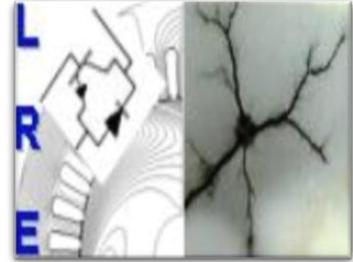


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département : ELECTROTECHNIQUE

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire de Master en Electrotechnique

Intitulé :

**Simulation du Champ Electrique
dans un Transformateur en
Présence d'Impuretés ou de Défauts**

HAMOUCHE Toufik

Présenté et soutenu le 18 juin 2017

Devant le jury composé de :

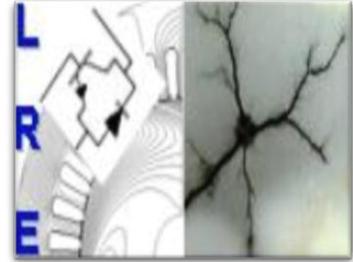
Président :	Mr L. NEZLI	Professeur	ENP
Rapporteurs :	Mr A. MEKHALDI	Professeur	ENP
	Mr A. BOUBAKEUR	Professeur	ENP
Examineur :	Mr A. TEGUAR	Professeur	ENP

Juin 2017

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département : ELECTROTECHNIQUE

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire de Master en Electrotechnique

Intitulé :

**Simulation du Champ Electrique
dans un Transformateur en
Présence d'Impuretés ou de Défauts**

HAMOUCHE Toufik

Présenté et soutenu le 18 juin 2017

Devant le jury composé de :

Président :	Mr L. NEZLI	Professeur	ENP
Rapporteurs :	Mr A. MEKHALDI	Professeur	ENP
	Mr A. BOUBAKEUR	Professeur	ENP
Examineur :	Mr A. TEGUAR	Professeur	ENP

Juin 2017

ملخص

محاكاة المجالات الكهربائية ضرورية في تصميم العزل للمعدات الكهربائية. العزل متعرجا هي واحدة من المكونات الرئيسية للآلات الكهربائية، ولكن أيضا مصدرا رئيسيا لفشلهم. وكان الغرض الرئيسي من هذا العمل دراسة تأثير وجود الشوائب في الزيت (أو الهواء) على توزيع الحقل الكهربائي في واجهة من العزل من محرك كهربائي عن طريق البرنامج **COMSOL Multiphysics®**.

كلمات مفتاحية: المحاكاة، المجال الكهربائي، عازل، الشوائب، والسيارات الكهربائية، **COMSOL Multiphysics**.

Abstract

The simulation of electric fields is essential in the design of insulators for electrical equipment. The insulation of windings is one of the major components of electrical machines, but also one of the main sources of their failure. The main purpose of this work is to study the influence of the presence of impurities in the oil (or air) on the distribution of the electric field at the interfaces of the insulation of an electric motor, using the software COMSOL Multiphysics®.

Key words: Simulation, electric field, insulation, impurities, electric motor, COMSOL Multiphysics.

Résumé

La simulation des champs électriques est indispensable dans la conception des isolants pour équipement électriques. L'isolation des enroulements est l'un des constituants majeur des machines électriques, mais aussi l'une des sources principales de leur défaillance. Le but principal de ce travail est d'étudier l'influence de la présence des impuretés dans l'huile (ou l'air) sur la distribution du champ électrique aux interfaces de l'isolation d'un moteur électrique, au moyen du logiciel COMSOL Multiphysics®.

Mots clés : Simulation, champ électrique, isolant, impuretés, moteur électrique, COMSOL Multiphysics.

Remerciements

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

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

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

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

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

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

Sommaire

Liste des figures

Introduction générale	7
------------------------------------	---

Simulation du champ électrique dans les machines électriques

I. Introduction	8
II. Défauts dans l'isolation des machines électriques	8
III. Description de la motorette	8
IV. Simulations de champs électriques maximaux	9
IV.1 Modèle 1 : Isolation entre spires	10
IV.1.1 Influence des impuretés sur le champ électrique	11
IV.1.1.1 Influence des cavités d'air	11
IV.1.1.2 Influence des vacuoles d'eau	15
IV.1.1.3 Influence des copeaux métalliques	20
IV-2 Modèle 2 : Isolation entre spires, l'émail est constitué de deux couches	21
IV.2.1 Influence des impuretés sur le champ électrique	21
IV.2.1.1 Influence des cavités d'air	21
IV.2.1.2 Influence des vacuoles d'eau	24
IV.3 Model 3 : Isolation entre phase et masse	26
IV.3.1 Influence de défauts dans l'isolation	27
IV.3.1.1 Influence de l'absence du papier isolant	27
IV.3.1.2 Influence de la rupture de $1/8$ é du périmètre de l'émail	28
V. Conclusion	29
Conclusion générale	30
Bibliographie	31

Liste des figures

Figure 1 : Motorette fabriquée selon la norme IEEE 117-1974	9
Figure 2 : Modèle de simulation du champ électrique entre spires	10
Figure 3 : Champ électrique entre spires : (a). L'isolant entre spires est l'air ; (b). La motorette est plongée dans l'huile	10
Figure 4 : Influence du rayon de la cavité d'air R sur le champ électrique : (a). R = 20 μm ; (b). R = 10 μm ; (c). R = 5 μm	11
Figure 5 : Influence de la distance « d » qui sépare les deux cavités d'air sur le champ électrique : (a). d = 20 μm ; (b). d = 10 μm ; (c). d = 5 μm	12
Figure 6 : Influence de la taille de l'ellipsoïde d'air sur le champ électrique : (a). x-semiaxix = 60 μm , y-semiaxis = 20 μm ; (b). x-semiaxix = 40 μm , y-semiaxis = 10 μm ; (c). x-semiaxix = 20 μm , y-semiaxis = 5 μm	13
Figure 7 : Influence du rayon du sommet de l'ellipsoïde d'air sur le champ électrique : (a). x-semiaxix = 20 μm , y-semiaxis = 10 μm ; (b). x-semiaxix = 20 μm , y-semiaxis = 5 μm ; (c). x-semiaxix = 20 μm , y-semiaxis = 2.25 μm	14
Figure 8 : Influence de la distance « d » qui sépare les deux ellipsoïdes d'air sur le champ électrique : (a). d = 20 μm ; (b). d = 10 μm ; (c). d = 5 μm	15
Figure 9 : Influence du rayon « R » de la vacuole d'eau sur le champ électrique : (a). R = 20 μm ; (b). R = 10 μm ; (c). R = 5 μm	16
Figure 10 : Influence de la distance « d » qui sépare les deux cavités d'air sur le champ électrique : (a). d = 20 μm ; (b). d = 10 μm ; (c). d = 5 μm	17
Figure 11 : Influence de la taille de l'ellipsoïde d'eau sur le champ électrique : (a). x-semiaxix = 60 μm , y-semiaxis = 20 μm ; (b). x-semiaxix = 40 μm , y-semiaxis = 10 μm ; (c). x-semiaxix = 20 μm , y-semiaxis = 5 μm	18
Figure 12 : Influence du rayon de courbure du sommet de l'ellipsoïde d'eau sur le champ électrique : (a). x-semiaxix = 20 μm , y-semiaxis = 10 μm ; (b). x-semiaxix = 20 μm , y-semiaxis = 5 μm ; (c). x-semiaxix = 20 μm , y-semiaxis = 2.25 μm	19
Figure 13 : Influence de la distance « d » qui sépare les deux ellipsoïdes d'eau sur le champ électrique : (a). d = 20 μm ; (b). d = 10 μm ; (c). d = 5 μm	20
Figure 14 : L'influence des impuretés métalliques sur le champ électrique : (a). L = 200 μm , l= 100 μm ; (b). L = 80 μm , l= 40 μm ; (c). L = 80 μm , l= 50 μm ; (d). L=80 μm , l= 40 μm	20

Figure 15 : Le champ électrique entre spires dans le cas où l'émail est constitué de deux couches : (a). L'isolant est l'air ; (b). L'isolant est l'huile	21
Figure 16 : L'influence de la présence d'une cavité d'air dans la couche externe de l'émail : (a). Rayon de la sphère = 10 μm ; (b). Rayon de la sphère = 5.7 μm	22
Figure 17 : Influence de la distance « d » qui sépare les deux cavités d'air de même rayon (R=5.7 μm) sur le champ électrique : (a). d = 20 μm ; (b). d = 10 μm ; (c). d = 5 μm	22
Figure 18 : L'influence de la position d'ellipsoïde d'air sur le champ électrique : (a). Position verticale (b). Position horizontale; (c). Rotation de 45°	23
Figure 19 : L'influence de la présence d'une cavité d'eau dans la couche externe de l'émail : (a). Rayon de la sphère = 10 μm ; (b). Rayon de la sphère = 5.7 μm	24
Figure 20 : Influence de la distance « d » qui sépare les deux vacuoles d'eau de même rayon (R=5.7 μm) sur le champ électrique : (a). d = 20 μm ; (b). d = 10 μm ; (c). d = 5 μm	25
Figure 21 : L'influence de la position d'ellipsoïde d'eau sur le champ électrique : (a). Position verticale (b). Position horizontale; (c). Rotation de 45°	25
Figure 22 : Modèle entre phase et masse	26
Figure 23 : Le champ électrique entre phase et masse, l'isolant est l'air : (a). L'émail est constitué d'une seule couche (b). L'émail est constitué de deux couches	26
Figure 24 : Le champ électrique entre phase et masse, l'isolant est l'huile : (a). L'émail est constitué d'une seule couche (b). L'émail est constitué de deux couches	27
Figure 25 : Influence de l'absence du papier isolant sur le champ électrique	27
Figure 26 : Influence de la distance entre les spires et la masse sur le champ électrique.....	28
Figure 27 : Influence de la rupture de 1/8 ϵ du périmètre de l'émail sur le champ électrique : (a). L'isolant est l'air, région 1 ; (b). L'isolant est l'air, région 2 ; (c). L'isolant est l'huile, région 1 ; (d). L'isolant est l'huile, région 2	29

Introduction générale

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

Particulièrement, les machines électriques qui sont des équipements coûteux et très importants dans diverses applications industrielles, ainsi, la nécessité de la surveillance de leur système d'isolation qui est souvent la source principale de ces machines.

Actuellement, les émaux isolants tels que, le polysterimide et le polyamidemide sont très employés comme isolants dans les machines électriques. Leur choix est dicté par plusieurs facteurs : la tension appliquée, l'environnement de travail et la température du fonctionnement. La rupture diélectrique est la cause principale de la défaillance des machines électriques. Pendant l'application du champ électrique intense, ces résines sont sujettes au vieillissement ; ce qui conduit à des avaries dans les équipements où elles sont employées. Donc, une meilleure estimation de l'intensité du champ électrique dans le système d'isolation des machines électriques peut aboutir, entre autre, à augmenter leur fiabilité et leur durée de vie [2].

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

C'est pourquoi, dans ce travail, nous nous intéresserons à appliquer une des techniques de surveillance de l'isolation des équipements, par la simulation des champs électriques dans les machines électriques en présence d'impuretés ou de défauts au moyen du logiciel Comsol Multiphysics®.

Simulation du champ électrique dans les machines électriques

I. Introduction

La machine électrique en général occupe une place primordiale dans les applications industrielles. L'un des constituants les plus critiques de ces machines et aussi l'une des principales sources de leur défaillance est l'isolation de leurs enroulements [3]. Plus de 30 % des défaillances dans les machines électriques sont dues aux problèmes liés à l'isolation [4].

L'isolation des machines électriques de traction est essentiellement composée de fils émaillés assemblés pour réaliser des bobines qui sont imprégnées avec une résine afin d'augmenter leurs propriétés mécaniques, électriques et chimiques [5].

Diverses contraintes peuvent être à l'origine de la rupture de l'isolation ; les principales sont, thermiques, électriques, mécaniques et environnementales [6].

La contrainte électrique peut conduire à une rupture de l'isolation pour différentes raisons dont les problèmes liés au matériau diélectrique lui-même, aux tensions transitoires ainsi qu'aux décharges partielles auxquelles la machine est exposée [7].

Avec le développement technologique du calcul, la simulation des champs électriques est devenue un outil incontestable dans la conception des isolants des équipements électriques de haute tension. De même, elle est de plus en plus utilisée afin d'estimer le risque de voir apparaître ou non des décharges partielles dans les machines électriques en général [8].

II. Défauts dans l'isolation des machines électriques

Au cours des différentes phases de l'élaboration d'un isolant, des impuretés de taille microscopiques et de formes diverses peuvent être incorporées à l'isolant ou créées à l'interface des zones conductrices malgré les précautions prises par les fabricants de matières premières que par les constructeurs. Des inhomogénéités peuvent donc apparaître dans la structure de l'isolant au cours de l'extrusion ou du refroidissement de la couche isolante. Ces hétérogénéités induisent des perturbations dans la distribution du champ électrique ainsi qu'un renforcement de ce dernier pouvant conduire à l'apparition des décharges partielles et à la génération, à plus ou moins long terme, d'arborescences électriques. Le développement de ces arborescences peut avoir une issue fatale sur l'isolation [2].

III. Description de la motorette

La motorette, que nous considérons comme modèle d'application dans notre travail, est une maquette décrite dans la norme IEEE 117-1974 [9]. Elle est utilisée dans la procédure d'évaluation des systèmes de matériaux isolants de moteurs électriques à bobinage aléatoire alimentés en courant alternatif. Elle est composée de deux ensembles de deux bobines séparées par un papier isolant (Figure 1). Pour notre cas, le fil émaillé a un diamètre sur cuivre de 1,25 mm et une épaisseur d'émail de 40 μm . L'ensemble peut être ensuite imprégné par une résine ou un vernis. Deux familles de résines ont été utilisées dans cette étude : une résine polyamideimide et une résine polyesterimide [8].

La résine époxy est largement utilisée comme matériau d'isolation électrique, pour ses excellentes propriétés physiques, chimiques et électriques [10].

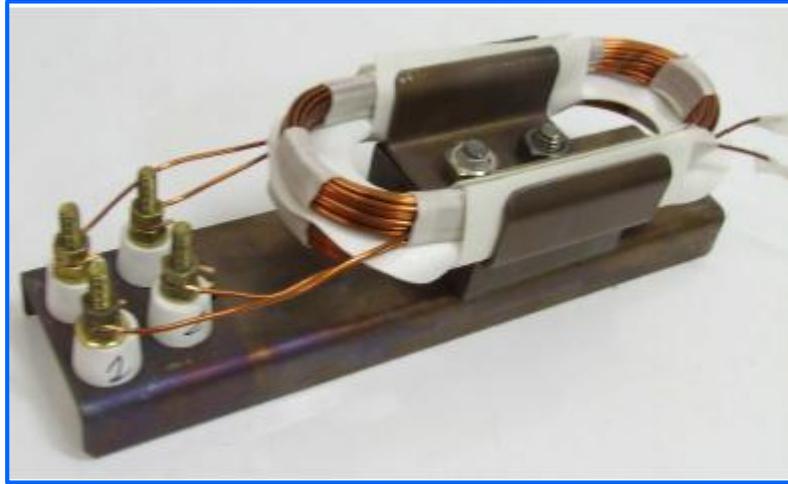


Figure 1 : Motorette fabriquée selon la norme IEEE 117-1974.

IV. Simulations de champs électriques maximaux

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

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

Cependant, si l'on doit tenir compte de tous ces paramètres et envisager une étude qui traite tous les cas qu'on peut imaginer de se produire dans l'industrie, il serait inconvenable du point de vue pratique. Alors, on devrait choisir les imitations qui soient représentatives des cas réels les plus probables ou qui représentent les cas les plus défavorables [11].

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

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

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

Le champ électrique maximal entre deux fils parallèles mis sous tension V_0 , de rayons R et distants de a , sur lequel nous nous baserons, est donné par Harper et O-Dwyer [12] (Equation 1).

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

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

IV.1 Modèle 1 : Isolation entre spires

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

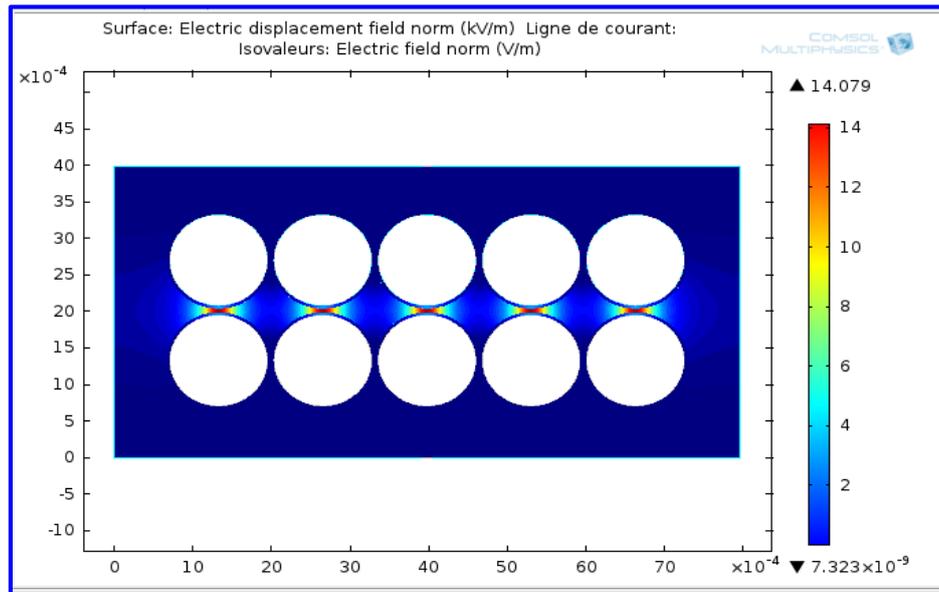
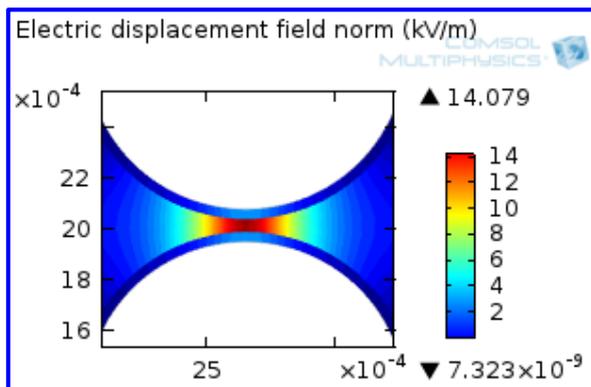
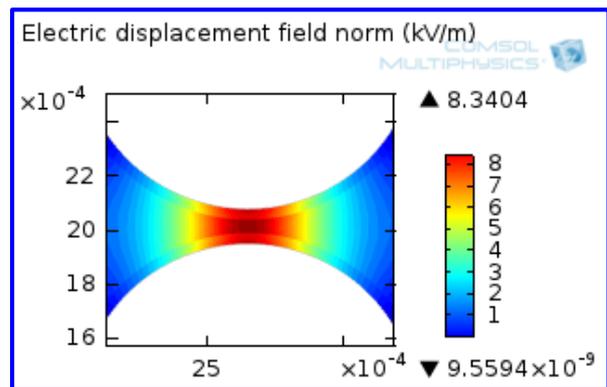


Figure 2 : Modèle de simulation du champ électrique entre spires.



(a)



(b)

Figure 3 : Champ électrique entre spires :

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

Le champ électrique entre spires est d'autant plus important que l'espacement entre ces spires est faible. Il atteint sa valeur maximale pour un espacement de 50 μm , voire 14 kV/m lorsque la motorette n'est pas imprégnée d'huile et 8.34 kV/m lorsqu'elle est plongée dans l'huile. Cet

écart de l'intensité du champ électrique est logique vu la supériorité de la permittivité relative de l'huile ($\epsilon_r = 3.2$) par rapport à celle de l'air ($\epsilon_r = 1$).

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

IV.1.1. Influence des impuretés sur le champ électrique

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

IV.1.1.1 Influence des cavités d'air

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

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

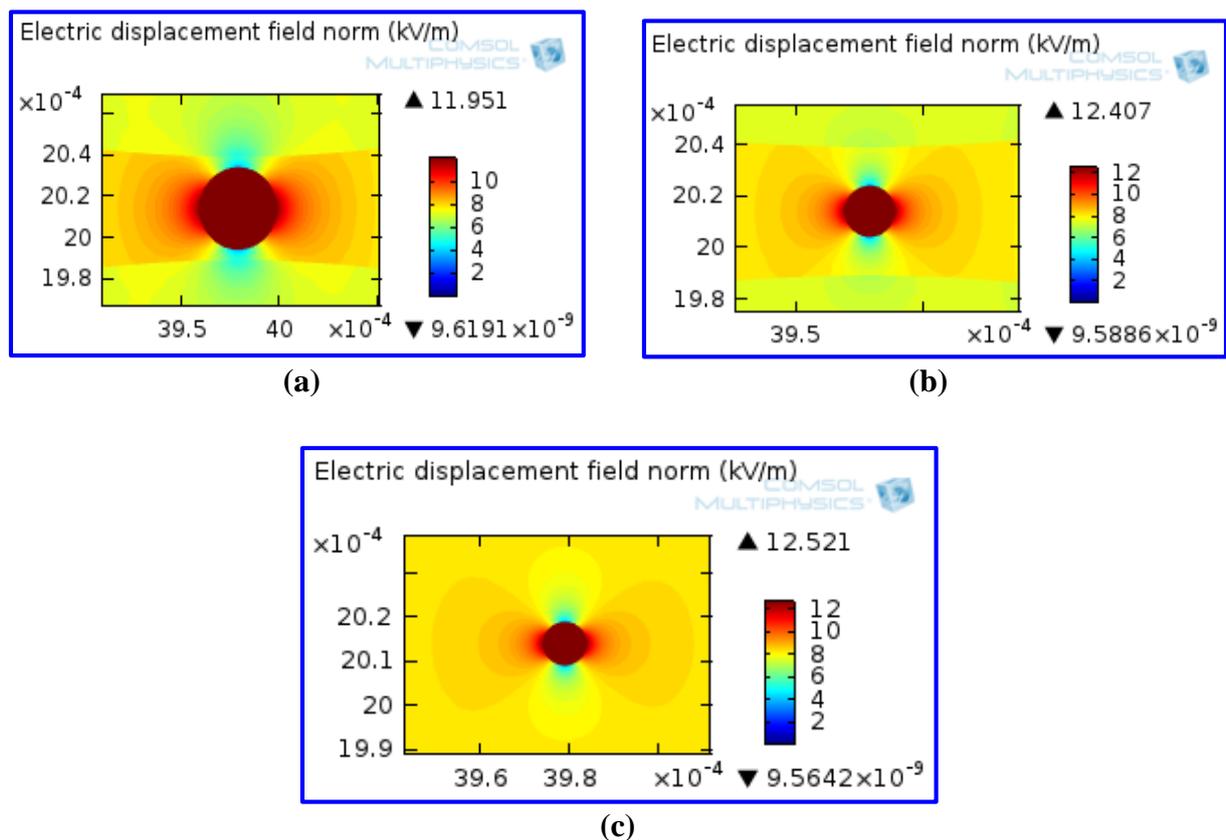


Figure 4 : Influence du rayon de la cavité d'air R sur le champ électrique :
(a). $R = 20 \mu\text{m}$; (b). $R = 10 \mu\text{m}$; (c). $R = 5 \mu\text{m}$.

Sur toutes les configurations ci-dessus, nous remarquons une augmentation du champ électrique maximum à cause des perturbations dues à la cavité. En raison de la valeur de la

permittivité relative de la cavité d'air ($\epsilon_r = 1$) qui est inférieure à celle de l'huile, le champ électrique est plus intense à l'intérieur de la bulle d'air.

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

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

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

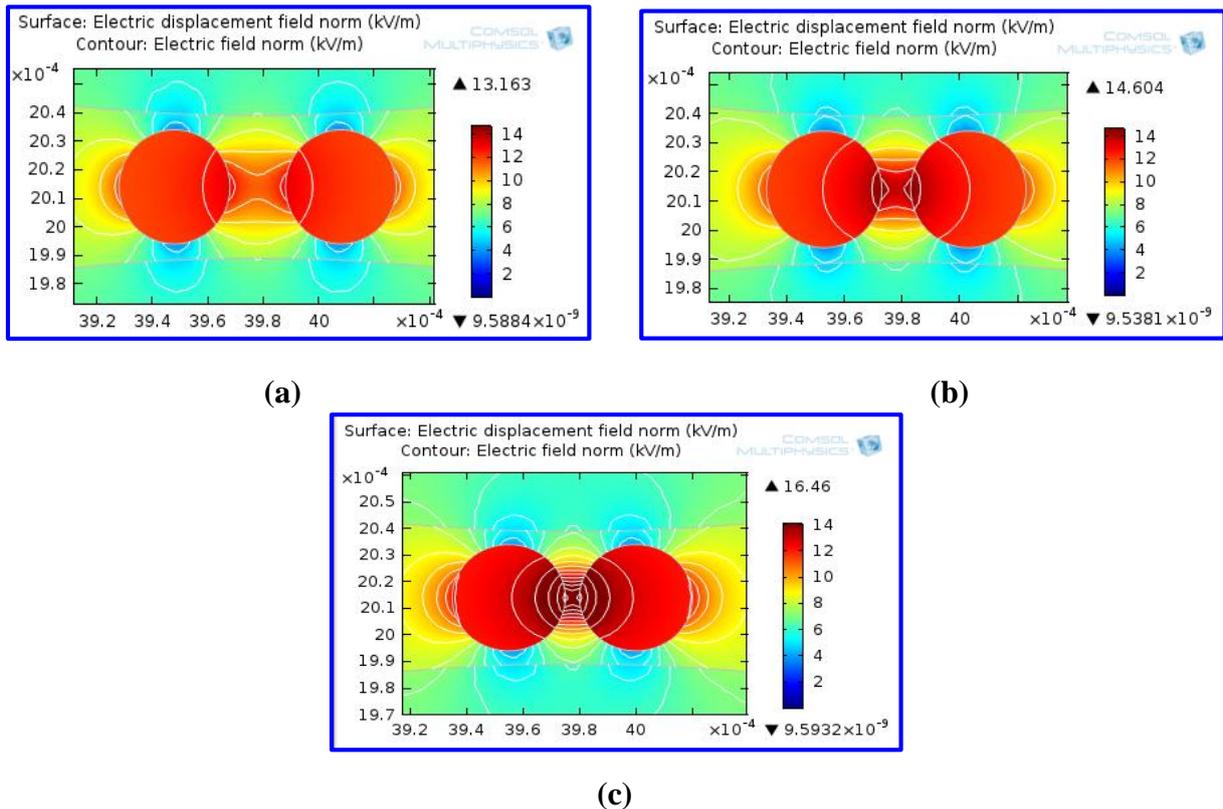


Figure 5 : Influence de la distance « d » qui sépare les deux cavités d'air sur le champ électrique :
 (a). $d = 20 \mu\text{m}$; (b). $d = 10 \mu\text{m}$; (c). $d = 5 \mu\text{m}$.

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

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

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

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

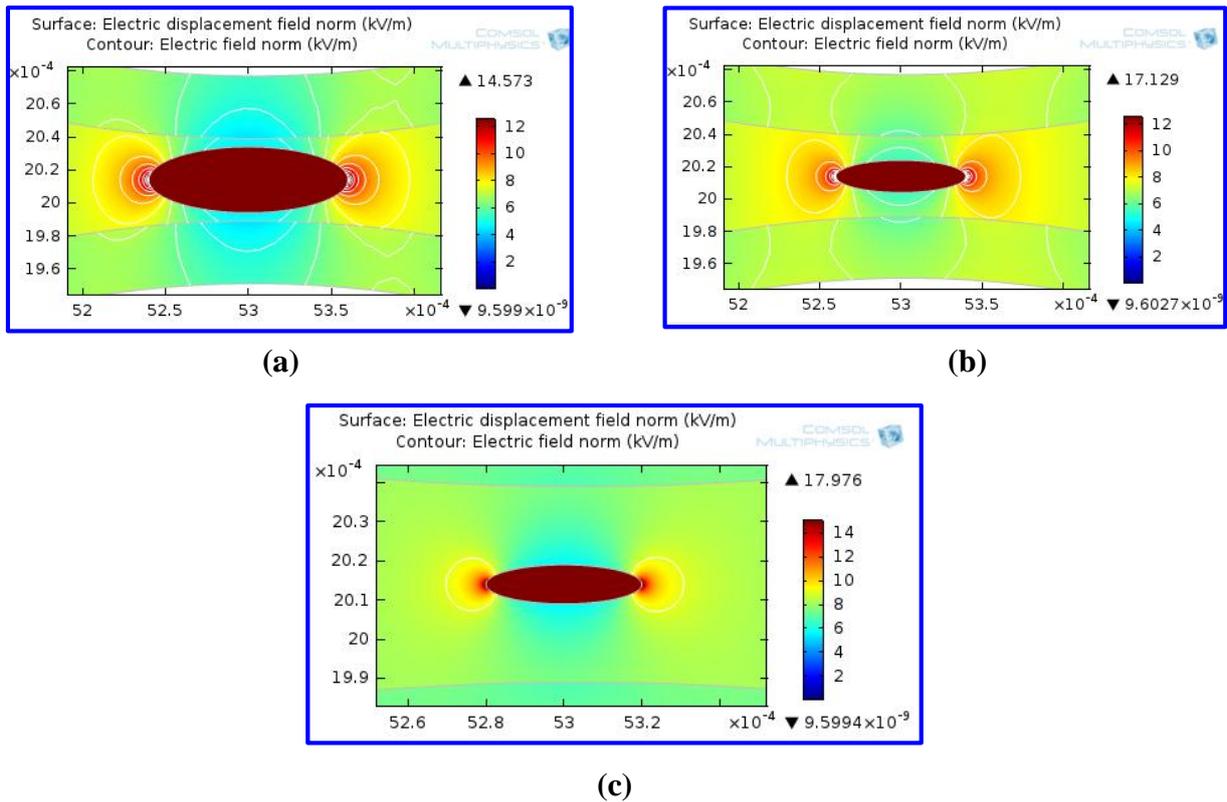


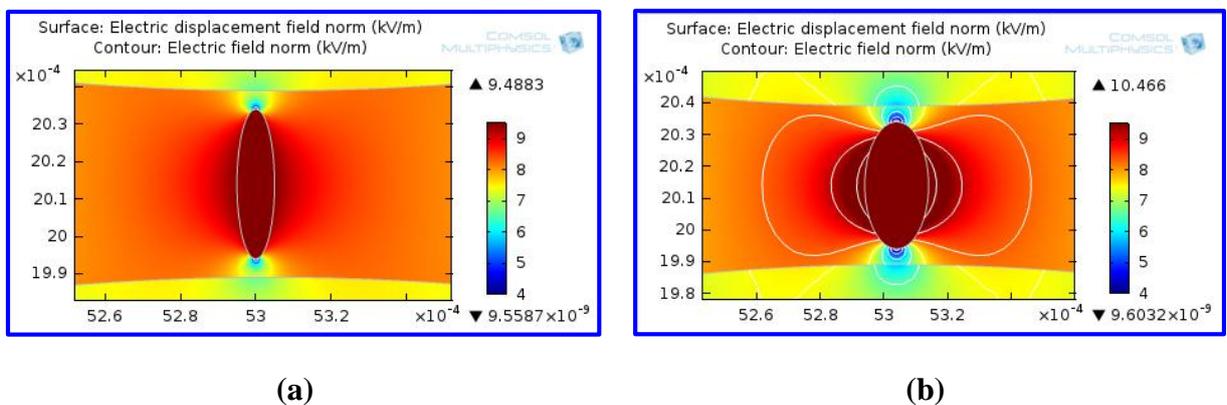
Figure 6 : Influence de la taille de l'ellipsoïde d'air sur le champ électrique :

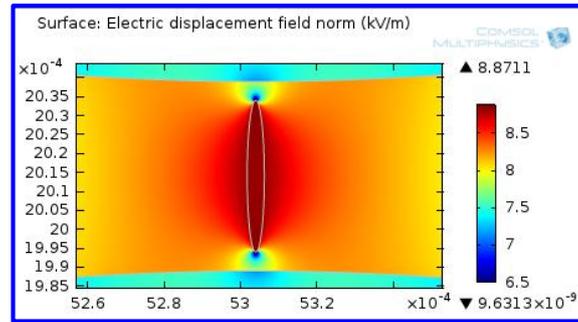
- (a). x-semiaxix = 60 μm , y-semiaxix = 20 μm ;
- (b). x-semiaxix = 40 μm , y-semiaxix = 10 μm ;
- (c). x-semiaxix = 20 μm , y-semiaxix = 5 μm .

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

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

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





(c)

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

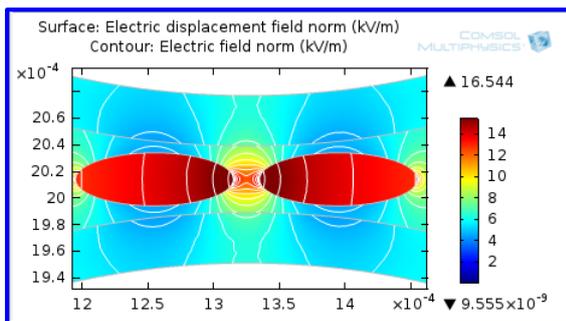
- (a). x-semiaxix = 20 μm , y-semiaxix = 10 μm ;
- (b). x-semiaxix = 20 μm , y-semiaxix = 5 μm ;
- (c). x-semiaxix = 20 μm , y-semiaxix = 2.25 μm .

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

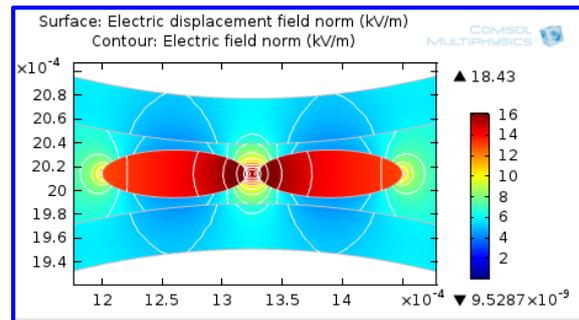
D'après les résultats présentés sur les deux figures précédentes (Figure 6) et (Figure 7), le champ électrique prend des valeurs plus importantes lorsque l'ellipsoïde d'air se trouve en position horizontale dans l'huile par rapport à la position verticale.

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

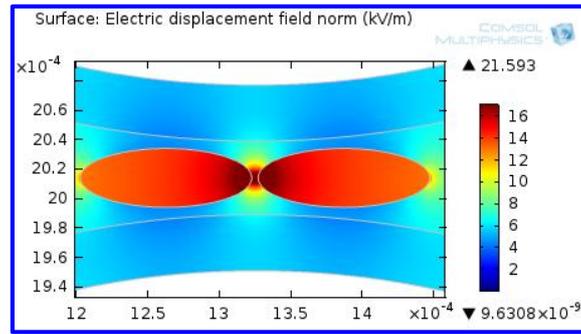
Pour constater l'influence mutuelle de deux cavités d'air sur le champ électrique, nous insérons horizontalement deux ellipsoïdes d'air de même taille (x-semiaxix = 60 μm , y-semiaxix = 20 μm) entre les deux spires, puis nous varions la distance « d » qui sépare ces deux dernières (Figure 8).



(a)



(b)



(c)

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

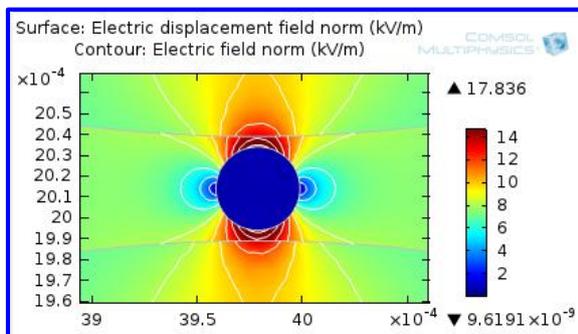
L'intensité du champ électrique s'accroît d'autant plus que les deux cavités d'air sont proches. Le champ atteint sa valeur maximale au niveau des deux sommets latéraux des deux ellipsoïdes et dans la zone comprise entre ces deux derniers.

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

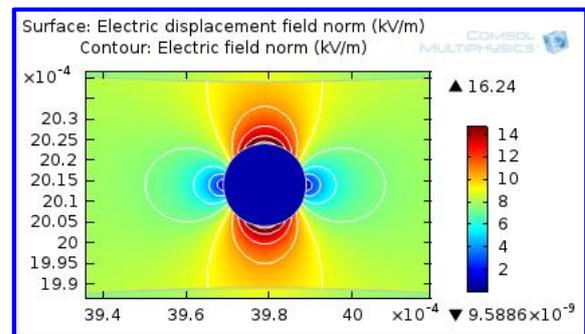
IV.1.1.2 Influence des vacuoles d'eau

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

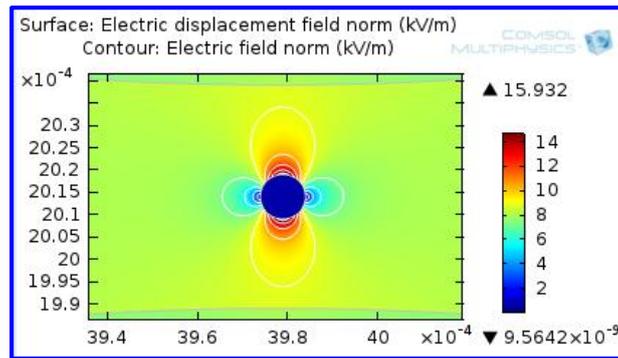
On inclut une vacuole d'eau sphérique entre deux spires (Figure 9), nous prenons pour rayons de la sphère R : (a). $R = 20 \mu\text{m}$; (b). $R = 10 \mu\text{m}$; (c). $R = 5 \mu\text{m}$.



(a)



(b)



(c)

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

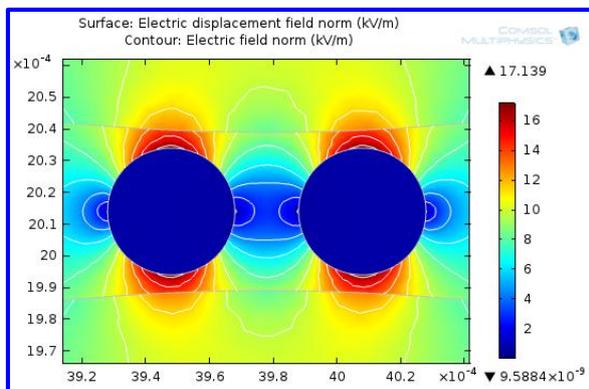
(a). $R = 20 \mu\text{m}$; (b). $R = 10 \mu\text{m}$; (c). $R = 5 \mu\text{m}$.

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

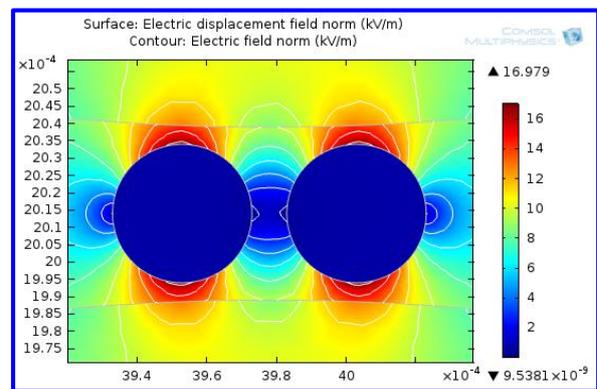
Le champ électrique est nul à l'intérieur de la vacuole d'eau.

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

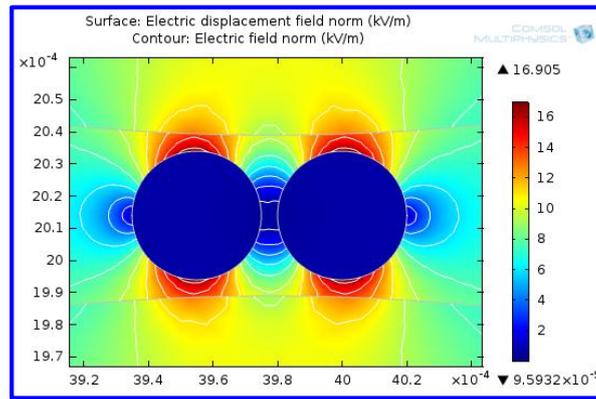
Nous insérons deux vacuoles d'eau de même rayon ($R = 20 \mu\text{m}$) entre les spires, puis nous varie la distance « d » qui sépare ces deux dernières (Figure 10).



(a)



(b)



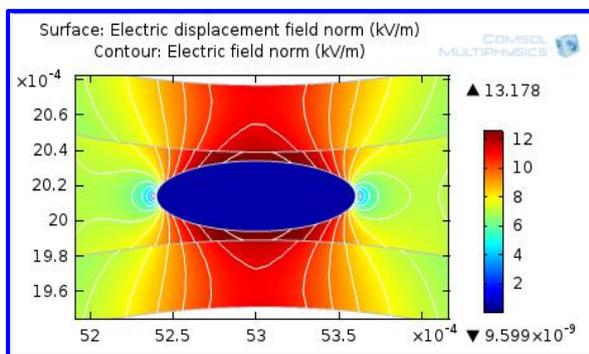
(c)

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

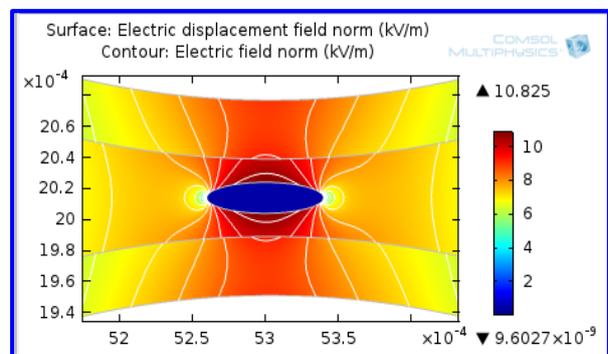
Puisque le champ électrique est très faible sur les parois latérales des vacuoles d'eau, la réduction de la distance qui sépare deux bulles d'eau n'influe d'aucune manière la valeur du champ électrique.

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

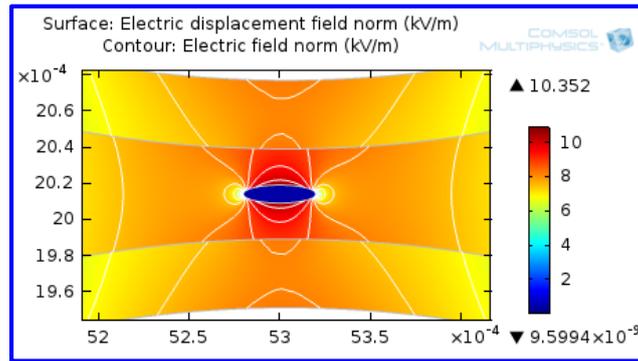
Nous considérons trois tailles différentes de l'ellipsoïde d'eau incorporé horizontalement entre les deux spires (Figure 6), soient les cas suivants : (a). x-semiaxis = $60 \mu\text{m}$, y-semiaxis = $20 \mu\text{m}$; (b). x-semiaxis = $40 \mu\text{m}$, y-semiaxis = $10 \mu\text{m}$; (c). x-semiaxis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



(a)



(b)



(c)

Figure 11 : Influence de la taille de l'ellipsoïde d'eau sur le champ électrique :

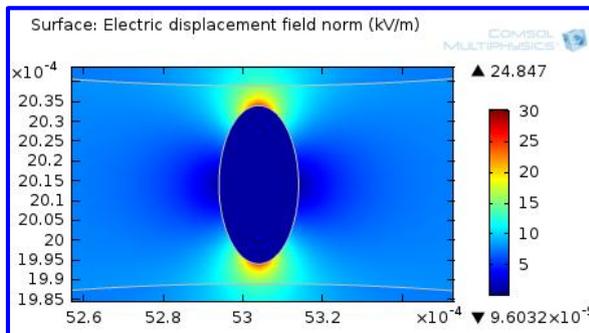
- (a). x-semiaxis = 60 μm , y-semiaxis = 20 μm ; (b). x-semiaxis = 40 μm , y-semiaxis = 10 μm ;
 (c). x-semiaxis = 20 μm , y-semiaxis = 5 μm .

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

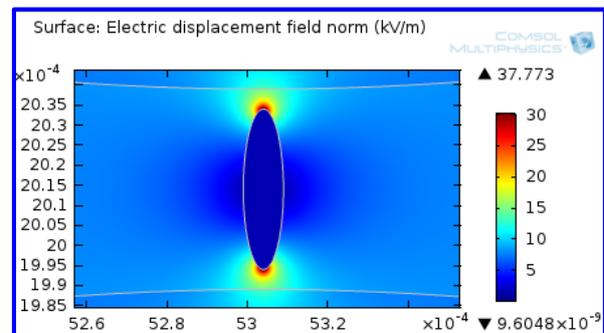
Pour les ellipsoïdes d'eau incorporés horizontalement entre les spires, le champ est faible au niveau des deux sommets, contrairement aux ellipsoïdes d'air pour la même disposition.

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

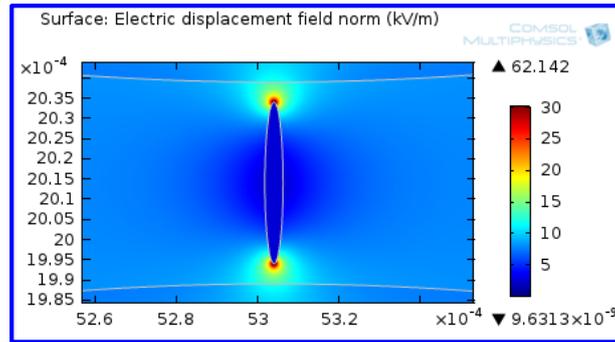
Nous implantons une ellipsoïde d'eau verticalement entre deux spires comme l'indique la figure ci-dessous (Figure 12), puis nous varions le rayon du sommet de l'ellipsoïde afin d'observer l'influence de ce dernier sur le champ électrique.



(a)



(b)



(c)

Figure 12 : Influence du rayon de courbure du sommet de l'ellipsoïde d'eau sur le champ électrique :

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

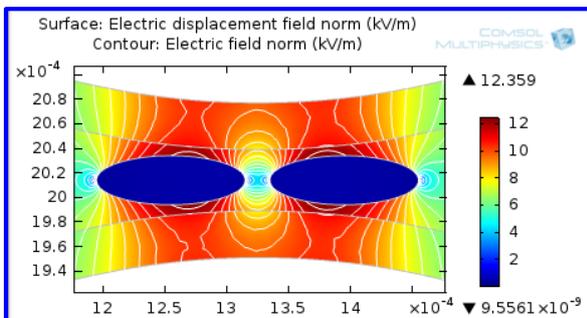
(c). x-semiaxis = 20 μm , y-semiaxis = 2.25 μm .

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

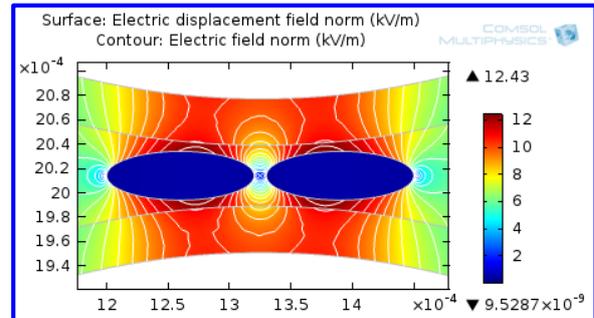
Conformément aux résultats présentés sur les deux figures (Figure 11) et (Figure 12), la position verticale de l'ellipsoïde d'eau provoque des valeurs du champ plus intenses par rapport à la position horizontale.

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

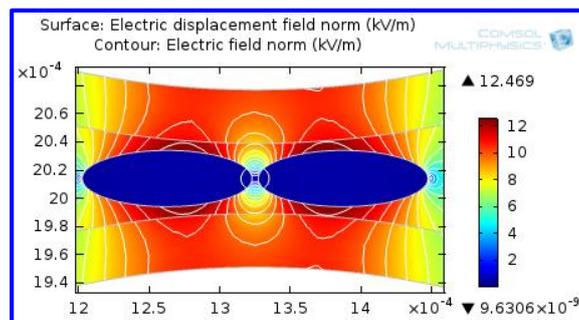
Deux ellipsoïdes d'eau de même taille (x-semiaxis = 60 μm , y-semiaxis = 20 μm) sont insérés horizontalement entre les deux spires, puis nous varions la distance « d » qui sépare les deux vacuoles (Figure 13).



(a)



(b)



(c)

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

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

IV.1.1.3 Influence des copeaux métalliques

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

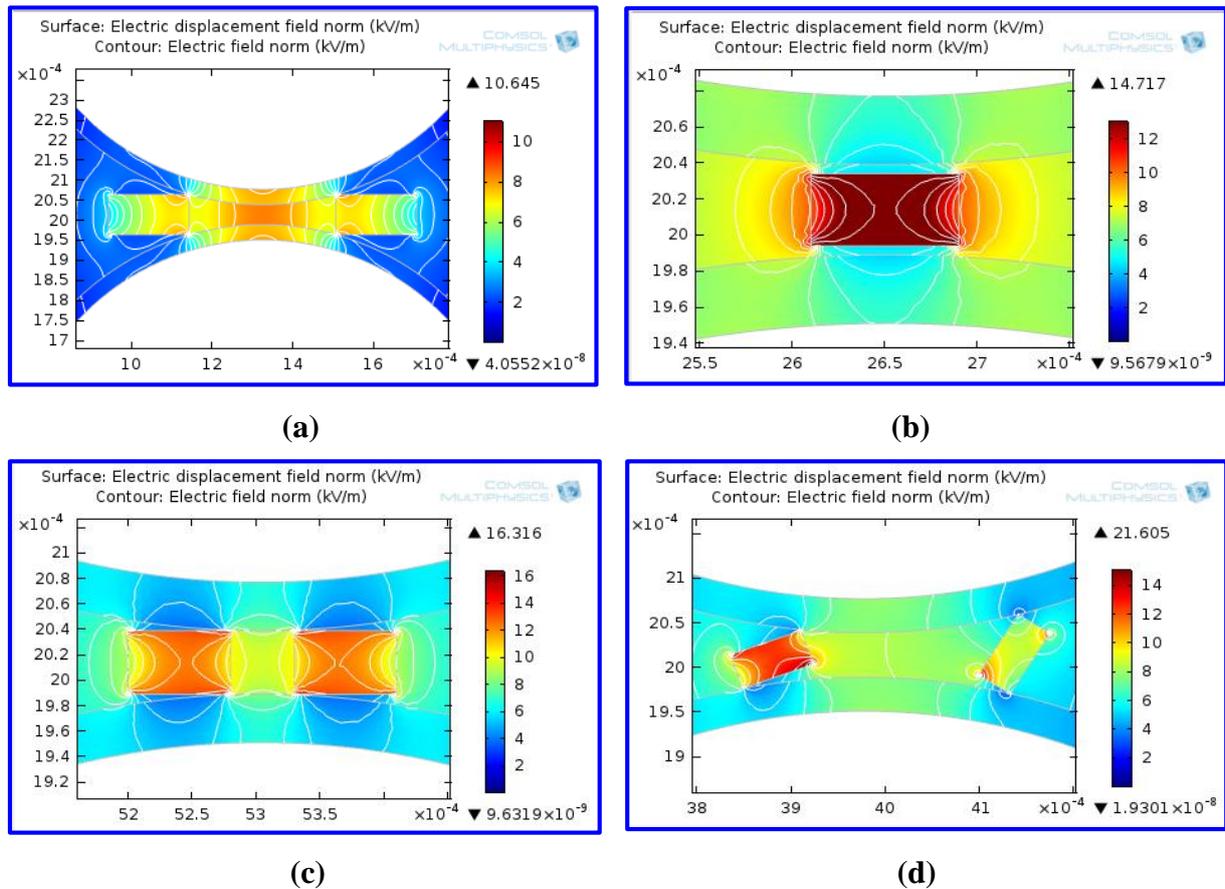


Figure 14 : Influence des impuretés métalliques sur le champ électrique :

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

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

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

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

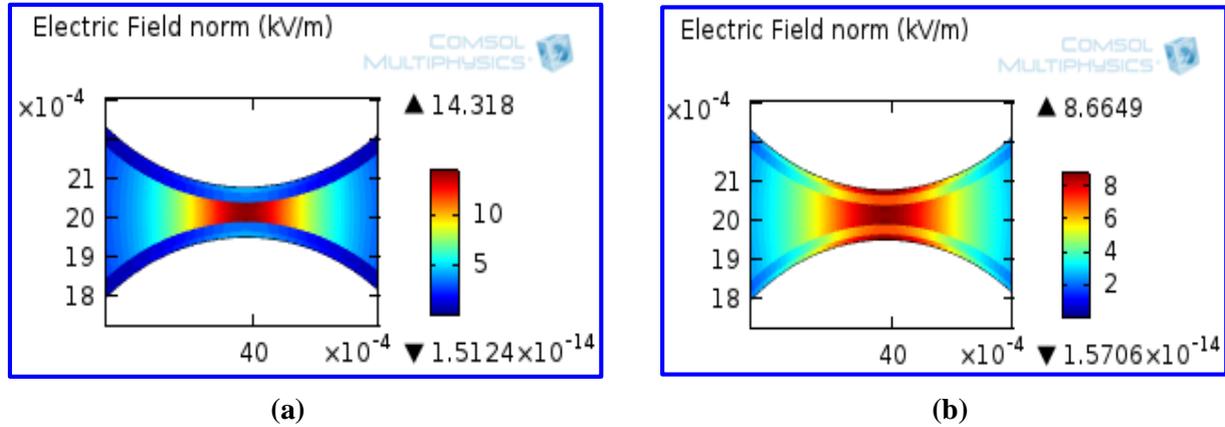


Figure 15 : Champ électrique entre spires dans le cas où l'émail est constitué de deux couches :
 (a). Isolation avec l'air ; (b). Isolation avec l'huile.

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

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

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

IV.2.1 Influence des impuretés sur le champ électrique

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

IV.2.1.1 Influence des cavités d'air

✓ Influence d'une cavité d'air sphérique

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

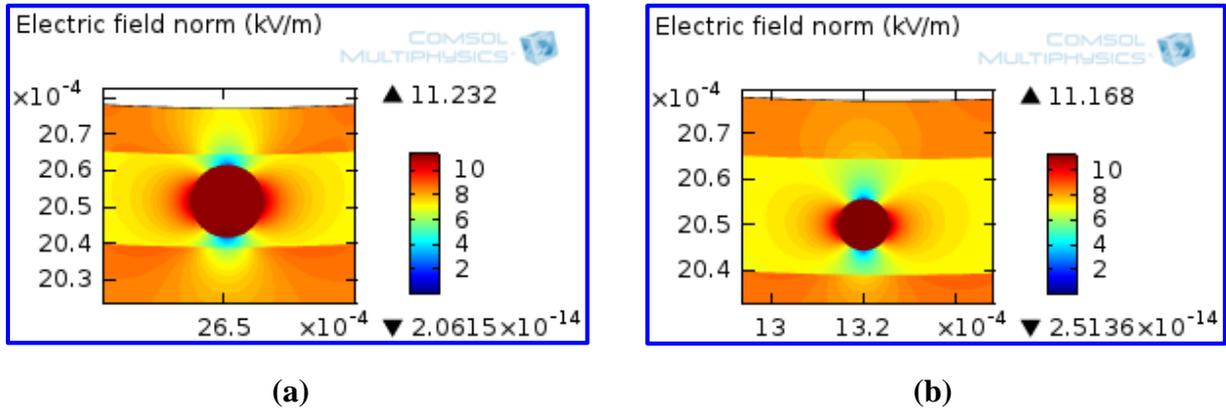


Figure 16 : Influence de la présence d'une cavité d'air dans la couche externe de l'émail :
 (a). Rayon de la sphère = 10 μm ; (b). Rayon de la sphère = 5.7 μm .

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

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

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

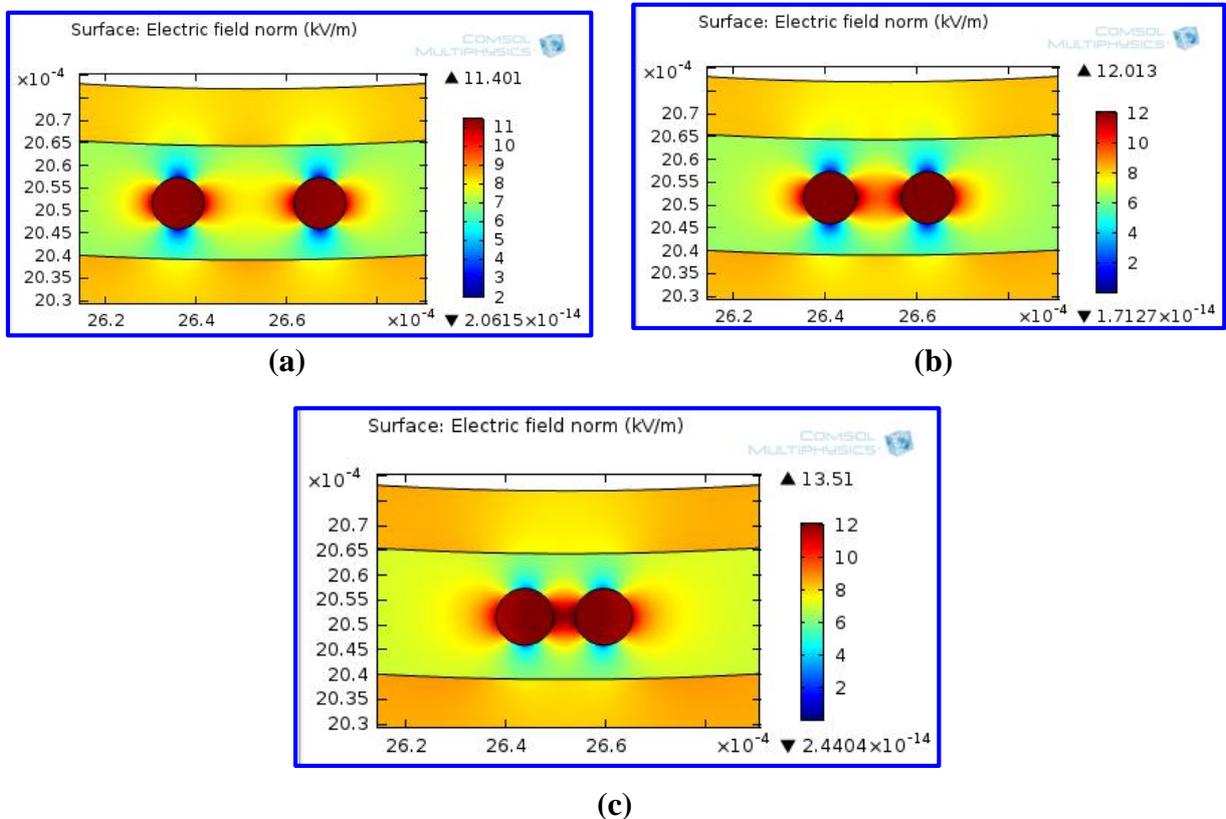


Figure 17 : Influence de la distance « d » qui sépare les deux cavités d'air de même rayon ($R=5.7\mu\text{m}$) sur le champ électrique : (a). $d = 20 \mu\text{m}$; (b). $d = 10 \mu\text{m}$; (c). $d = 5 \mu\text{m}$.

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

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

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

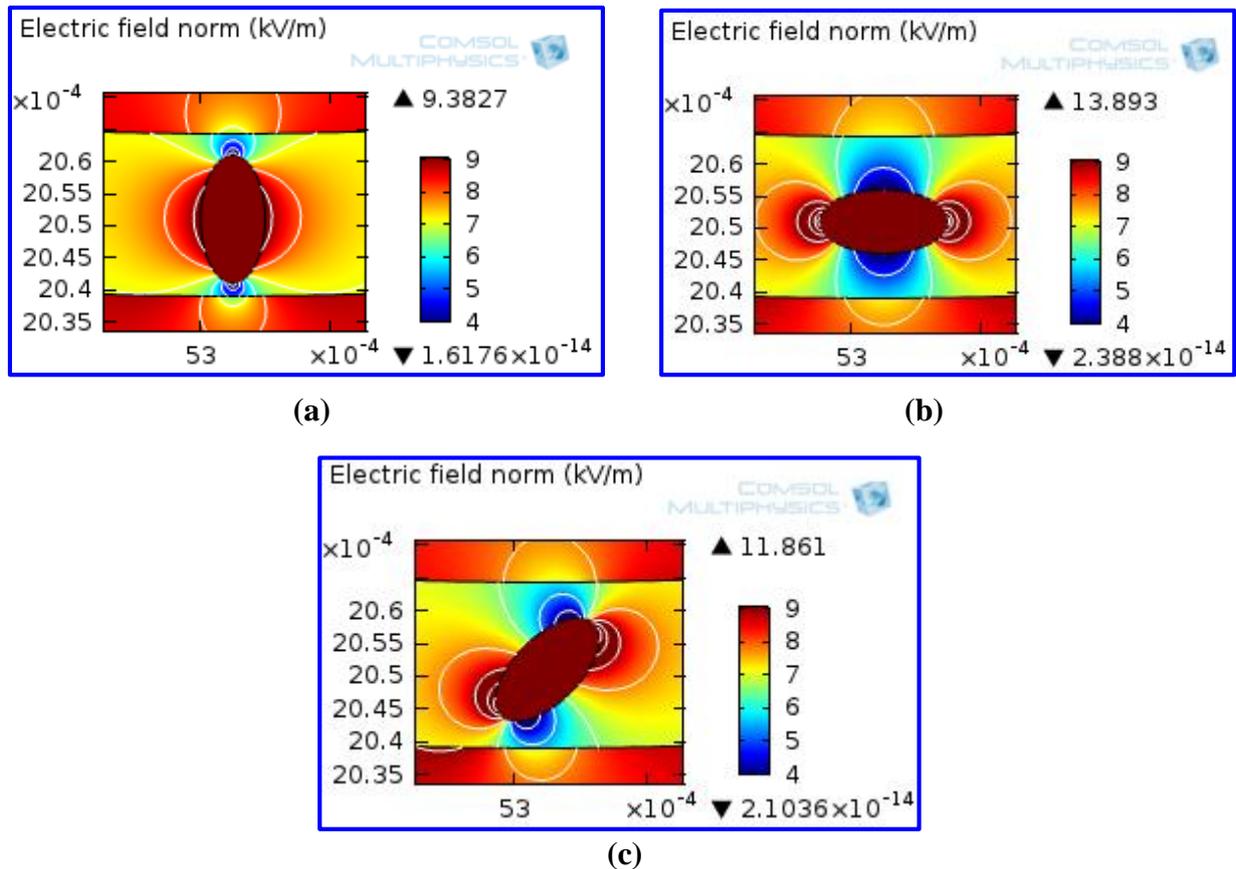


Figure 18 : Influence de la position d'ellipsoïde d'air sur le champ électrique :
(a). Position verticale (b). Position horizontale ; (c). Rotation de 45°.

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

IV.2.1.2 Influence des vacuoles d'eau

✓ Influence de la vacuole sphérique d'eau

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

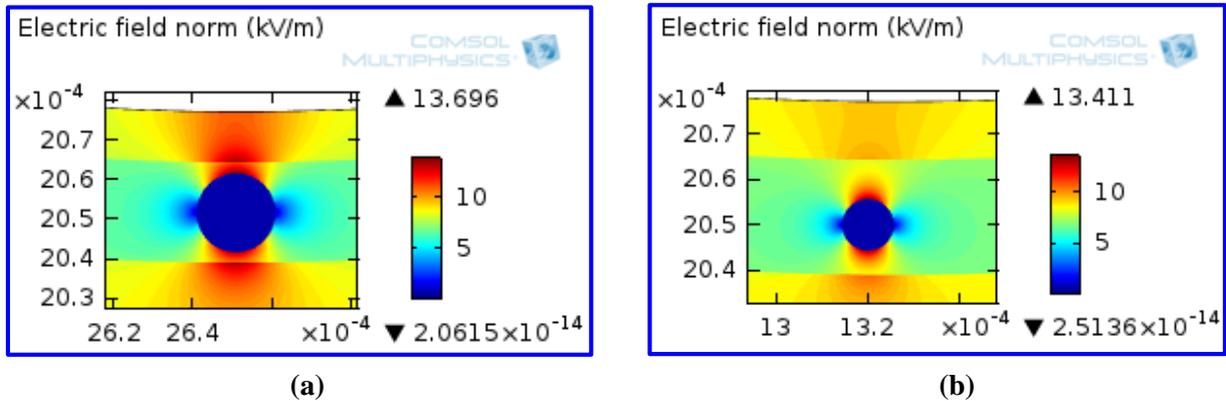
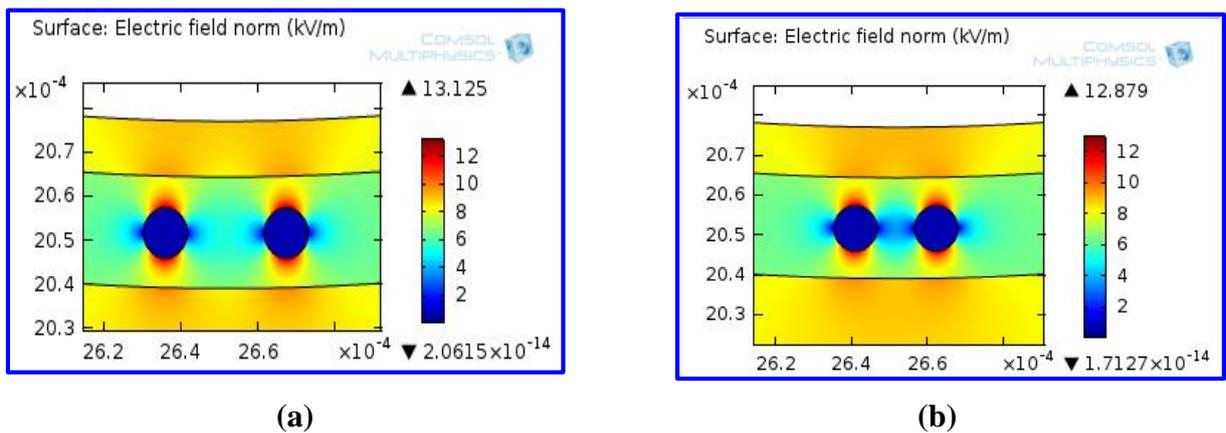


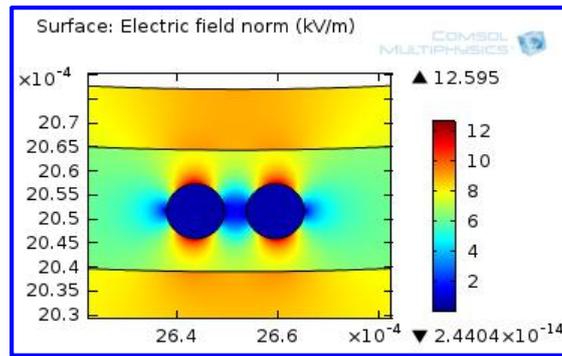
Figure 19 : Influence de la présence d'une cavité d'eau dans la couche externe de l'émail :
 (a). Rayon de la sphère = $10 \mu\text{m}$; (b). Rayon de la sphère = $5.7 \mu\text{m}$.

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

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

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





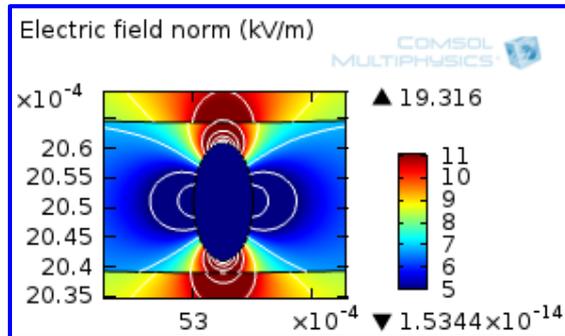
(c)

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

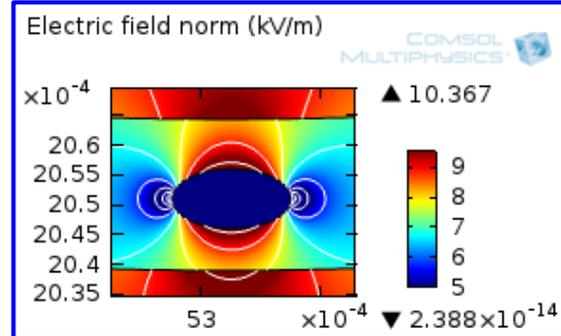
De la même façon que pour les résultats trouvés dans le cas où l'émail est composé d'un seul matériau, le champ électrique est renforcé sur les surfaces entourant la vacuole d'eau qui sont traversées par un champ radiale. Pour cela, la décroissance de la distance entre les deux vacuoles n'a pas de conséquence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

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

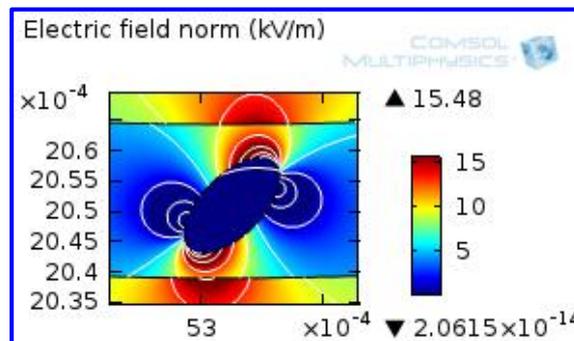
Afin d'évaluer l'influence de la position de l'ellipsoïde d'eau sur le champ électrique, nous insérons un ellipsoïde dans la couche externe de l'émail sur la position verticale, horizontale et enfin sur une position où l'ellipsoïde subit une rotation de 45° (Figure 21).



(a)



(b)



(c)

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

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

IV.3 Model 3 : Isolation entre phase et masse

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

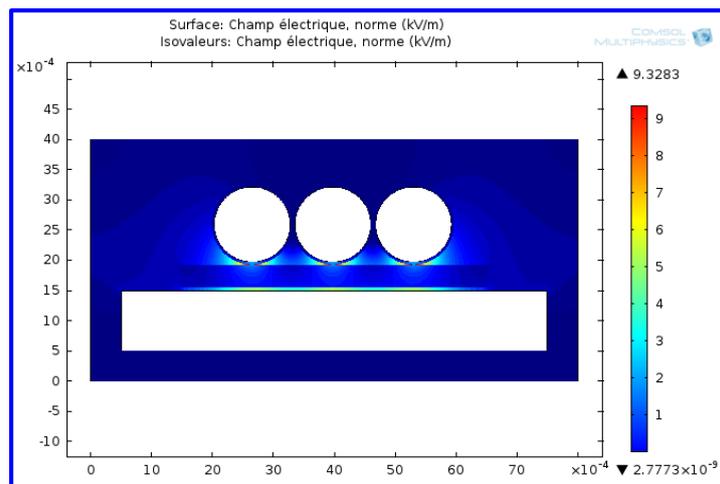


Figure 22 : Modèle entre phase et masse.

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

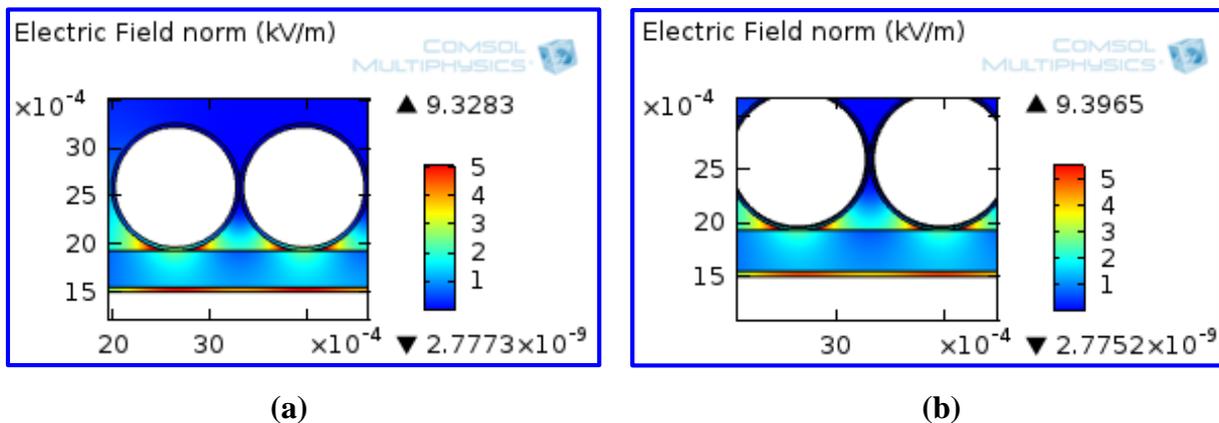


Figure 23 : Champ électrique entre phase et masse, l'isolant est l'air :
 (a) Email constitué d'une seule couche (b). Email est constitué de deux couches.

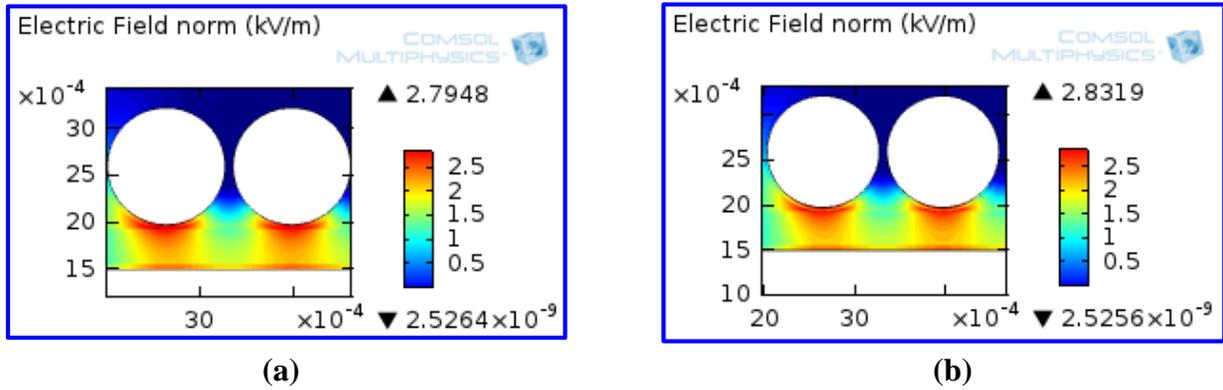


Figure 24 : Champ électrique entre phase et masse, l'isolant est l'huile :
 (a). Email constitué d'une seule couche (b). Email constitué de deux couches.

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

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

IV.3.1 Influence de défauts dans l'isolation

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

IV.3.1.1 Influence de l'absence du papier isolant

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

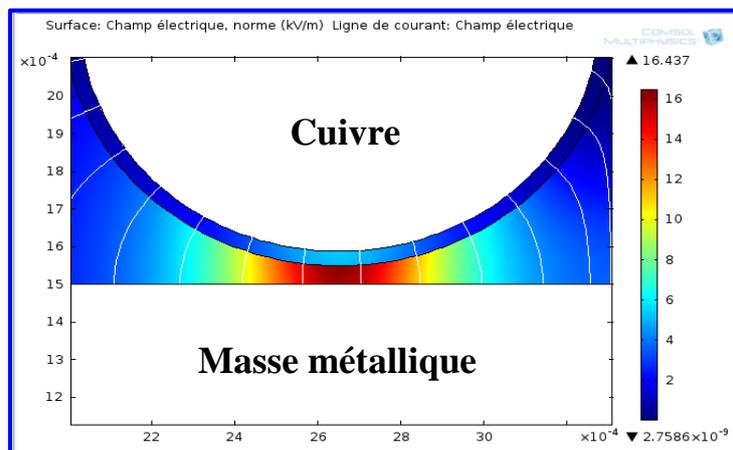


Figure 25 : Influence de l'absence du papier isolant sur le champ électrique

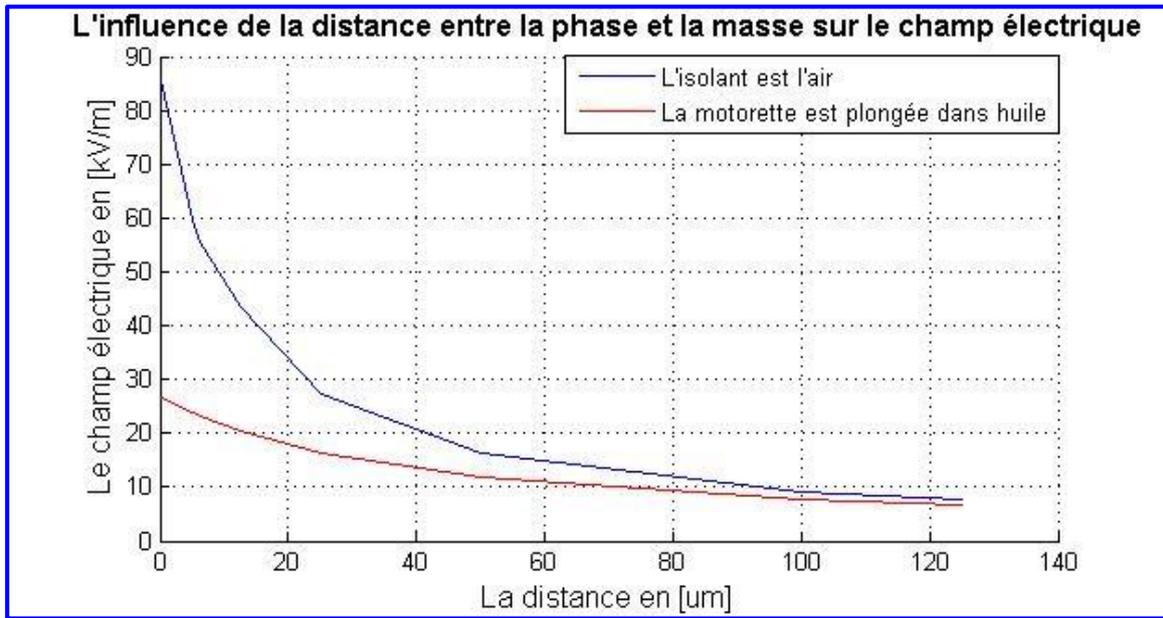
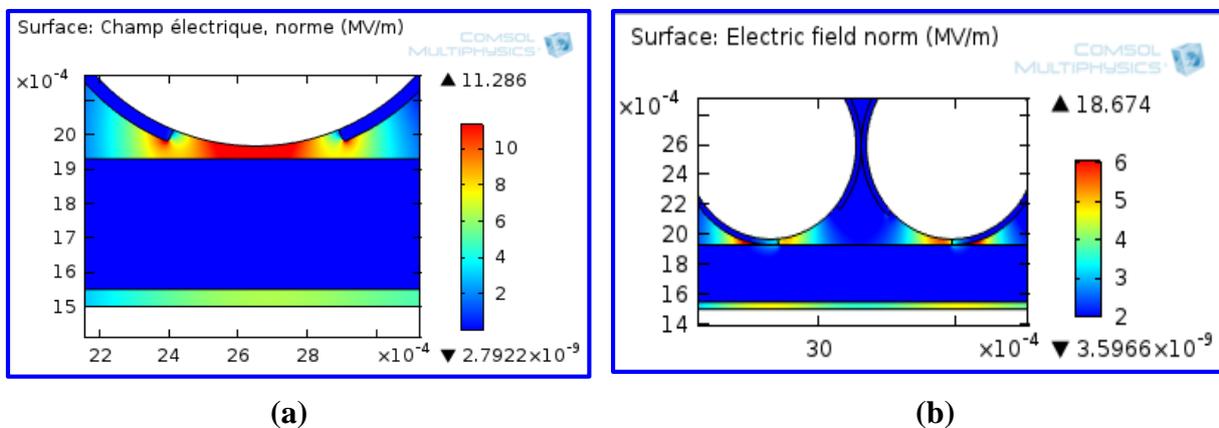


Figure 26 : Influence de la distance entre les spires et la masse sur le champ électrique

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

IV.3.1.2 Influence de la rupture de 1/8^e du périmètre de l'émail

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



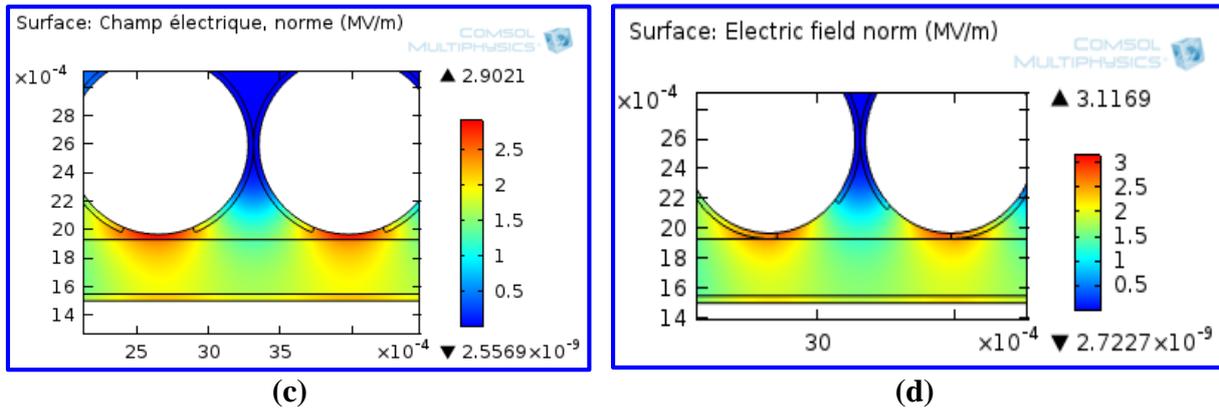


Figure 27 : Influence de la rupture de 1/8é du périmètre de l'émail sur le champ électrique :
 (a). L'isolant est l'air, région 1 ; (b). L'isolant est l'air, région 2 ;
 (c). L'isolant est l'huile, région 1 ; (d). L'isolant est l'huile, région 2.

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

V. Conclusion

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

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

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

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

Conclusion générale

Dans n'importe quel sujet de recherche, l'outil numérique reste indispensable pour bien comprendre les différents phénomènes et pour avoir une appréciation des contraintes auxquelles les machines électriques sont soumises, surtout lorsqu'il s'agit d'un moyen de simulation de grande fiabilité ; ce que nous avons proposé dans ce travail en utilisant le logiciel Comsol Multiphysics®, où nous avons simulé la distribution du champ électrique à dans une machine électrique , entre spires, avec et sans l'inclusion d'impuretés de différentes natures, formes géométriques et dimensions, et entre phase et masse, en présence ou non de défauts.

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

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

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

Bibliographie

- [1] N.Rouha, « Caractérisation Electrique et Physico-chimique des Arborescences Electriques dans l'EPDM », Thèse de Doctorat en Sciences, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Octobre 2014.
- [2] S. ABELLA, « Vieillissement électrique du polyster-imide sous tension continue », Thèse de Magister, Département d'Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
- [3] MOTOR RELIABILITY WORKING GROUP, « Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, Part I », IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-21, no. 4, pp. 853–864, Jul. 1985.
- [4] O. V. Thorsen and M. Dalva, « A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries », IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 31, no. 5, pp. 1186–1196, Sep./Oct. 1995.
- [5] F. Aymonino, T. Lebey, D. Malec, C. Petit, J. Saint Michel, A. Anton, “Dielectrics measurements of rotating machines insulation at high temperature (200-400°C)”, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006
- [6] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, and H. Dhirani, Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004
- [7] A. Siddique, G. S. Yadava, and B. Singh, « A review of stator fault monitoring techniques of induction motors », IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, no. 1, pp. 106–114, Mar. 2005.
- [8] F. Loubeau, A. Durieux, J. Poitrinet, F. Fresnet, F. Strat, « Simulation des Champs Electriques dans les Configurations Types d'un Moteur Synchrone de Traction, Validation par l'Experimentation des Seuils d'apparition de Decharges Partielles », Symposium de Genie Electrique, Juin 2016, Grenoble, France.
- [9] IEEE Standard Test Procedure for Evaluation of Systems of Insulating Materials for Random-Wound AC Electric Machinery.
- [10] A. Knecht, Development of Surface Charges on Epoxy Resin Spacers Stressed with Direct Applied Voltages, Gaseous Dielectrics III, Pergamon Press, New York, pp. 356-364, 1982.
- [11] A. NOUAR, « Etude numérique de l'influence des cavités gazeuses et d'eau sur la distribution du champ électrique, de la pression électromécanique et des pertes diélectriques dans l'isolation des câbles de haute tension », Thèse de Magister, Département d'Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Décembre 1999.
- [12] P. G. Harper, J. J. O'Dwyer, « Electric field strength between crossed and parallel circular cylinders », Monograph n°235, Mai 1957.