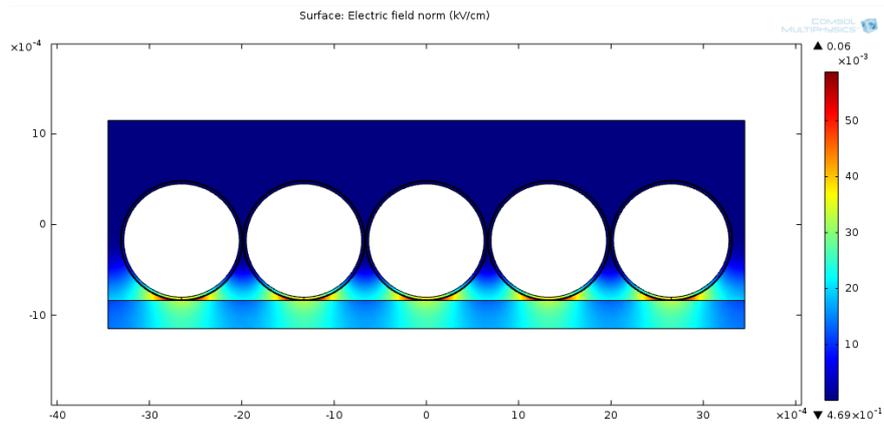


Figure 6 : Système d'isolation entre phase et masse.

Le maillage utilisé lors de cette simulation est un maillage extra fin, dont les paramètres sont définis par COMSOL, le nombre d'éléments est de 59496 (Figure 7).

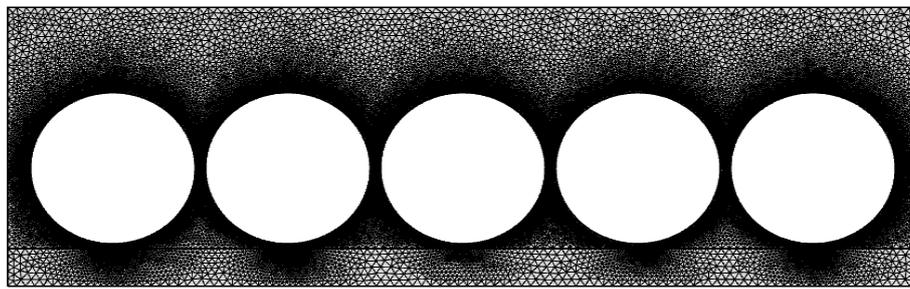


Figure 7: Maillage du système d'isolation entre phase et masse

## 2.3 Etude des configurations :

### 2.3.1 Champ et potentiel électrique :

Grâce à la modélisation sous COMSOL, nous pouvons estimer le champ électrique dans une configuration donnée. En fixant un potentiel et par la résolution des équations de Maxwell par la méthode des éléments finis, nous pouvons déterminer le champ électrique et la répartition de potentiel électrique dans une configuration d'isolation donnée.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{D} &= \rho \\ \vec{E} &= -\vec{\nabla} \cdot V \\ \vec{D} &= \epsilon \vec{E}\end{aligned}$$

avec :

$$\begin{aligned}\vec{D} &: \text{induction électrique (Vm}^{-2}\text{)} ; \\ \vec{E} &: \text{champ électrique (V/m)} ; \\ \rho &: \text{densité de charge (Vm}^{-2}\text{)} ; \\ \epsilon &: \text{permittivité électrique} ;\end{aligned}$$

Dans le chapitre 1, nous avons vu que la rigidité d'un diélectrique liquide était une de ses principales caractéristiques physico-chimiques. Comme première partie de notre étude, nous allons déterminer la tension qu'il faut appliquer au système afin que la valeur du champ électrique atteigne la rigidité diélectrique du liquide.

Nous allons considérer une isolation ayant les caractéristiques suivantes :

Caractéristiques	Valeurs
Permittivité relative (huile)	2.4
Permittivité relative (PEI)	3.35
Permittivité relative (PAI)	4

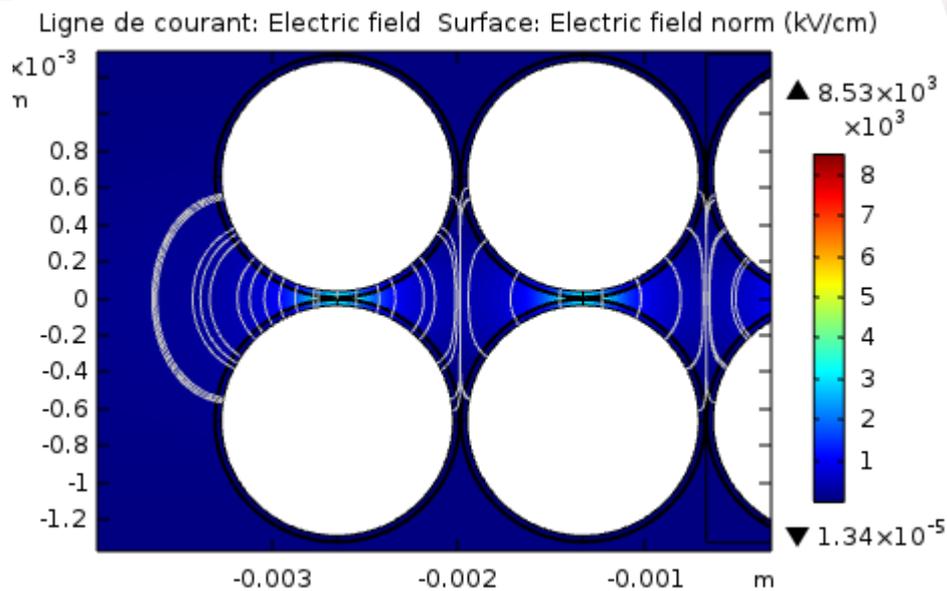


Figure 8 Champs électrique simulé (configuration entre spires)

Nous augmentons la tension de 1 V à 40 kV et nous considérons la valeur du champ électrique dans la zone où le champ électrique est le plus intense

Tension(V)	1	50	500	5000	10000	25000	30000	35000	40000
Champ électrique (kV/cm)	0.009	0.52	4.6	45	87	215	258	302	344

Tableau 2: champ électrique en fonction de la tension appliquée

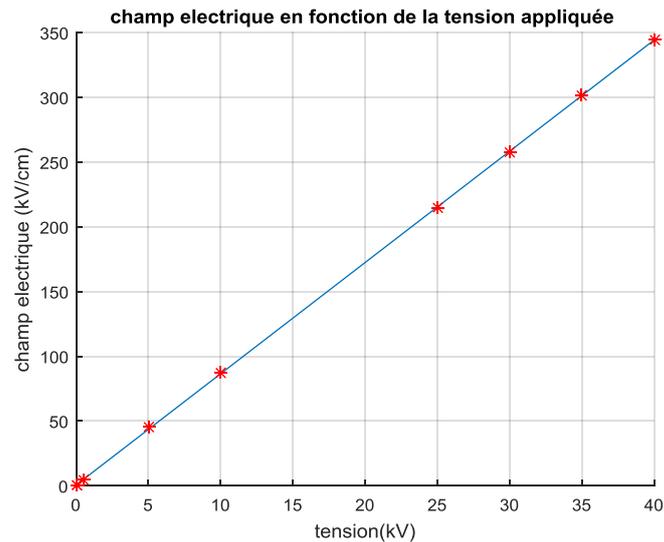


Figure 9: Champ électrique en fonction de la tension appliquée

Nous remarquons que l'évolution du champ électrique par rapport à la tension est parfaitement linéaire avec une équation de droite égale à  $E = 8.6V + 0.6$ . Ce résultat donne une première évaluation de la tension de claquage de cette configuration, car d'après les caractéristiques de l'huile utilisée, la rigidité électrique de cette huile est d'environ 320 kV/cm ce qui nous permet d'estimer une tension de claquage de 37 kV.

### 2.3.2 Echauffement et pertes Joules :

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 1, lors de notre étude, nous allons adopter le mécanisme thermique pour évaluer la tension de claquage. En effet, nous allons évaluer l'échauffement causé par l'effet Joule dû à l'application d'un potentiel électrique à une électrode dans le système d'isolation.

Procédure d'évaluation :

Nous allons comme précédemment modéliser la configuration d'isolement sur COMSOL en utilisant cette fois un couplage entre deux modules « courant électrique » et « transfert de chaleur » présents tous les deux dans la bibliothèque « AC/DC ». Le rôle de ce couplage est de déterminer la répartition et le transfert de chaleur dans l'huile diélectrique. Ceci en résolvant les équations :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \cdot V$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} + \vec{j}_e$$

avec

$\vec{E}$ : champ électrique (V/m)

V: potentiel électrique (V)

$\sigma$ : conductivité (S )

$\vec{j}_e$ : Courant de déplacement (A)

$\vec{j}$ : courant de déplacement (A)

Maintenant en intégrant les propriétés physico-chimiques suivantes aux différentes configurations modélisées, nous pouvons simuler le phénomène de transfert de chaleur dans l'isolement

Propriétés	Valeurs
Permittivité relative (huile)	2.4
Conductivité thermique (huile)	$0.12 W.m^{-1}.K^{-1}$
Permittivité relative (PEI)	3.35
Conductivité thermique (PEI)	$0.11 W.m^{-1}.K^{-1}$
Permittivité relative (PAI)	4
Conductivité thermique (PAI)	$0.11 W.m^{-1}.K^{-1}$

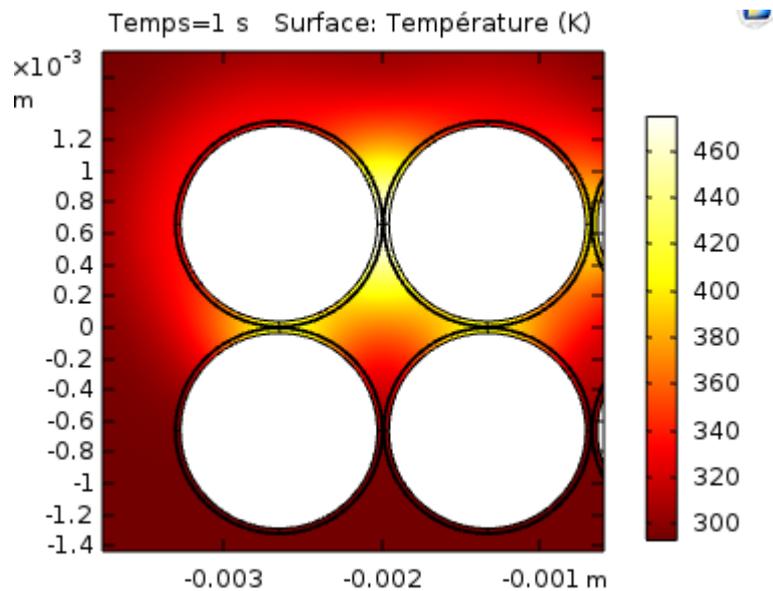


Figure 10: Répartition de la température pour une configuration entre spires

Nous remarquons que l'application d'un potentiel électrique sur les phases de la motorette induit un échauffement dans l'huile diélectrique. Nous pouvons constater (Figure 9) que la température de l'huile est plus importante au voisinage des spires mises sous potentiel, et plus on s'approche des phases mises sous le potentiel 0V (masse) plus la température diminue. Ce résultat est dû aux propriétés physico-chimiques propres aux matériaux tels que la conductivité thermique qui influe directement sur la propagation de la température dans un milieu physique et la permittivité électrique des matériaux qui influe sur la répartition du potentiel électrique dans le système d'isolation, ceci a pour conséquence une influence sur la répartition de la température dans l'huile diélectrique.

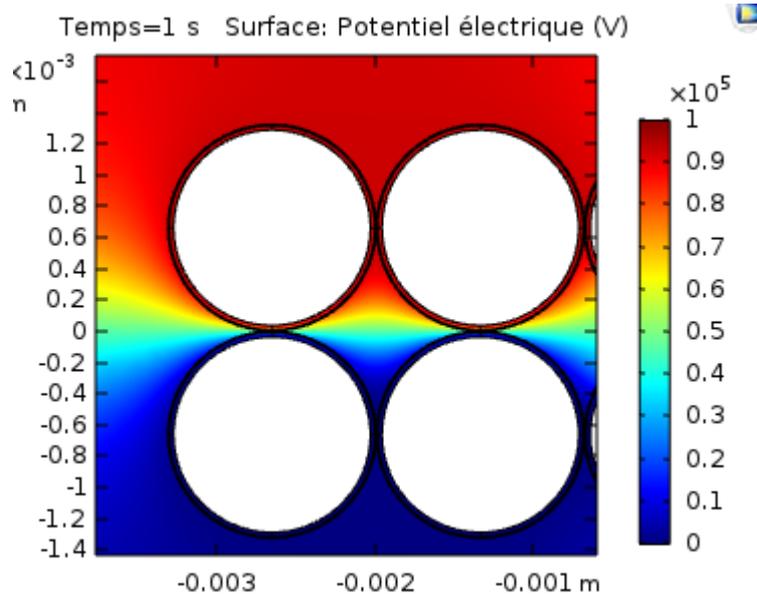


Figure 11 : Répartition du potentiel électrique pour une configuration entre spires

La figure 11 montre la répartition du potentiel électrique dans la configuration entre spires. Les figures 11 et 10 montrent que dans la zone comprise entre les phases, l'échauffement est d'autant plus important que le potentiel électrique est élevé.

D'après la modélisation précédente nous avons vu que le fait d'appliquer une différence de potentiel au niveau des électrodes de la motorette engendre un échauffement de ce liquide dont la température passe de la température ambiante à une autre température plus élevée. Nous avons aussi vu que la répartition de la température dans la zone comprise entre les phases du système n'était pas uniforme (Figure 10), le liquide au voisinage des phases mises sous potentiel est plus chaud que et plus on se dirige vers les phases mises à la masse plus la température diminue. Dans ce qui suit, nous nous intéressons à l'évolution de la température maximale du liquide en fonction de la tension appliquée.

Nous allons considérer une configuration entre spires avec les mêmes propriétés de conductivité électrique et permittivité électrique que précédemment

Tension (V)	500	5000	25000	50000	75000
Température [K]	293.5	305	330	360	405

Tableau 3 Variation de la température en fonction de la tension

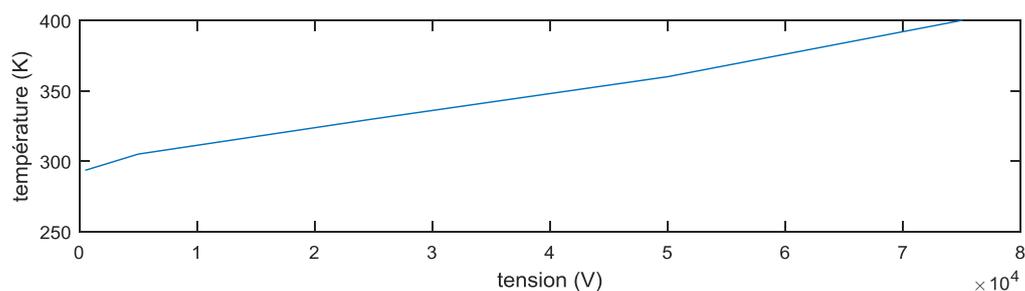


Figure 12: Variation de la température en fonction de la tension

Nous remarquons que la température du liquide augmente avec l'augmentation de la tension d'une manière presque linéaire. Nous déduisons que pour un certain niveau de tension le liquide atteint une température qui permet la vaporisation d'un volume donné du liquide.

#### 2.4 Conclusion :

Grâce à la modélisation des différentes configurations utilisant COMSOL Multiphysics, nous avons pu résoudre des équations physiques par la méthode des éléments fins. Ces modèles ont servi à déterminer plusieurs grandeurs physiques telles que la répartition du potentiel électrique dans l'isolation, le champ électrique et la répartition de la température.

La modélisation de la configuration entre spires sous COMSOL en utilisant la bibliothèque « électrostatique » a permis de mettre en évidence la relation de linéarité présente entre la variation du potentiel électrique appliqué aux phases de la motorette et le champ électrique induit dans le système d'isolation. Cette modélisation a aussi permis d'avoir une estimation primaire de la tension de claquage en identifiant la valeur maximale du champ électrique induit dans le système d'isolation par l'application d'un potentiel à la valeur de la rigidité diélectrique de l'huile mesurée expérimentalement.

D'après les résultats obtenus par la modélisation en utilisant un couplage entre les modules « transfert de chaleur » et « courant électrique », tous les deux des modules de la bibliothèque « AC/DC » du logiciel COMSOL, nous avons pu montrer que l'application d'un potentiel électrique sur les phases d'une configuration induisait un échauffement dans l'huile diélectrique. Ce résultat constituera la base de notre étude suivante où nous allons construire un modèle permettant d'évaluer la tension de claquage et la tension d'apparition des décharges partielles en se basant sur le mécanisme de claquage thermique par phases gazeuse.

### 3 Mise en équation de la phase de préclaquage :

#### 3.1 Modélisation en vue de simulation de la phase de préclaquage

D'après les différentes études faites sur le claquage des milieux liquides, il a été remarqué que l'évolution de la tension en phase de préclaquage (génération de bulles de gaz) en fonction du temps, avait une allure proche de celle d'une décharge d'un condensateur (Figure 13). Ceci s'explique par le fait que le système d'isolation est constitué de deux électrodes et un diélectrique liquide séparant les deux. Ce système peut être assimilé à un condensateur (système d'électrode) en parallèle avec une résistance (le matériau diélectrique) (Figure 14).

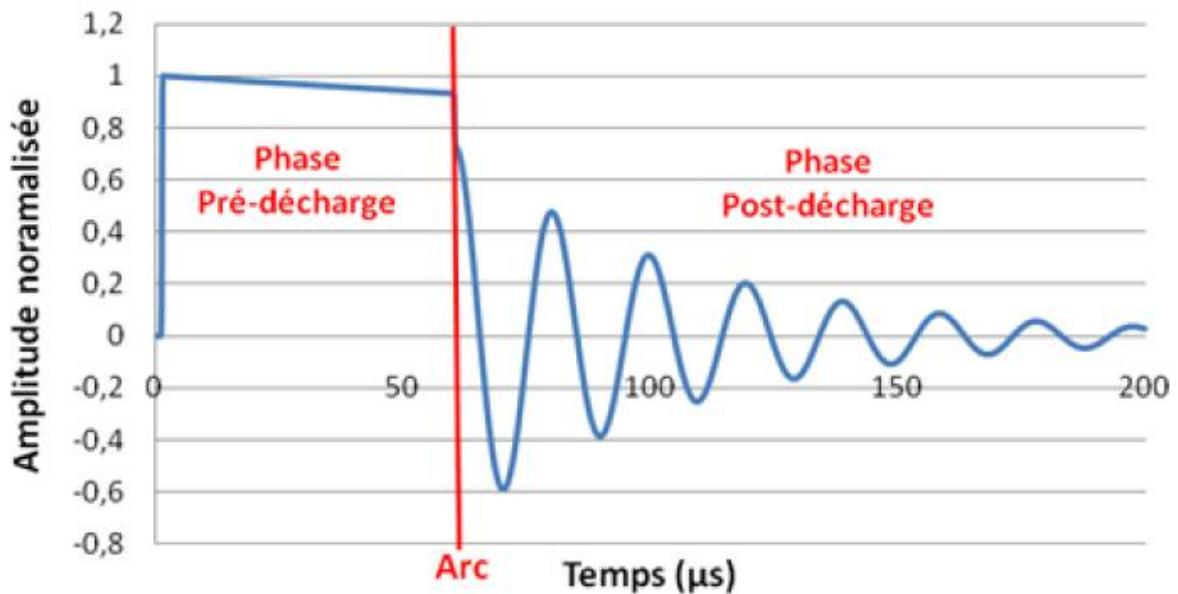


Figure 13 variation de l'amplitude de la tension fonction du temps [1]

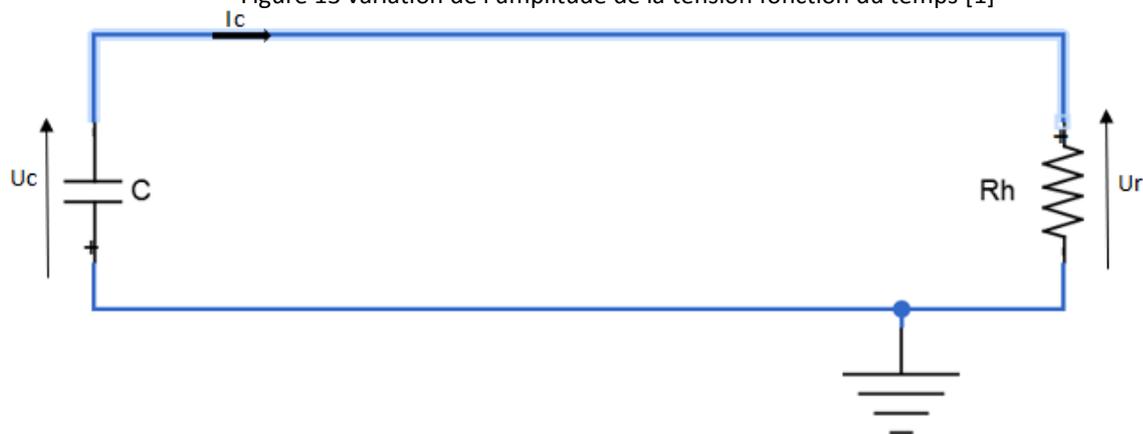


Figure 14 schéma équivalent

Le condensateur étant initialement chargé à la tension  $U$ , la condition initiale n'est pas nulle. L'expression, dans le domaine de Laplace, de la tension  $U(p)$  aux bornes du condensateur  $C$  s'exprime par :

$$U = U_c \quad (1)$$

Equation [1] représente la condition initiale seulement. U n'est que la tension avec laquelle le système a été chargé.

$$i_c = -\frac{dU_c}{dt} \Rightarrow U_c = -\frac{1}{c} \int i_c dt \quad (2)$$

En passant au domaine de Laplace et en prenant en compte les conditions initiales, on trouve l'équation (3)

$$U_c(p) = \frac{-i_c(p)}{cp} + \frac{U}{p} \quad (3)$$

D'autre part

$$U_c(p) = i_c(p) \cdot R_h \quad (4)$$

En égalant les équations (3) et (4) on obtient l'équation (5) du courant

$$\Rightarrow i_c(p) \cdot R_h = \frac{-i_c(p)}{Cp} + \frac{U}{p}$$

$$\Rightarrow i_c(p) \left[ \frac{R_h Cp + 1}{Cp} \right] = \frac{U}{p}$$

$$\Rightarrow i_c(p) = \frac{CU}{R_h Cp + 1}$$

$$i_c(p) = \frac{U}{R_h} \left[ \frac{CR_L}{1+R_h Cp} \right] \quad (5)$$

Ainsi, pendant la phase de pré-décharge, les expressions du courant  $i(t)$ , de la tension  $U_r(t)$  aux bornes de l'enceinte (l'huile et émaillage) et de la puissance  $p_e(t)$  délivrée au fluide s'exprimeront donc de la manière suivante

$$i_c(t) = \frac{U}{R_L} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (7)$$

$$U_r(t) = U e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

$$p_e(t) = \frac{U^2}{R_h} e^{-\frac{2t}{\tau}} \quad (9)$$

avec  $\tau = CR_h$

Entre les instants  $t=0$  et  $t=T$ , il est donc possible de définir l'énergie consommée pendant la phase de pré-décharge par :

$$E = \int_0^T p e dt = \int_0^T \frac{U^2}{R_h} e^{-\frac{2t}{\tau}} dt \quad (10)$$

Avec T : le temps de claquage

L'énergie consommée pendant la phase de pré-décharge peut être exprimée par

$$E = \frac{1}{2} CU^2 \left[ 1 - e^{-\frac{2T}{\tau}} \right] \quad (11)$$

Les travaux de [Justin Martin],[1] montre que le temps de décharge pendant la phase de préclaquage est de l'ordre des ( $\mu$ s) comme le montre la (Figure 13), donc on peut dire que La constante de temps  $\tau$  a une valeur très petite, en donnant au système assez de temps lors de la phase de pré-décharge, on peut faire tendre t vers l'infini et donc on aura :

$$E = \frac{1}{2} CU^2 \quad (12)$$

### 3.2 Détermination de la capacité du schéma équivalent

Le système d'électrodes étant constitué de spires cylindriques écartées, on peut supposer que les spires sont les armatures conductrices d'un condensateur et que l'huile et l'émaillage comme milieu stratifié diélectrique compris entre ces armatures(Figure 15).

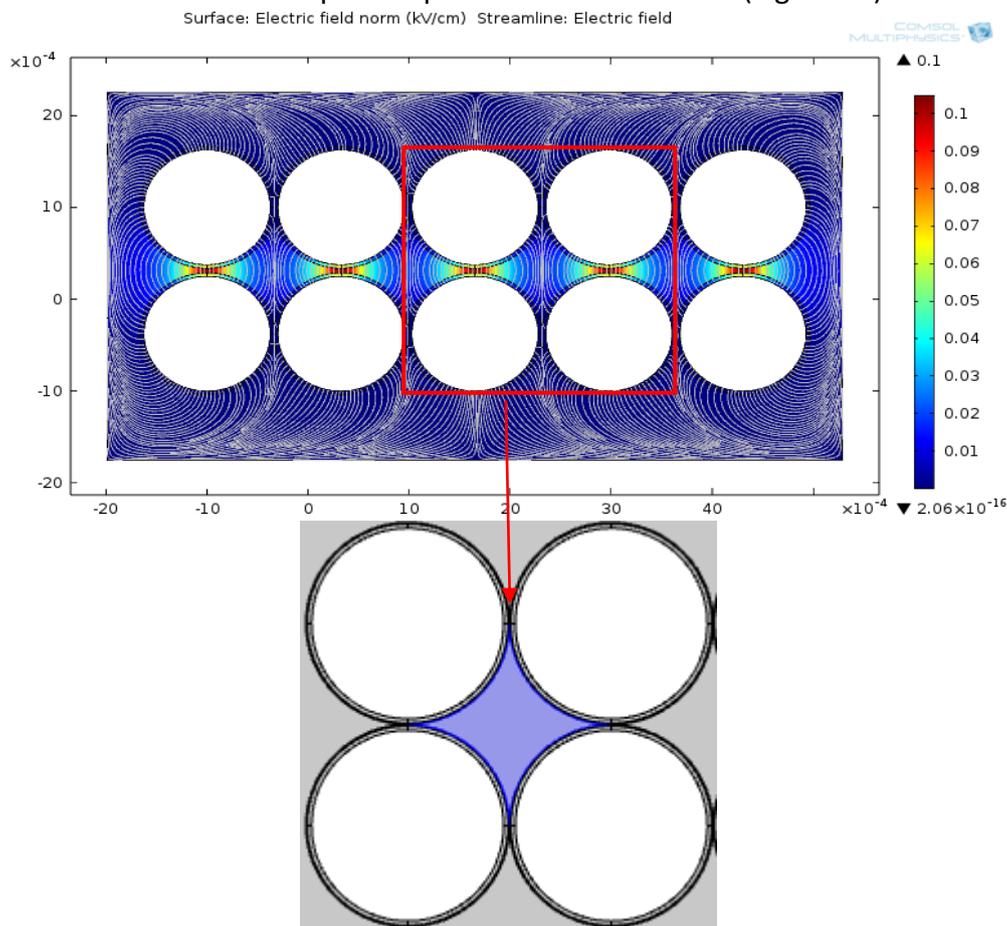


Figure 15 domaine d'étude (configuration entre spires)

A cause de la présence de plusieurs permittivités électriques dans le système d'isolation (huile, papier PEI, papier PAI et les impuretés liquides et gazeuses), le calcul analytique de la

capacité du condensateur est un peu difficile. Afin de calculer la valeur de cette dernière nous allons utiliser la modélisation sous COMSOL en utilisant le module « électrostatique » se trouvant dans la bibliothèque « AC/DC ». Après la modélisation et la résolution des équations de Maxwell dans le domaine entre les électrodes, on calcule la capacité par la fonction « es.C » ou en calculant l'énergie électrique total stockée dans un volume et on divise cette quantité par deux fois le carré de la tension appliquée comme le montre l'équation (12).

### 3.3 Couplage électrothermique lors de la phase de pré décharge

L'expression donnant l'énergie à l'évaporation d'une masse  $m$  d'un liquide est

$$E = m[C_p(T_v - T_0) + L_v] \quad (13)$$

Avec

$C_p$  la chaleur spécifique (J/kg.K) ;

$L_v$  la chaleur latente de vaporisation (J/kg) ;

$T_0$  la température ambiante (K) ;

$T_v$  la température d'ébullition(K).

$$m = \frac{E}{[C_p(T_v - T_0) + L_v]} \quad (14)$$

Avec

$$[C_p(T_v - T_0) + L_v] = Cte$$

D'autre part

$$n = \frac{m}{M} \quad (15)$$

$n$  la quantité de matière (mol)

$m$  la masse du liquide (g)

$M$  la masse molaire du liquide (g/mol)

En supposant que le gaz générer par la vaporisation du diélectrique liquide est un gaz parfait.

$$n = \frac{PV}{RT} \quad (16)$$

$P$  pression du liquide supposée constante (Pa) ;

$V$  volume du liquide ( $m^3$ ) ;

$T$  température du liquide (K) ;

$R$  constante des gaz parfaits ( $\text{Pa} \cdot m^3 \text{mol}^{-1} K^{-1}$ ).

Donc

$$m = \frac{MPV}{RT} \quad (17)$$

De l'équation (14) et (17)

$$\frac{MPV}{RT} = \frac{E}{[C_p(T_v - T_0) + L_v]}$$

Donc on obtient une expression liant le volume de la bulle à l'énergie

$$V = \frac{RTE}{PM[C_p(T_v - T_0) + L_v]} \quad (18)$$

On remplace le terme énergie dans l'équation (18) par (12)

$$V = \frac{CU^2RT}{2PM[C_p(T_v - T_0) + L_v]} \quad (20)$$

Comme le montre l'équation (20), le volume de la bulle de gaz est fonction de deux paramètres, la tension et la température  $V=f(U,T)$  ce qui rend le volume compliqué à déterminer

En étudiant le comportement du système d'isolation sous COMSOL, nous avons remarqué que la température de l'enceinte ( email+huile ) varie en fonction de la tension appliquée du système

En interpolant ces points on peut avoir un polynôme décrivant la variation de la température en fonction de la tension appliquée à ce système  $T=P[U]$  (Figure 16).

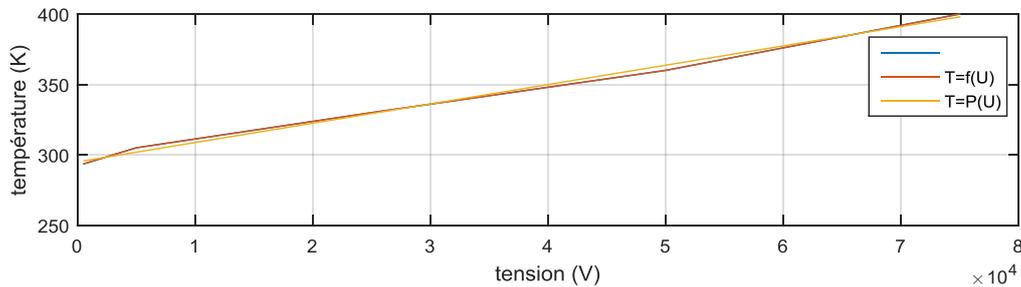


Figure 16 variation de la température en fonction de la tension

Nous remplaçons la température T par le polynôme en fonction de la tension P[U] dans (20)

$$V = \frac{CU^2RP[U]}{2PM[C_p(T_v - T_0) + L_v]} \quad (21)$$

Maintenant, en introduisant l'expression du rayon donné par dans l'équation (21), on obtient une équation plus simple à traiter.

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3CU^2RP[U]}{8\pi PM[C_p(T_v - T_0) + L_v]}} \quad (22)$$

Pour finir nous obtenons l'équation (24) et (25) qu'on va utiliser afin de déterminer la tension de claquage et la tension d'apparition des décharges partielles.

$$r = K\sqrt[3]{U^2P[U]} \quad (24)$$

$$K = \sqrt[3]{\frac{3CR}{8\pi PM[C_p(T_v - T_0) + L_v]}} = Cte \quad (25)$$

Pour déterminer la tension de claquage on pose  $r = r_{claquage} = \frac{\text{distance inter\_electrode}}{2}$

Pour déterminer la tension d'apparition des décharges partielles on pose  $r = 10 \mu\text{m}$  Car d'après la loi de Paschen le diamètre minimal d'une bulle de gaz pour que des décharges partielles apparaissent est de  $20\mu\text{m}$  [6]

## 4 Résultats et interprétations

### 4.1 Système entre spires

#### 4.1.1 Estimation primaire :

Dans tous les cas de figure nous allons considérer une huile diélectrique avec les caractéristiques physicochimiques suivantes :

$C_p$ la chaleur spécifique (huile)	2,9 J/g
$L_v$ la chaleur latente de vaporisation (huile)	33900 J/mol
$T_o$ la température ambiante (huile)	293 K
$T_v$ , la température d'ébullition (huile)	405 K
P pression (huile)	1 atm
M masse molaire (huile)	1500g/mol
Permittivité relative	2.9

Pour une configuration entre spire avec les paramètres géométrique suivants :

Rayon de la spire	$6.25 \cdot 10^{-4}$ m
Distance inter électrode	0 m
Démentions de l'émail	$3.8 \cdot 10^{-5}$ m

On trouve une capacité  $C = 4.5308 \cdot 10^{-10}$  F

Tension de claquage  $U = 36$  kV

Tension d'apparition de décharges partielles  $TADP = 1.5$  kV

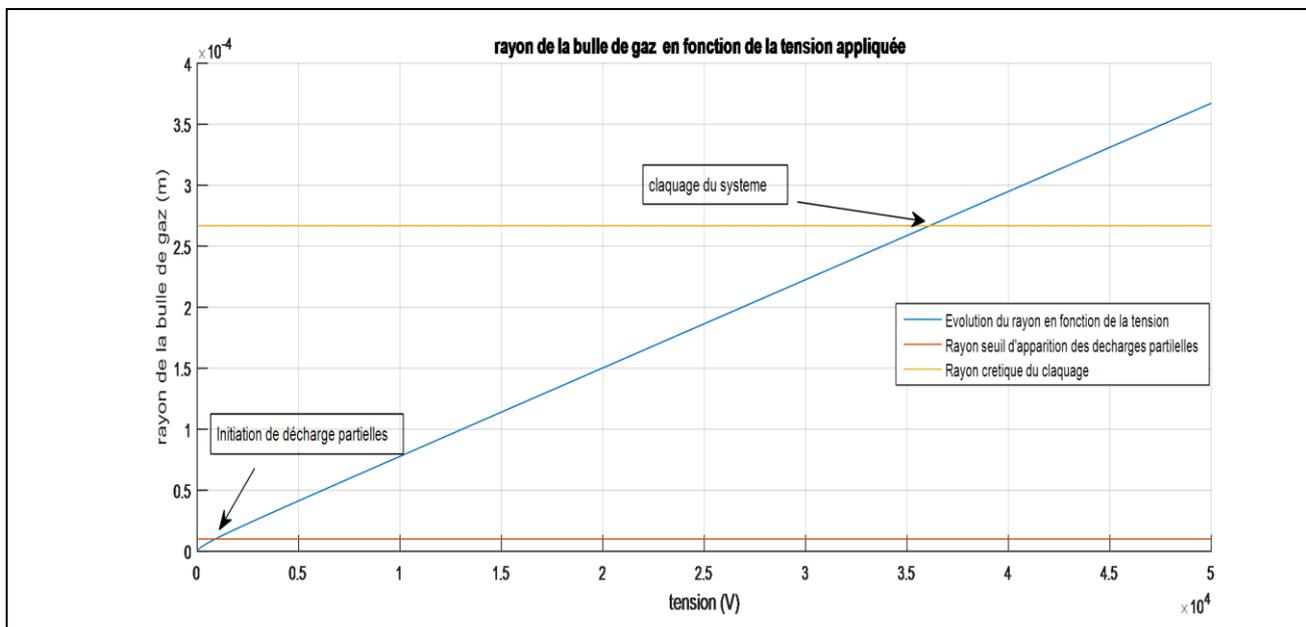


Figure 17: évolution du rayon de la bulle de gaz en fonction de la tension appliquée

Comme on peut le voir sur la figure 17, la tension susceptible de provoquer une décharge partielle, en d'autres termes la tension capable de créer une bulle infiniment petite de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$  qui peut être sujette à des décharges partielles, est de 1.5 kV. Cette bulle croit en fonction de la tension jusqu'à remplir le domaine inter-électrode pour un niveau de tension de 36 kV et c'est pour ce niveau de tension où on considère que le claquage du système a lieu. dans cette étude qui n'est qu'un modèle de l'évaluation du volume de la bulle de gaz en fonction de la tension appliquée au système d'électrode, nous n'avons pas pris en considération la dynamique mécanique de la bulle ; en effet, en réalité la bulle subit des expositions et des explosions lors de son évolution dû à la fois à la pression et au claquage de cette dernière donnant lieu à un courant électrique qui lui-même augmente la température du liquide et donc à une évolution plus rapide et plus complexe du rayon de la bulle. De ce fait, il est très probable que la tension de claquage soit inférieure à celle trouvée par ce modèle, d'où la difficulté d'établissement d'un critère analytique dédié au claquage dans les milieux liquides

#### 4.1.1.1.1 Conclusion :

A cause de la complexité de l'étude des diélectriques liquides, nous avons proposé dans ce chapitre un modèle simplifié de la théorie du claquage dans ces isolants. Le modèle présenté est une synthèse de plusieurs disciplines qui combine chimie, électrotechnique et électrothermie. Le but de ce modèle est de donner une estimation de la tension au-delà de laquelle des décharges partielles peuvent avoir lieu mais aussi un seuil de tension pouvant provoquer un claquage dans une configuration d'isolement donnée.

L'évaluation primaire de la tension d'apparition des décharges partielles pour le système entre spires a donné un résultat très cohérent avec les recherches établies par NIETO-SALAZAR [7], ce qui donne un bon point de départ pour une évaluation plus complexe.

Le modèle présente aussi un nombre important de variables que l'on peut supposer indépendantes les unes des autres afin de pouvoir construire un abaque reliant les différents paramètres

#### 4.1.2 Influence de la taille de l'email

Etant donné que l'email est un composant essentiel du système d'isolation entre spires, il est intéressant d'étudier la variation de la tension de claquage et de la TADP en fonction des dimensions de ce dernier(Figure 18)..

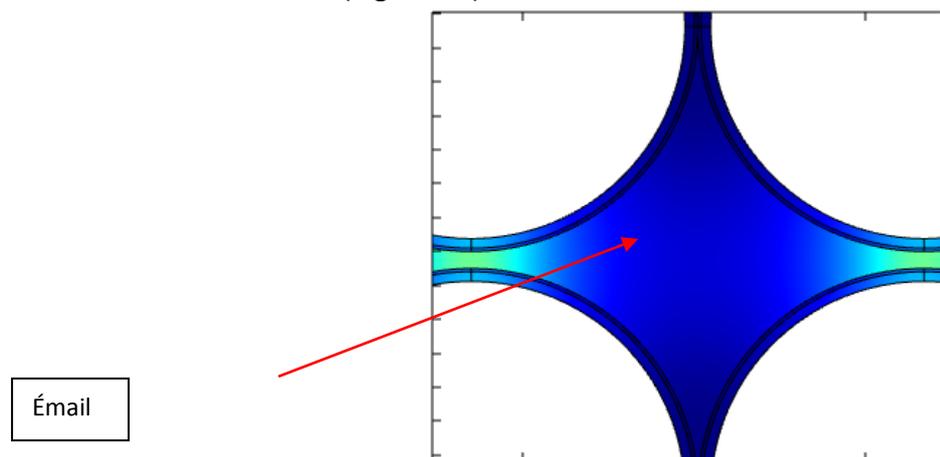


Figure 18: isolaion système entre spires

On considère un émailage de  $3.8 \cdot 10^{-5}$  m et on étudie la variation des deux tensions en fonction du pourcentage de l'email

##### 4.1.2.1 Influence de la taille de l'email sur la tension de claquage :

Émail (%)	10	30	50	70	100	150	200
Tension de claquage (kV)	25	27	30	34	36	44	48

Tableau 4:tension de claquage en fonction de l'épaisseur de l'email

Globalement, nous remarquons que plus l'épaisseur de l'émail augmente plus la tension de claquage augmente, et que la variation se fait de façon non linéaire. On peut remarquer aussi que le fait d'augmenter l'épaisseur de l'émail de 10% à 200%, on a remarqué que la tension de claquage augmentait d'environ 98% ce qui montre l'importance d'une telle isolation dans les moteurs électrique

#### 4.1.2.2 Influence de la taille de l'email sur la TADP :

Émail (%)	10	30	50	70	100	150	200
TADP ( kV)	1.15	1.26	1.31	1.42	1.48	1.54	1.59

Tableau 5:TADP en fonction de l'épaisseur de l'émail

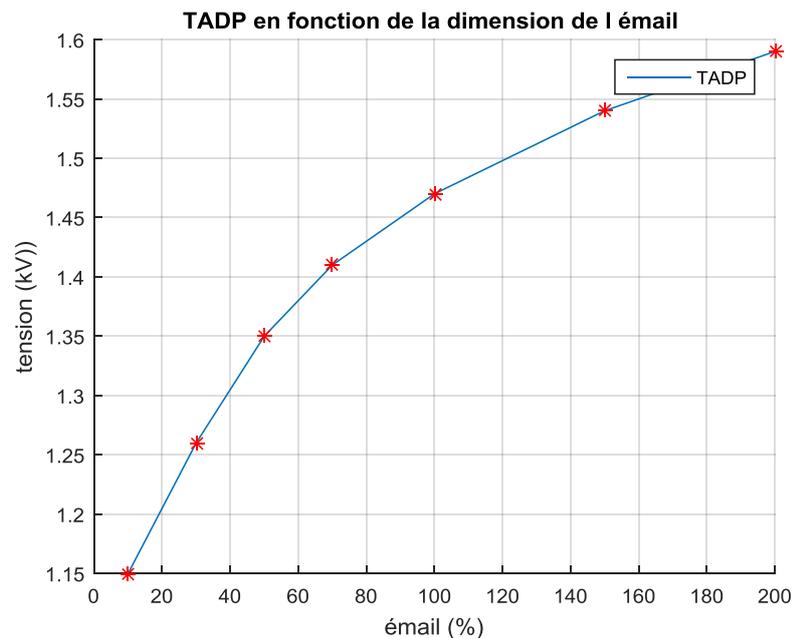


Figure 19: TADP en fonction de l'épaisseur de l'émail

Comme pour la tension de claquage, on remarque que plus l'épaisseur de l'émail augmente plus la TADP augmente. On remarque aussi que pour une variation de l'épaisseur de l'émail de 10 à 200%, la tension d'apparition des décharges partielles augmente d'environ 39%. Cette variation peut être considérée comme importante par rapport à l'évolution de la TADP elle-même, mais par rapport à l'évolution de la tension de claquage qui a varié de plus de 47%, on peut dire que l'évolution de la TADP est un peu plus lente par rapport à la tension de claquage. Ceci s'explique par le fait que pour le cas de l'estimation de la TADP, on considère un volume constant de la bulle de gaz d'un rayon de 10 $\mu$ m, alors que pour le cas de l'estimation de la tension de claquage, le rayon de la bulle de gaz varie et augmente avec l'épaisseur de l'émail, car comme nous l'avons supposé au début de cette partie de notre travail, la bulle de gaz prend tout le volume inter électrode lors du claquage.

#### 4.1.2.3 Conclusion :

Les résultats montrent que pour une isolation optimale, le choix de l'épaisseur de l'émail est un paramètre très important dont il faut tenir compte lors de la réalisation de l'isolation. Comme on vient de le montrer, l'augmentation de la taille de l'émail de 200 % a pu

provoquer une augmentation de la tension de claquage d'environ 47% et celle d'apparition des décharges partielles d'environ 28%.

#### 4.1.3 Influence de la distance inter électrode

La distance inter-électrode est un paramètre très intéressant à étudier car il intervient à la fois dans la valeur de la capacité du condensateur du système mais aussi dans le volume de la bulle de gaz qui provoque le claquage.

Comme précédemment, dans cette partie de l'étude, nous allons varier la distance inter électrode pour étudier l'impact de la variation de cette dernière sur la tension de claquage et sur la TADP.

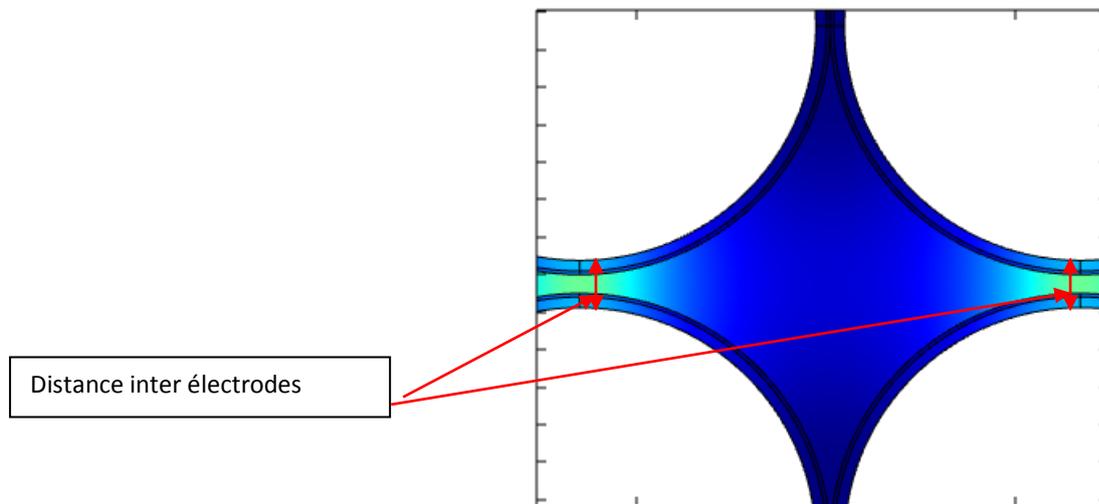


Figure 20: isolation système entre spires

##### 4.1.3.1 Influence de la distance inter électrode sur la tension de claquage :

Distance ( $\mu\text{m}$ )	0	10	20	30	40	50	60
Tension de claquage (kV)	38	40	41	43	44	45	46

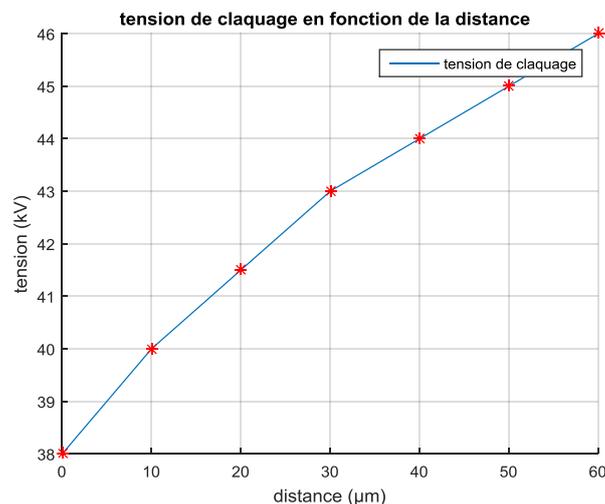


Figure 21 : Tension de claquage en fonction de la distance

Nous constatons (Figure 21), que plus la distance inter-électrode augmente plus la tension de claquage augmente. On remarque aussi que la variation de la tension de claquage en fonction de la distance a une forme non linéaire et avec une interpolation des points, on peut extraire la fonction

$U(d) = -0.0023 d^2 + 0.2188 d + 38.0000$  . Cette équation peut être utilisée plus loin pour la construction d'un abaque.

#### 4.1.3.2 Influence de la distance inter électrode sur la TADP :

Distance (µm)	0	10	20	30	40	50	60
TADP (kV)	1.52	1.53	1.55	1.56	1.57	1.58	1.6

Tableau 6:TADP en fonction de la distance

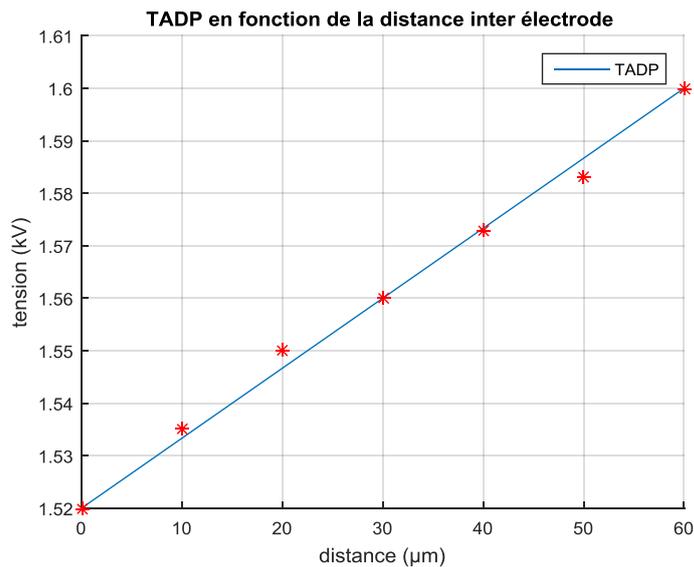


Figure 22:TADP en fonction de la distance

Pour la TADP, on remarque que plus la distance augmente plus la TADP augmente. La variation peut être assimilée à une droite d'équation  $U = 0.0015d + 1.52$ . On peut remarquer aussi que le fait d'augmenter la distance inter-électrode de 0 à 60 µm, nous obtenons une augmentation de la TADP d'environ 4%. On peut dire alors que la distance entre électrode n'a pas une grande influence sur la tension d'apparition des décharges partielles

#### 4.1.3.3 Conclusion :

La distance entre spires est un paramètre très lié à la tension de claquage, car elle est liée à la fois à la capacité du condensateur et à la taille de la bulle de gaz susceptible de provoquer le claquage. D'où la non linéarité de la variation de la tension de claquage en fonction de cette dernière car le fait d'augmenter la distance induit la variation de deux paramètres intervenant dans le modèle (volume de la bulle et capacité du condensateur du système). Comme on vient de le voir, l'influence de cette distance est tellement importante que le simple fait d'augmenter la distance de quelques dizaines de micro mètre, de 0 µm à 60 µm, on a pu constater une augmentation de la tension de claquage de 48%. Ce résultat est très important à prendre en compte car lors de la fabrication, des défauts peuvent survenir ; un décalage de quelques dizaines de micro mètre peut engendrer des niveaux de tension inférieurs à ceux tolérés et donc le claquage de cette isolation

La variation de la TADP présente une linéarité du fait qu'on a supposé que le volume de la bulle de gaz pouvant provoquer une TADP est constant d'après la loi de Paschen.

#### 4.1.4 Influence du désémaillage

Le désémaillage est un problème de fabrication qui peut survenir lors de l'émaillage des spires. Ce problème est un défaut d'émaillage des spires c'est à dire que sur une partie de la spire, le cuivre est en contact direct avec l'huile diélectrique comme le montre la ( figure 23).

Désémaillage

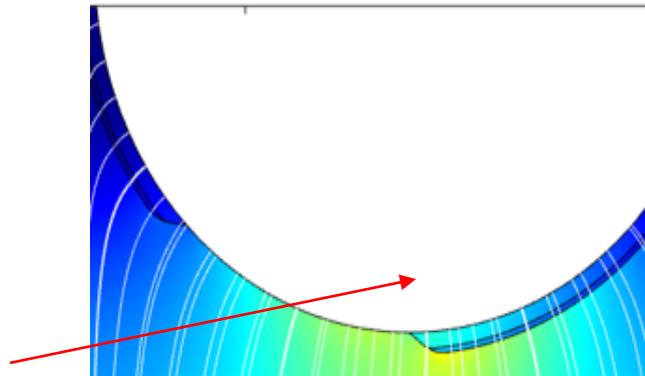


Figure 23: Désémaillage

Lors de l'étude de l'impact du défaut nous allons considérer un désémaillage de plusieurs angles variants de 10 à 90 degré

##### 4.1.4.1 Influence du désémaillage sur la tension de claquage :

Désémaillage (°)	10	25	50	60	70	80	90
Tension de claquage (kV)	36	35	31	30	28	26	22

Tableau 7: Tension de claquage en fonction du désémaillage

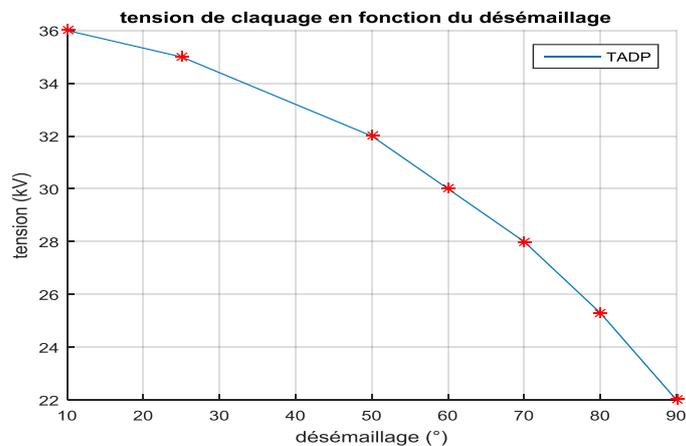


Figure 24: Tension de claquage en fonction du désémaillage

On remarque que la tension de claquage diminue avec l'augmentation de l'angle de désémaillage et qu'elle chute de 39% en enlevant le quart de l'émail. Ce résultat est très logique car la fonction de l'isolation diminue avec l'élévation de l'angle du désémaillage

#### 4.1.4.2 Influence du désémaillage sur la TADP :

Désémaillage (°)	10	25	50	60	70	80	90
TADP (kV)	1.16	1.14	1.12	1.10	1.08	1.07	1.05

Tableau 8: TADP en fonction du désémaillage

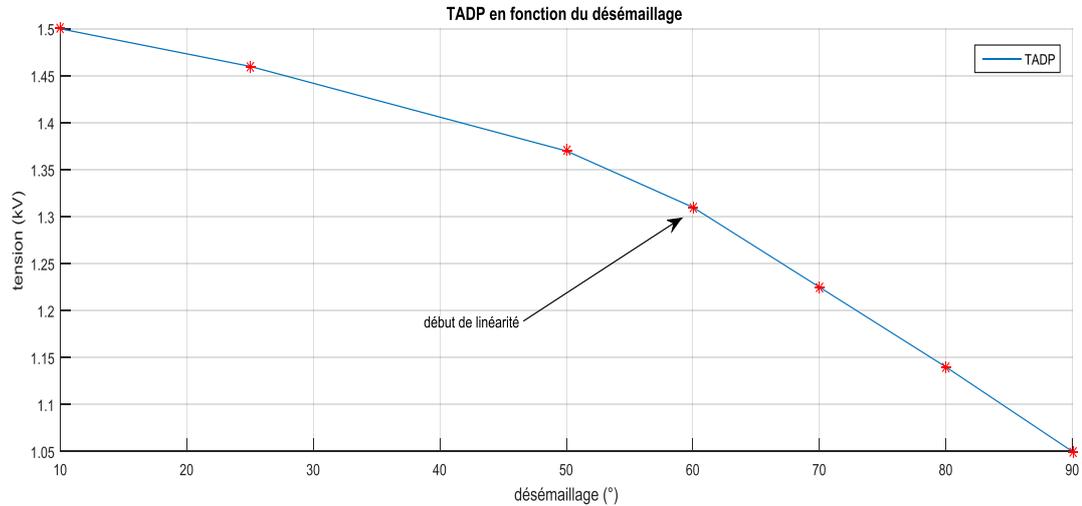


Figure 25: TADP en fonction du désémaillage

Comme pour la tension de claquage, la tension d'apparition des décharges partielles diminue avec l'augmentation de l'angle de désémaillage et que cette dernière chute d'environ 30% quand on enlève le quart de l'émail on remarque aussi une linéarité de la variation de la tension TADP après la suppression de 60 degrés de l'émail.

#### 4.1.4.3 Conclusion

Le désémaillage conduit à un défaut d'isolation qui met en contact le liquide directement avec les conducteurs métalliques ce qui engendre un échauffement local du liquide dans la zone de désémaillage. Cet échauffement conduit à une formation plus rapide des bulles de gaz à des niveaux de tension plus faibles ce qui fait que ce défaut de fabrication peut avoir des conséquences dramatiques sur la tension de claquage et celle d'apparition des décharges partielles comme on a pu le voir des chutes du niveau de tension de 30% pour la TADP et de 39% pour la tension de claquage par rapport à la configuration initiale sans défauts.

#### 4.1.5 Influence des conditions de température et de pression

Etant donné que les véhicules électriques doivent fonctionner sous plusieurs conditions climatiques et atmosphériques. Une étude sur l'isolation de ces derniers dans des conditions de température et de pressions s'impose ; pour cela nous allons considérer un système d'isolation entre spires simple sans défauts et déterminer la tension de claquage et la TADP en faisant varier ces conditions

##### 4.1.5.1 Influence de la température

###### 4.1.5.1.1 Influence de la température sur l'énergie de vaporisation :

On considère un volume d'une bulle de gaz constant et l'énergie nécessaire à sa création en utilisant l'équation (13) et (17)

$$E = m[C_p(T_v - T_0) + L_v] \quad (13)$$

$$m = \frac{MPV}{RT} \quad (17)$$

On obtient une équation reliant l'énergie de vaporisation et la température et la pression  $E=f(T,P)$

$$E = \frac{MPV[C_p(T_v - T_0) + L_v]}{RT} \quad (26)$$

En supposant que la pression dans la bulle reste constante et que la température dans la bulle est la même que celle du liquide, on peut étudier la variation de l'énergie en fonction de la température du liquide.

$$E = \frac{MPV[C_p(T_v - T) + L_v]}{RT} \quad (27)$$

En intégrant le rayon de la bulle dans l'équation, on obtient l'équation finale

$$E = \frac{4\pi MPVr^3[C_p(T_v - T) + L_v]}{3RT} \quad (28)$$

Pour une bulle d'un rayon de  $r=10\mu\text{m}$  on a

Température (° C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Energie (mJ)	0.9194	0.8252	0.7374	0.6554	0.5787	0.5067	0.4390	0.3753	0.3152	0.2584	0.2046

Tableau 9: énergie consommée en fonction de la température

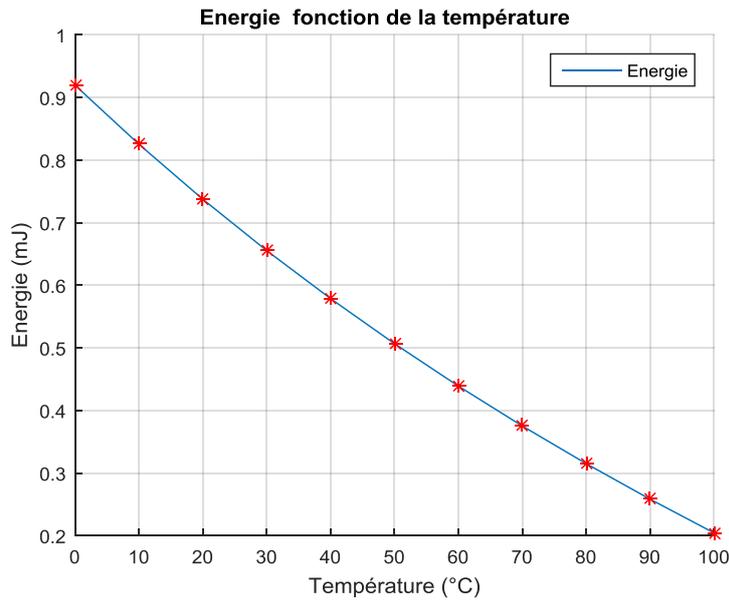


Figure 26: énergie consommée en fonction de la température

Comme on peut le remarquer, plus la température augmente et plus l'énergie nécessaire à la vaporisation du liquide diminue avec une variation presque linéaire avec une équation d'une droite =  $-0.0093T + 91.6$ . On remarque aussi que la baisse de l'énergie nécessaire à la vaporisation est de 84 % entre la température 0 °C et 100 °C

#### 4.1.5.1.2 Influence de la température sur la tension de claquage :

Dans les études précédentes nous avons considéré la température  $T_0 = 20$  °C soit 293 K maintenant nous allons varier cette dernière de 0 °C à 100

Température (° C)	0	20	40	60	80	90	100
Tension de claquage (kV)	38	36	34	32	31	29	27

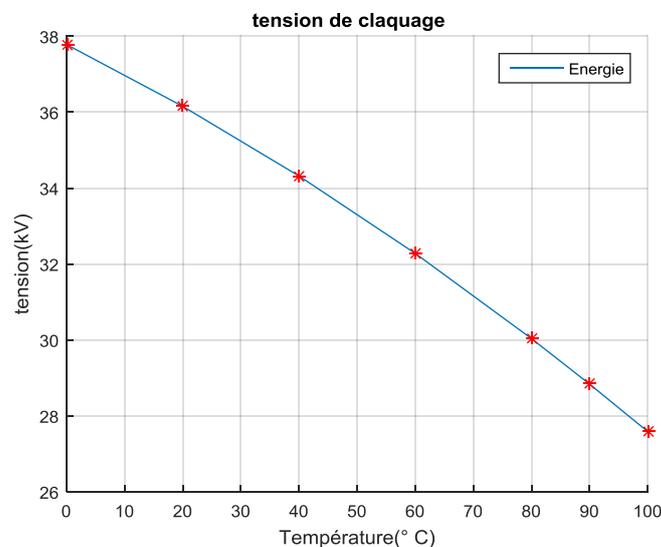


Figure 27: tension de claquage en fonction de la température

Comme on peut le constater, plus la température augmente plus la tension de claquage diminue à la température 0 °C, la tension de claquage est la plus importante et elle chute

d'environ 35% à la température 100 °C, ce résultat montre à quel point une bonne isolation thermique ainsi qu'un bon refroidissement sont nécessaires dans ce type de véhicule.

Pour la configuration initiale entre spires, on a trouvé une variation de

$U = -0.0003T^2 - 0.763T + 38$  Ce résultat trouve son explication dans la relation [27], car comme on vient de le montrer dans l'étude précédente plus la température initiale augmente moins le liquide a besoin d'Énergie pour s'évaporer

#### 4.1.5.1.3 Influence de la température sur la TADP :

Température en (° C)	0	20	40	60	80	90	100
TADP (kV)	1.6	1.5	1.3	1.2	1.0	0.8	0.7

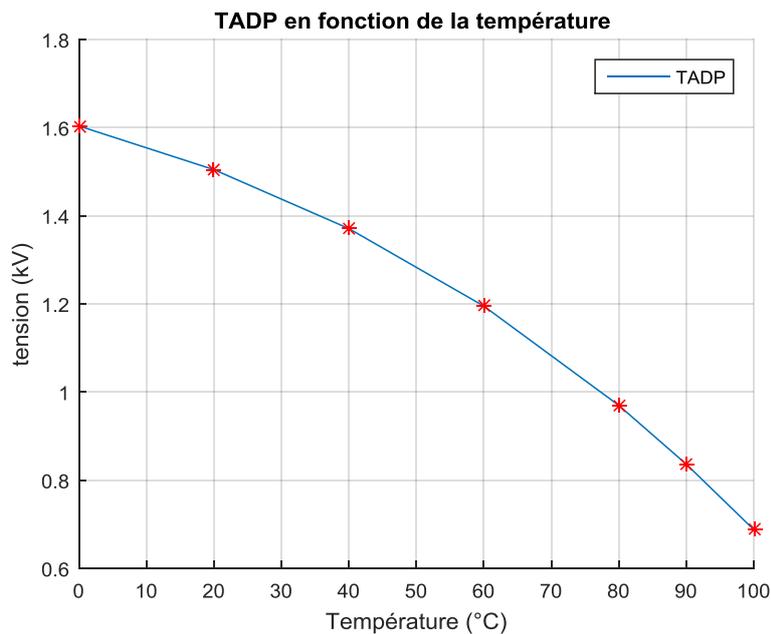


Figure 12 : TADP en fonction de la température

De même pour la tension d'apparition des décharges partielles, on peut constater que plus la température augmente plus la TADP diminue à la température 0 °C, la valeur TADP est la plus importante et elle chute d'environ 62% à la température 100 °C. On remarque que la variation est plus importante pour les niveaux de tension provoquent les décharges partielles que ceux provoquant le claquage.

#### 4.1.5.1.4 Conclusion :

Les niveaux de tension de claquage comme ceux de la tension d'apparition des décharges partielles sont très liés à la température du système, plus celle-ci augmente et plus les niveaux de tension diminuent. Ceci est dû au fait que plus la température initiale du liquide augmente plus l'énergie nécessaire à l'évaporation du liquide diminue. Il est donc nécessaire de maintenir la température du diélectrique isolant (huile minérale) à une température constante par le biais d'un système de refroidissement afin de garantir un niveau de tension de claquage et TADP constant définie par le cahier de charge

#### 4.1.5.2 Influence de la pression

##### 4.1.5.2.1 Influence de la pression sur l'énergie de vaporisation :

De la même façon que pour l'évaluation de l'influence de la température sur l'énergie de vaporisation, nous allons utiliser l'équation (27) mais cette fois nous allons considérer une température constante et nous allons varier la pression :

Pression (bar)	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
Energie (mJ)	0.0409	0.0818	0.1228	0.1637	0.2046	0.2455	0.2864	0.3274	0.3683	0.4092

Tableau 10: énergie consommée en fonction de la pression

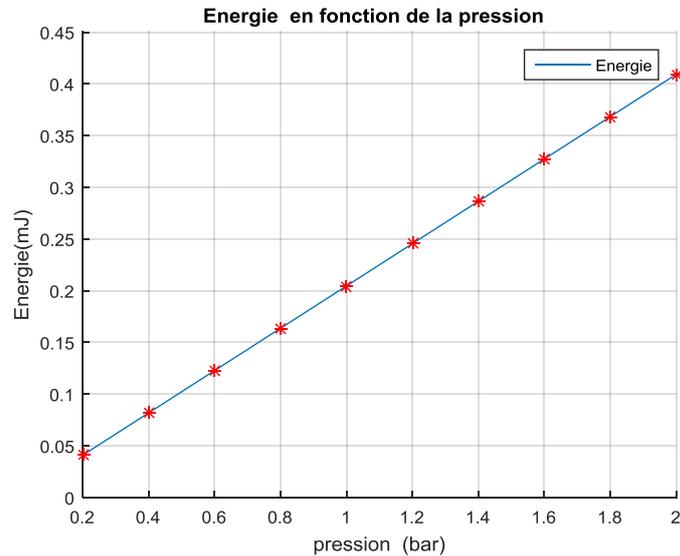


Figure 28: énergie consommée en fonction de la pression

Comme on peut le remarquer, plus la pression augmente et plus l'énergie nécessaire à la vaporisation du liquide augmente avec une variation linéaire avec une équation de droite de  $E = 0.2046P - 2.61 * 10^{-5}$

Comme pour l'étude de l'influence de la température, nous allons faire varier la pression de 0.5 bar à 2.5 bar et étudier son impact sur la tension de claquage et la TADP.

##### 4.1.5.2.2 Influence de la pression sur la tension de claquage :

Pression (bar)	0.5	1	1.20	1.5	1.75	2	2.25
Tension de claquage (kV)	31	36	42	46	48	50	53

Tableau 11 tension de claquage en fonction de la pression

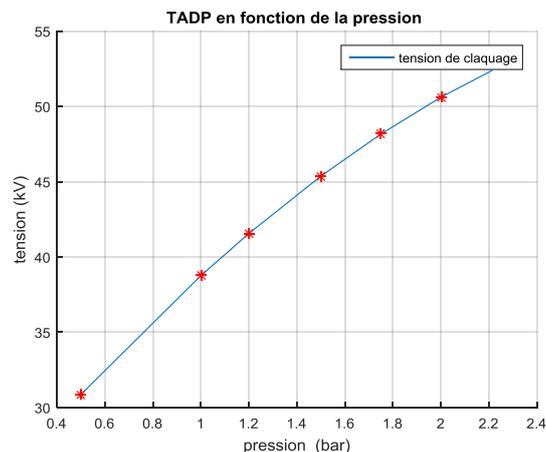


Figure 29: tension de claquage en fonction de la pression

D'après les résultats obtenus, on peut voir que plus la pression augmente plus la tension de claquage augmente. A une pression de 0.5 bar la tension de claquage est la plus petite et elle augmente d'environ 24% à une pression de 2 bar ; ce résultat est très important car les véhicules électriques sont amenés à fonctionner dans des régions de haute et basse altitude ce qui fait que l'huile isolante est soumise à une gamme de pression dont il faut prendre compte lors du dimensionnement de l'isolation.

Pour la configuration entre spires initiale on a trouvé une variation qui vérifie l'équation  $U = -2.16P^2 - 18.83P + 21.53$ . Comme pour le cas de la température, ce résultat trouve son explication dans la relation (27) car comme on l'a expliqué dans le cas de l'influence de la pression sur l'énergie de valorisation plus la pression augmente plus le liquide a besoin d'énergie pour s'évaporer.

#### 4.1.5.2.3 Influence de la pression sur la TADP

Pression (bar)	0.5	1	1.20	1.5	1.75	2	2.25
TADP (kV)	1.1	1.5	1.55	1.7	1.75	1.8	1.9

Tableau 12: : TADP en fonction de la pression

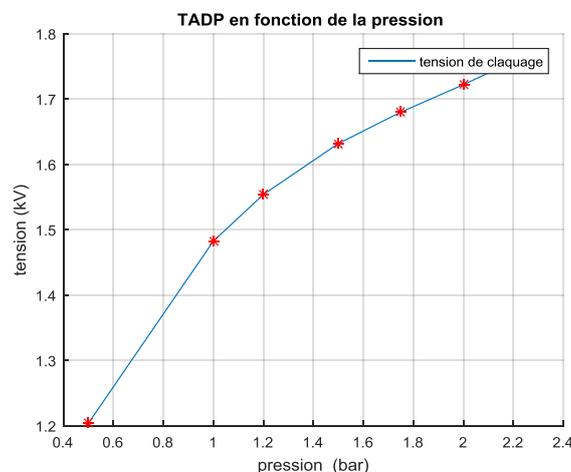


Figure 30 : TADP en fonction de la pression

De même pour la tension d'apparition des décharges partielles on peut constater que plus la pression augmente, plus la TADP augmente, à la pression 0.5 bar la valeur TADP est la plus faible et elle augmente d'environ 62% pour une pression de 2 bar. On remarque que la variation est plus importante pour les niveaux de tension provoquent le claquage de l'isolation

Pour la configuration entre spires initiale on a trouvé une variation

$$TADP = -0.2P^2 + 0.95P + 0.87$$

#### 4.1.5.2.4 Conclusion :

Les résultats trouvés pour l'étude de l'influence des conditions de température et de pression sur l'énergie nécessaire à évaporer un volume de liquide montrent à quel point ces conditions peuvent influencer sur la caractéristique d'isolation des diélectriques liquides, car comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent la tension de claquage et celle de

l'apparitions des décharges partielles sont directement liées à l'énergie consommée lors de la phase de préclaquage qui consiste à créer une phase gazeuse .

## 4.2 Configuration entre phases et masse

### 4.2.1 Estimation primaire

Dans tous les cas de figure nous allons considérer une huile diélectrique avec les caractéristiques physicochimiques suivantes :

$C_p$ la chaleur spécifique (huile)	2,9 J/g
$L_v$ la chaleur latente de vaporisation (huile)	33900 J/mol
$T_o$ la température ambiante (huile)	293 K
$T_v$ , la température d'ébullition (huile)	405 K
P pression (huile)	1 atm
M masse molaire (huile)	1500g/mol
Permittivité relative (huile)	3.3
Permittivité relative (NPN)	3.5

Pour une configuration entre spire avec les paramètres géométrique suivants :

Rayon de la spire	$6.25 \cdot 10^{-4}$ m
Distance inter électrode	320 $\mu$ m
Démontions de l'émail	$3.8 \cdot 10^{-5}$ m

On trouve une capacité  $C=0.54 \cdot 10^{-10}$  F

Tension de claquage  $U = 54$  Kv

Tension d'apparition de décharges partielles TADP = 2.1Kv

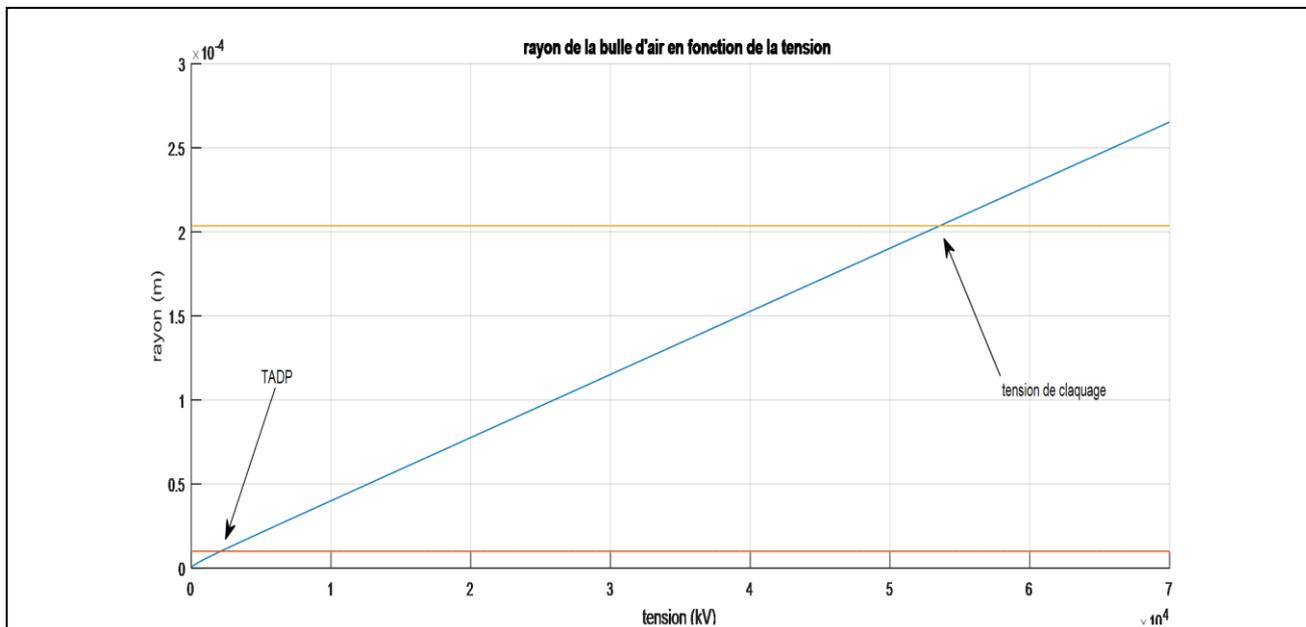


Figure 31 évolution du rayon de la bulle de gaz en fonction de la tension appliquée (entre phases et masse)

Comme on peut le voir sur la figure 15 la tension susceptible de provoquer une décharge partielle conformément à la loi de Paschen est de 2.1 kV. Ce niveau de tension est celui pour lequel le système d'électrode a besoin pour créer une bulle de gaz dont le diamètre est égal à 20 $\mu$ m, cette bulle croit en volume en fonction de la tension jusqu'à remplir le domaine inter-électrode pour un niveau de tension de 54 kV et c'est là où on considère que le claquage du système a lieu. Par rapport au système entre spire on constate que les niveaux de tensions provoquent le claquage et la TADP sont plus grand que la configuration spire masse cette évaluation primaire a montré que la configuration entre phases et masse est plus rigide.

#### *4.2.1.1 Conclusion :*

Les résultats de l'évaluation de la tension d'apparition des décharges partielles et celle du claquage de la configuration entre phases et masse montre que cette dernière est plus rigide que la configuration entre spires car nous avons trouvé que pour la tension de claquage pour cette configuration est de 54kV et celle de la configuration entre spires est de 36kV ce résultats trouve son explication dans le fait que la capacité des électrodes de la configuration étudiée est moins important que le précédent, ceci est dû à la distance entre électrode qui est plus importante d'un côté et à la géométrie du système d'un autre coté donc conformément à l'équation (24) qu'on a retrouvé. La tension de claquage et la TADP doivent êtres moins importants pour une capacité moins importante et c'est ce qu'on a trouvé.

#### 4.2.2 Influence de la taille de l'email

Etant donné que l'email est un composant essentiel du système d'isolation que le précédant il est intéressant d'étudier la variation de la tension de claquage et de la TADP en fonction des dimensions de ce dernier de la même façon qu'on l'a fait pour la configuration entre spires.

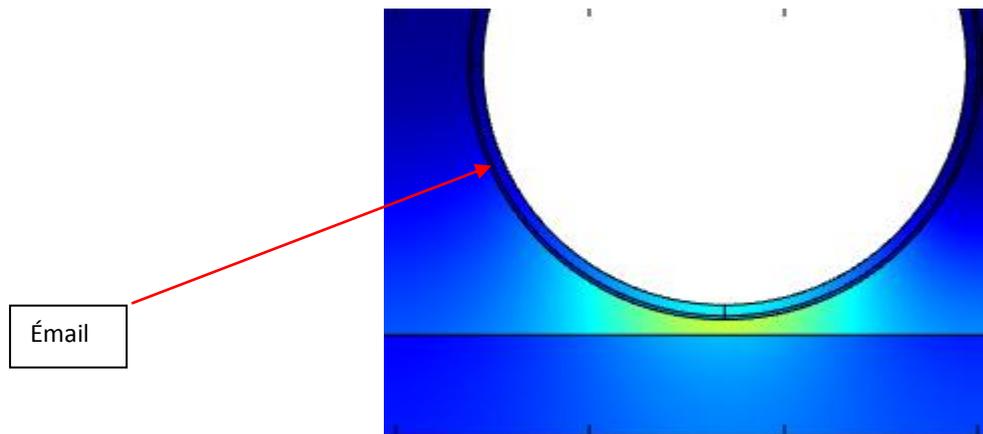


Figure 32:isolation système spire masse

On considère un émaillage de  $3.8 \cdot 10^{-5}$  m et on étudie la variation des deux tensions en fonction du pourcentage de l'email

##### 4.2.2.1 Influence de la taille de l'email sur la tension de claquage :

Émail (%)	10	30	50	70	100	150	200
Tension de claquage (kV)	52.6	53	53.5	54	54.5	56	57

Tableau 13 : tension de claquage en fonction de l'épaisseur de l'email (spire masse)

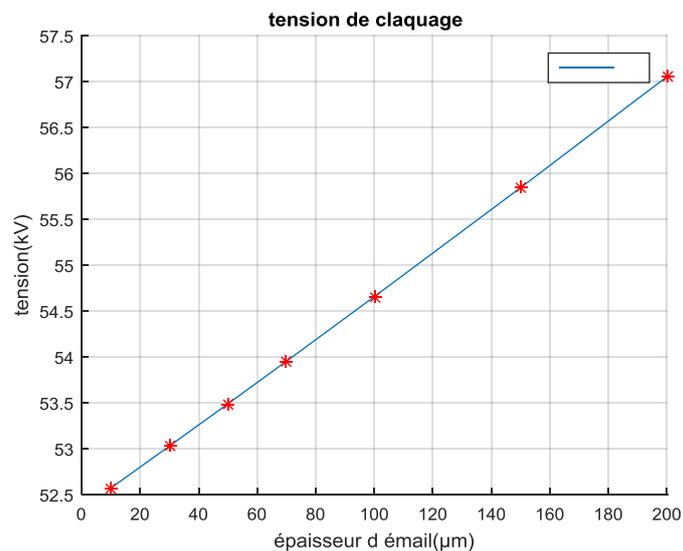


Figure 33: tension de claquage en fonction de l'épaisseur de l'email (spire masse)

Nous remarquons que plus l'épaisseur de l'email augmente plus la tension de claquage augmente. Nous pouvons remarquer aussi que le fait d'augmenter l'épaisseur de l'email de 10% à 200% a augmenté la tension de claquage d'environ 8% et que la variation est linéaire contrairement à la configuration entre spires avec une équation de droite de  $= 0.0227d + 52.3446$ .

On explique la linéarité de cette variation par le fait de la rigidité de cette configuration car pour une augmentation de 8% le système ne peut pas montrer des non linéarités cette plage d'épaisseur, ce qui veut dire que pour que des non linéarités apparaissent il faut augmenter l'épaisseur de l'email jusqu'à 800% voire 1000%.

#### 4.2.2.2 Influence de la taille de l'email sur la TADP :

Émail (%)	10	30	50	70	100	150	200
TADP ( kV)	2.00	2.04	2.08	2.1	2.16	2.23	2.31

Tableau 14 :TADP en fonction de l'épaisseur de l'email (spire masse)

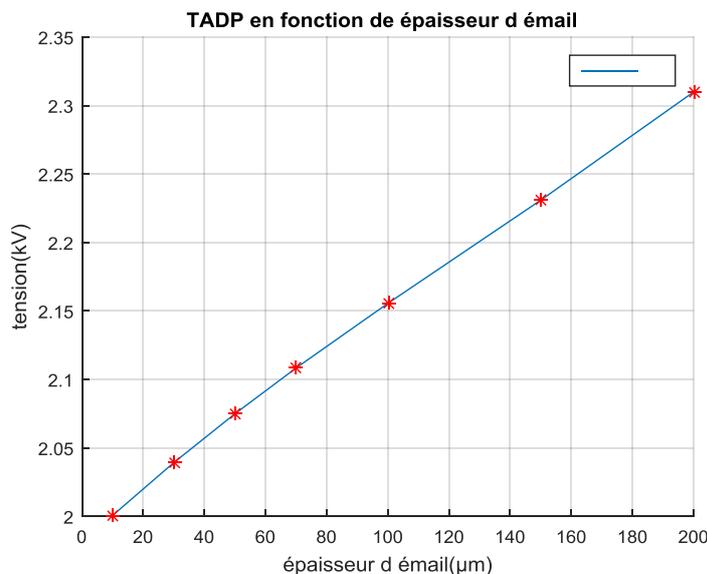


Figure 34:TADP en fonction de l'épaisseur de l'email (spire masse)

Comme pour la tension de claquage on remarque que plus l'épaisseur de l'email augmente plus la TADP augmente on remarque que pour une variation de l'épaisseur de l'email de 10 à 200% la tension d'apparition des décharges partielles augmente d'environ de 15%. Cette variation peut être considérée importante par rapport à l'évolution de la tension de claquage qui a varié de plus de 8%. On peut dire que l'évolution de la TADP est un peu rapide par rapport à la tension de claquage.

#### 4.2.2.3 Conclusion :

L'émaillage est utilisé afin d'isoler le composant électrique entre eux. Sa première fonction est d'éliminer le contact direct des fils de cuivres entre eux, la seconde fonction est d'améliorer l'isolation en empêchant le contact de l'huile isolante et les spires. Les résultats montrent que pour une isolation optimale le choix de l'épaisseur de l'email est un paramètre très important dont il faut prendre compte lors de la réalisation de l'isolation comme on vient de le montrer l'augmentation de la taille de l'email de 200 % a pu augmenter la tension

de claquage d'environ 8% et celle d'apparition des décharges partielles d'environ 10% .Grace à un choix de la dimension de l'émail et de ses caractéristiques physico-chimiques nous pouvant obtenir une isolation parfaitement adaptée à un cahier de charge précis. Les résultats obtenus permettent de choisir une dimension adéquate à un niveau de tension toléré que ça soit pour la tension de claquage et pour la tension d'apparition des décharges partielles.

#### 4.2.3 Influence de la distance inter électrode

La distance inter électrode est un paramètre très intéressant à étudier car il intervient à la fois dans la valeur de la capacité du condensateur du système entre phases et masse mais aussi dans le volume de la bulle de gaz qui provoque le claquage.

Comme précédemment dans cette partie de l'étude nous allons varier la distance inter électrode et nous allons étudier l'impact de la variation de cette dernière sur la tension de claquage et sur la TADP

Distance inter électrodes

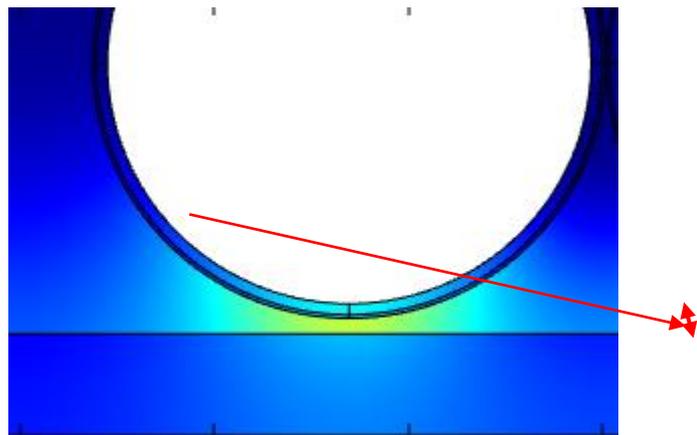


Figure 19 isolation système (spire masse)

##### 4.2.3.1 1.3.1 Influence de la distance inter électrode sur la tension de claquage :

Distance ( $\mu\text{m}$ )	0	50	100	150	200	250	300	350
Tension de claquage (kV)	25	31	36	40	44	48	51	54

Tableau 15:Tension de claquage en fonction de la distance (spire masse)

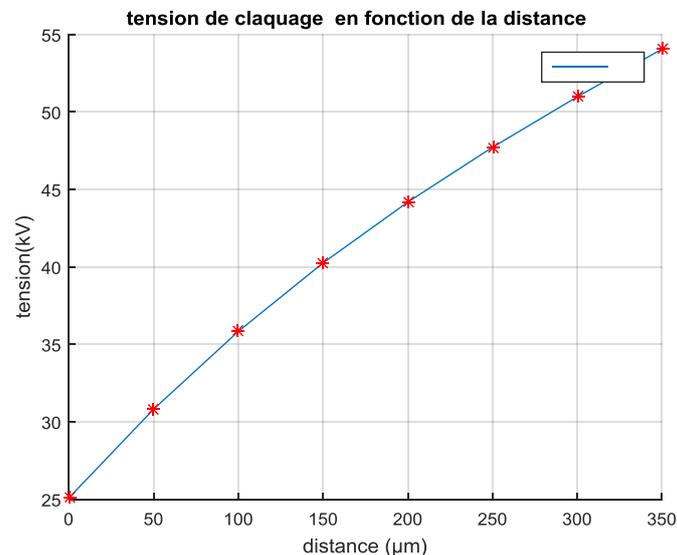


Figure 35:Tension de claquage en fonction de la distance (spire masse)

Nous remarquons que plus la distance inter-électrode augmente plus la tension de claquage augment, on remarque aussi que la variation de la tension de claquage en fonction de la distance a une forme non linéaire avec une interpolation des points on peut extraire une fonction

$U(d) = -0.0002 d^2 + 0.1222 d + 25.10$  . On remarque cette l'augmentation qui a suivi la variation de la distance de 0 a  $340\mu\text{m}$  est de 54% ce qui est énorme vu l'augmentation de la tension par rapport a la faible dimension de la distance entre phases et masse

#### 4.2.3.2 Influence de la distance inter électrode sur la TADP :

Distance ( $\mu\text{m}$ )	0	50	100	150	200	250	300	350
TADP (kV)	1.26	1.39	1.51	1.61	1.71	1.82	1.94	2.1

Tableau 16TADP en fonction de la distance (spire masse)

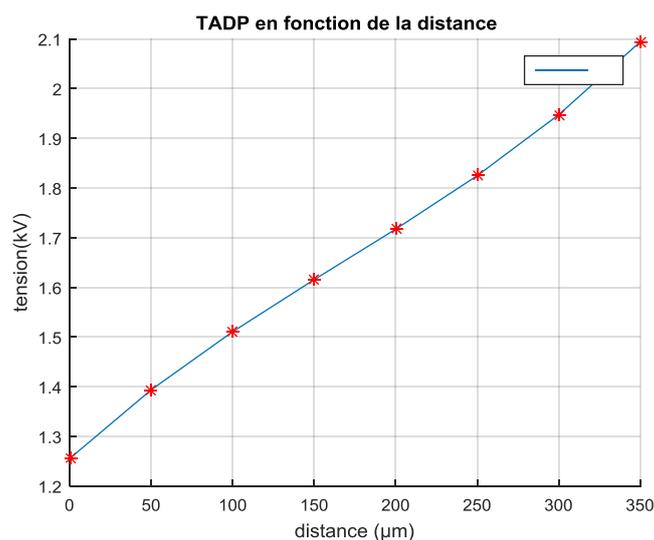


Figure 36: TADP en fonction de la distance (spire masse)

Pour la TADP, nous remarquons que plus la distance augmente plus la TADP augmente, la variation peut être assimilée à une droite d'équation  $U = 0.0030d + 1.25$  ,on peut remarquer aussi que la faite d'augmenter la distance inter-électrode de 0 à  $350\mu\text{m}$  a fait augmenter la TADP d'environ 42% .contrairement à la tension de claquage, nous pouvons remarquer une quasi linéarité de la variation de la tension d'apparition de décharge partielles on explique cette linéarité par le fait que le volume de bulle de gaz pouvant provoquer des décharges partielles d'après la loi de Paschen est indépendant de la géométrie.

#### 4.2.3.3 Conclusion :

Grace aux résultats obtenus nous avons pu mettre en évidence l'impact de la distance entre phases et masse sur le comportement de la configuration vis-à-vis au niveaux de tensions susceptible de provoquer le claquage et la décharges partielles car comme nous l'avons expliqué pour le cas de la configuration entres spires La distance e est liée à la fois la capacité du condensateur (électrode) et la taille de la bulle de gaz susceptible de provoquer le claquage ,d'où étroite liaison avec ces niveaux de tension et D'où la non linéarité de la variation de la tension de claquage en fonction de cette dernière car le fait d'augmenter la

distance induit le variation deux paramètres intervenants dans le modèle (volume de la bulle et capacité du condensateur du système).

Comme on vient de le voir l'influence de cette distance est tellement importante que le simple fait d'augmenter la distance de 0  $\mu\text{m}$  à 340  $\mu\text{m}$  on a pu constater une augmentation de la tension de claquage de 54%. Comme pour le cas de la configuration entre sires ce résultat est très important à prendre en compte car lors de la fabrication des défauts peuvent survenir un décalage de quelques dizaines de micro mètre peut engendrer des niveaux de tension inferieur a ceux tolérés et donc le claquage de cette isolation

#### 4.2.4 Influence du désémaillage

Le désémaillage est un problème de fabrication qui peut survenir lors de l'émaillage des spires. Ce problème est un défaut 'émaillage des spires c'est à dire que sur une partie de la spire le cuivre est en contact direct avec l'huile diélectrique comme le montre la figure 27

Désémaillage

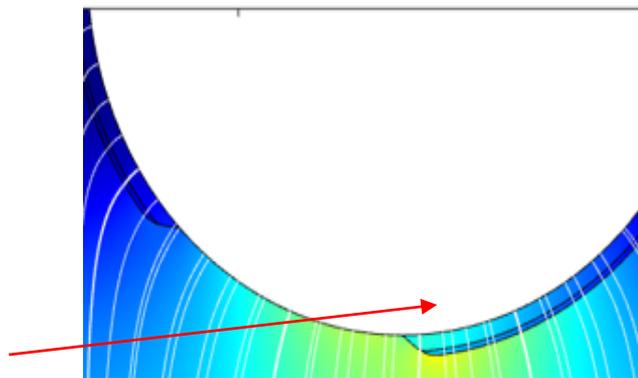


Figure 37 : Désémaillage (spire masse)

Lors de l'étude de l'impact du défaut nous allons considérer un désémaillage de plusieurs angles variants de 10 à 90 degré

##### 4.2.4.1 Influence du désémaillage sur la tension de claquage :

Désémaillage (°)	10	25	50	60	70	80	90
Tension de claquage (kV)	53	50	47	43	39	35	32

Tableau 17: Tension de claquage en fonction du désémaillage (spire masse)

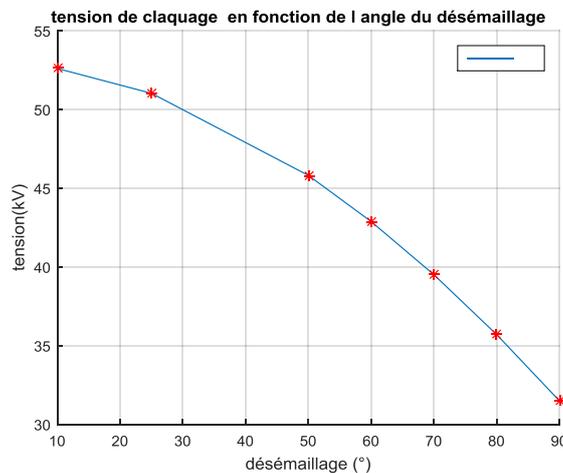


Figure 38: Tension de claquage en fonction du désémaillage (spire masse)

On remarque que la tension de claquage diminue avec l'augmentation de l'angle désémaillage et qu'elle chute de 36% en enlevant le quart de l'émail. Ce résultat est très logique car la fonction de l'isolation diminue avec l'élévation de l'angle du désémaillage.

#### 4.2.4.2 Influence du désémaillage sur la TADP :

Désémaillage (°)	10	25	50	60	70	80	90
TADP (kV)	2.1	2.05	1.98	1.94	1.9	1.85	1.8

Tableau 17 : Tableau 18 TADP en fonction du désémaillage (spire masse)

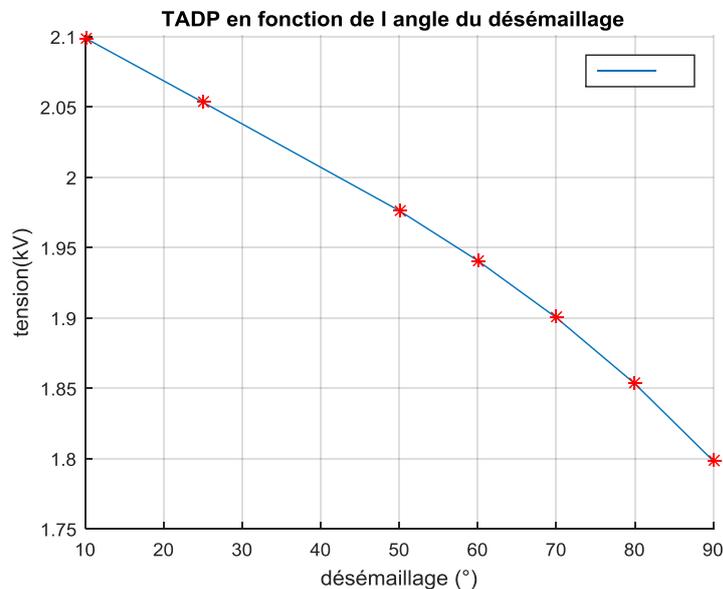


Figure 39 : TADP en fonction du désémaillage (spire masse)

Comme pour la tension de claquage, la tension d'apparition des décharges partielles diminue avec l'augmentation de l'angle désémaillage et que cette dernière chute d'environ 14%, quand on enlève le quart de l'émail on remarque aussi que cette variation ne présente pas de linéarité contrairement à la configuration entre spires comme pour la tension de claquage ce résultat était attendu car la fonction d'isolation du système est en quelque sorte garantie par l'émail une fois que l'émail n'est plus la rigidité du système diminue

#### 4.2.4.3 Conclusion

la fonction principale de l'émail est d'empêcher le liquide d'entrer en contact direct avec l'huile isolante les caractéristiques physicochimiques de ce dernier diminue le transfert de chaleur grâce à sa faible conductivité thermique .le désémaillage conduit à un défaut d'isolation qui met en contact le liquide directement avec les conducteurs métalliques ce qui engendre un échauffement local du liquide dans la zone de désémaillage cette échauffement conduit à une formation plus rapide des bulles de gaz à des niveaux de tension plus faibles ce qui fait que Ce défaut de fabrication peut avoir des conséquences dramatiques sur la tension de claquage et celle d'apparition des décharges partielles comme on a pu voir des chutes du niveau de tension de 36% pour la TADP et de 14% pour la tension de claquage par rapport à la configuration initiale sans défauts

#### 4.2.5 Influence des conditions de température et de pression

Dans la partie dédiée à la configuration entre spires nous avons mis en évidence l'influence des conditions atmosphériques sur la quantité d'énergie requise à la formation des bulles de gaz en d'autres termes l'énergie consommée pendant la phase de pré claquage. Cette partie portera uniquement sur l'influence de la température initiale et la pression atmosphérique sur le claquage et la tension d'apparition des décharges partielles pour la configuration entre phases et masse

Nous allons considérer une plage de température dans laquelle le moteur est amené à fonctionner. Étant donné que l'huile diélectrique est un composant de ce moteur on suppose que tous les composants de la configuration étudiée sont portés à la même température (émail, huile ,les spires en cuivre ....)

##### 4.2.5.1 Influence de la température

###### 4.2.5.1.1 Influence de la température sur la tension de claquage :

Température (° C)	0	20	40	60	80	90	100
Tension de claquage (kV)	58	54	51	48	44	42	39

Tableau 19 tension de claquage en fonction de la température (spire masse)

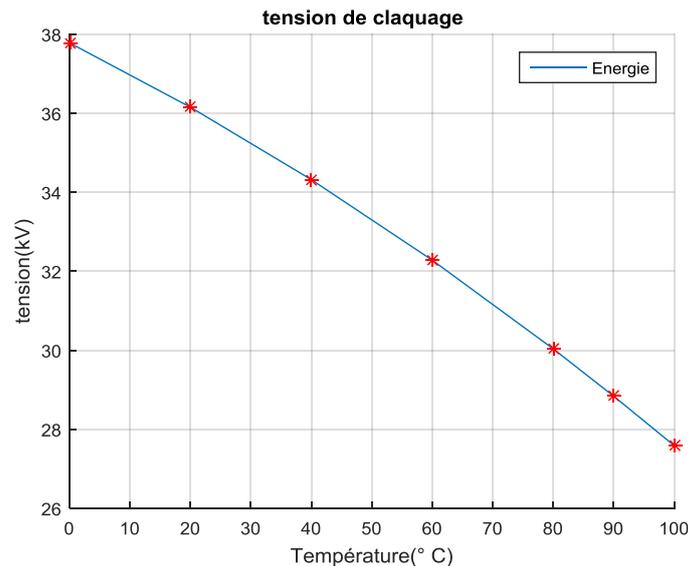


Figure 40: tension de claquage en fonction de la température (spire masse)

Comme on peut le constater plus la température augmente plus la tension de claquage diminue à la température 0 C la tension de claquage est la plus importante et elle chute d'environ 35% à la température 100 C ce résultat montre à quel point une bonne isolation thermique ainsi qu'un bon refroidissement sont nécessaires dans ce type de véhicule.

Pour la configuration entre spires initiale nous avons trouvé une variation

$U = -0.0003T^2 - 0.763T + 38$  . Ce résultat trouve son explication dans la relation (27) car comme on vient de le montrer dans l'étude précédente (cas de l'étude du système entre

spires) plus la température initiale augmente moins le liquide a besoin d'énergie pour s'évaporer

#### 4.2.5.1.2 Influence de la température sur la TADP :

Température en (° C)	0	20	40	60	80	90	100
TADP (kV)	2.3	2.1	1.9	1.8	1.75	1.6	1.4

Tableau 20 : TADP en fonction de la température (spire masse)

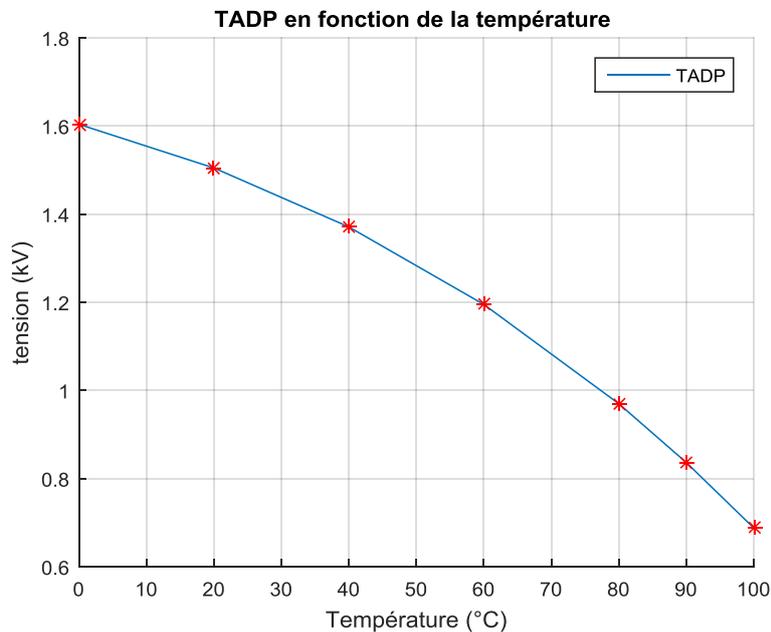


Figure 41: TADP en fonction de la température (spire masse)

De même pour la tension d'apparition des décharges partielles on peut constater que plus la température augmente plus la TADP diminue. À la température 0°C la valeur TADP est la plus importante et elle chute d'environ 62% à la température 100°C. On remarque que la variation est plus importante pour les niveaux de tension qui provoquent les décharges partielles que ceux qui provoquent le claquage.

#### 4.2.5.1.3 Conclusion :

Les niveaux de tension de claquage, comme ceux de la tension d'apparition des décharges partielles, sont très liés à la température du système. Plus celle-ci augmente, plus les niveaux de tension diminuent. Ceci est dû au fait que plus la température initiale du liquide augmente, plus l'énergie nécessaire à l'évaporation du liquide diminue. Ce résultat peut être généralisé sur toutes les configurations d'isolation car ce résultat ne prend pas compte de la géométrie de la configuration, mais seulement des caractéristiques physico-chimiques des composants de l'isolation, tels que (la conductivité thermique, la masse molaire, la permittivité électrique ...)

Il est donc nécessaire de maintenir la température du diélectrique isolant (huile minérale) à une température constante par le biais d'un système de refroidissement afin de garantir un niveau de tension de claquage et TADP constant défini par le cahier de charge.

#### 4.2.5.2 Influence de la pression

Comme pour l'étude l'influence de la température nous allons faire varier la pression de 0.5 bar à 2.25 bar et étudier son impact sur la tension de claquage et la TADP

##### 4.2.5.2.1 Influence de la pression sur la tension de claquage :

Pression (bar)	0.5	1	1.20	1.5	1.75	2	2.25
Tension de claquage (kV)	44	54	58	63	66	69	74

Tableau 21: tension de claquage en fonction de la pression (spire masse)

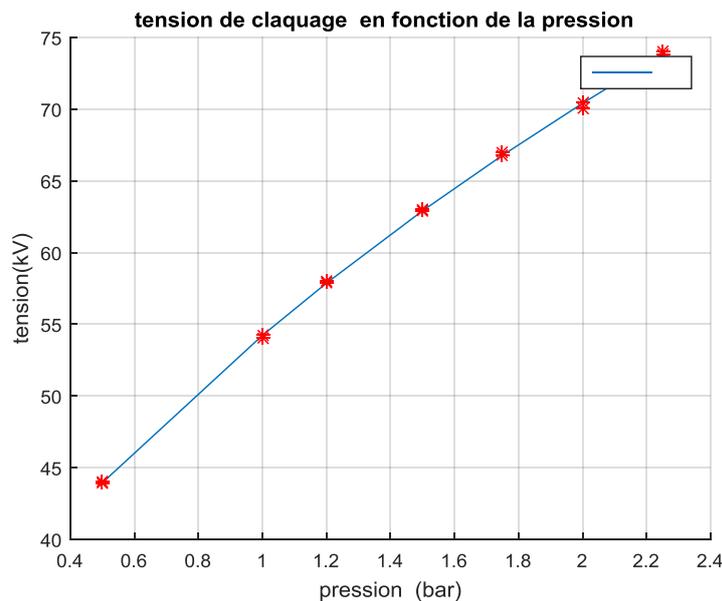


Figure 42 tension de claquage en fonction de la pression (spire masse)

D'après les résultats obtenus on peut voir que plus la pression augmente plus la tension de claquage augmente à une pression de 0.5 bar la tension de claquage est la plus petite et elle augmente de environ 24% à une pression de 2 bar ce résultat est très important car les véhicules électriques sont amenés à fonctionner dans des régions de haute et basse altitude ce qui fait que le liquide isolant est soumis à une gamme de pression dont il faut prendre compte lors du dimensionnement de l'isolation. Pour la configuration entre spires initiale on a trouvé une variation de  $U = 0.54P^3 - 4.8P^2 + 28.30P + 31.20$

Comme pour le cas de la température ce résultat trouve son explication dans la relation (27) car comme on l'a expliqué dans le cas de l'influence de la pression sur l'énergie de valorisation plus la pression augmente plus le liquide a besoin d'énergie pour s'évaporer.

##### 4.2.5.2.2 Influence de la pression sur la TADP :

Pression (bar)	0.5	1	1.20	1.5	1.75	2	2.25
TADP (kV)	1.6	2.1	2.3	2.5	2.7	2.8	3

Tableau 22: TADP en fonction de la pression (spire masse)

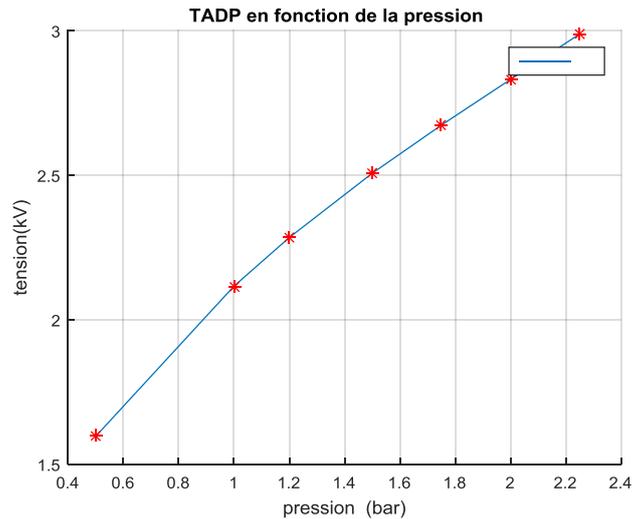


Figure 43: TADP en fonction de la pression (spire masse)

De même pour la tension d'apparition des décharges partielles on peut constater que plus la pression augmente plus la TADP augmente à la pression 0.5 bar la valeur TADP est la plus faible et elle augmente d'environ 62% pour une pression de 2 bar. Ce on remarque que la variation est plus importante pour les niveaux de tension provoquent

Pour la configuration entre spires initiale on a trouvé une variation

$$TADP = -0.5P^2 + 1.6P + 0.88$$

#### 4.2.5.2.3 Conclusion :

La pression l'une des conditions atmosphériques qui influe sur la quantité d'énergie nécessaire à la génération des bulles de gaz lors de l'étude comme nous l'avons vu lors de l'étude de l'influence de la pression sur l'énergie de vaporisation dans la partie dédiée à la configuration entre spires. D'après les résultats précédant nous avons vu que pour n'importe quelles configurations d'isolement l'influence de la pression est la même plus celle-ci augmente plus la tension de claquage et celle de l'apparition des décharges partielles augmentent, donc nous pouvons généraliser ce résultat sur toutes les configurations.

## 5 Conclusion :

Dans ce projet nous avons proposé un modèle simplifié de la théorie du claquage dans les diélectriques liquides permettant de déterminer la tension de claquage et la tension seuil d'apparition des décharges partielles (TADP).

Le modèle élaboré est une synthèse de plusieurs disciplines qui combine chimie, électrotechnique et électrothermie. Le rôle de ce modèle est de donner une estimation de la tension au-delà de laquelle des décharges partielles peuvent avoir lieu mais aussi un seuil de tension pouvant provoquer un claquage dans une configuration d'isolation donnée.

Dans ce travail nous nous sommes intéressés au mécanisme de claquage par phase gazeuse. Nous avons considéré que le claquage des isolants liquides se produit par le biais d'un changement de l'état physique du diélectrique liquide au voisinage de l'électrode sous tension. Le modèle élaboré s'appuie sur la résolution numérique par éléments finis des équations de Maxwell en utilisant des simulations de configuration d'isolation faites sous l'environnement COMSOL Multiphysics.

Dans ce projet, nous avons étudié deux configurations d'isolation proposés par l'entreprise Renault grâce au modèle élaboré. Ainsi, nous avons pris en considération la configuration entre spires et la configuration entre phases et masse. Les résultats obtenus sont très cohérents avec ceux trouvés expérimentalement dans des études faites sur les configurations d'isolation types de moteurs électriques.

Nous pouvons résumer les principales conclusions dans ce qui suit.

- La dimension des composants d'isolation comme l'émail et les caractéristiques géométriques comme la distance entre électrodes ont un impact très important sur la tension de claquage et la TADP. A cet effet, le choix de ces paramètres doit être primordial afin de garantir une isolation optimale.
- Les conditions d'essais comme la température et la pression avaient aussi un impact énorme sur la rigidité des systèmes d'isolation. Nous avons constaté que l'augmentation de la température engendrait une chute de la rigidité. Ce résultat montre l'importance des systèmes de refroidissement dans les véhicules électrique.
- Dans ce travail nous avons aussi étudié l'influence des conditions de température et de pression sur la consommation d'énergie lors de la phase de préclaquage. Cette étude a permis de justifier les résultats obtenus dans les études faites sur l'influence de la température et la pression sur la tension de claquage et sur la TADP. Nous pouvons conclure que plus la température augmente et moins le liquide a besoin d'énergie pour s'évaporer et que plus la pression augmente, plus le liquide a besoin d'énergie pour s'évaporer.

Le modèle que nous avons mis au point est une façon simplifiée de considérer le phénomène de claquage dans les diélectriques liquides. Il peut servir de point de départ pour élaborer un critère destiné à évaluer les risques de claquage dans les diélectriques liquides.

## **BIBLIOGRAPHIE**

[1] J. Martin « *Etude et caractérisation d'onde de pression générée par une décharge électrique dans l'eau Application à la fracturation électrique de roches* ». Thèse de doctorat L'UNIVERSITE DE PAU.

[2] ABIDI Sief-Eddine « influence du vieillissement thermique sur les propriétés des huiles de transformateurs ». Thèse de magister Ecole Nationale Polytechnique. ENP 2012

[3] Pr A. Boubakeur « cours de haute tension » Ecole Nationale Polytechnique.

[5] M. SLAMA « HAUTE TENSION Production, Métrologie et Applications » Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.

[6] LOUBEAU Florian synthèse de simulation de TADP dans l'air, Ingénieur d'étude – AKKA,2017

[7] J. NIETO-SALAZAR, O. LESAINT, A. DENAT, and A. ROBLEDO-MARTINEZ, "Breakdown and Pe-Breakdown in Water Under Impluse Voltage : Propagation of Positive Streamers," Rotterdam, 2003.

,