



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي  
Institute de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département : Maintenance en Electromécanique

## MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique.

Spécialité : Electromécanique industrielle.

## Thème

**L'impact du champ électrique sur la rigidité diélectrique des huiles utilisées dans les transformateurs de puissance**

Présenté et soutenu publiquement par :

**AOUAOUCHE WAIL ABDELILLAH et LEMTOUCHE ABDELAZIZ**

Devant le jury composé de :

| Nom et Prénom        | Grade | Etablissement | Qualité      |
|----------------------|-------|---------------|--------------|
| Mme Djelghoum Farida | MAA   | IMSI          | Présidente   |
| Mme Talhi Mama       | MCB   | IMSI          | Encadrante   |
| Mme Labair Hakima    | MCB   | IMSI          | Examinatrice |

Année universitaire : 2023/2024

## *Remerciements*

*Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude infinie envers Allah, le Seigneur des mondes, qui m'a accordé la patience, la persévérance et la guidance tout au long de ce parcours académique.*

*Je souhaite également adresser mes sincères remerciements à mon encadreur, Mme Talhi Mama , pour sa direction éclairée, son soutien constant et ses conseils avisés qui ont grandement enrichi ce travail de recherche.*

*Un immense merci aux membres du jury, Mme Djelghoum Farida et Mme Labair Hakima , pour leur évaluation minutieuse, leurs commentaires constructifs et leur précieuse expertise qui ont contribué à améliorer ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers tous mes enseignants et professeurs, pour leur enseignement inspirant, leur encouragement inlassable et leur dévouement à transmettre le savoir.*

*Enfin, je remercie chaleureusement tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à mon éducation et à la réalisation de ce projet académique.*

*Que la paix, la miséricorde et les bénédictions d'Allah soient sur vous tous.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail*

*À mes chers parents,*

*Vous êtes mes piliers, ma source d'inspiration et mon soutien inconditionnel. Votre amour, votre encouragement et vos sacrifices ont rendu tout cela possible. Je vous dédie ce travail avec tout mon amour et ma gratitude infinie.*

*À mes frères Oussama , Loay et ma sœur Ines ,*

*Votre soutien indéfectible et vos encouragements constants ont été pour moi une source de force tout au long de ce parcours. Merci du fond du cœur pour votre soutien inébranlable.*

*À Eline , ma sœur bien-aimée,*

*Tu es bien plus qu'une sœur pour moi ; tu es ma fille , ta présence est essentiel pour moi, ta douceur infinie illuminent chaque jour notre famille.. Je te dédie ce travail avec une immense affection.*

*À mes chers cousins , amis*

*Vous avez illuminé mon parcours avec votre amitié sincère, votre soutien inconditionnel et vos encouragements constants. Vos rires, vos conseils et vos moments partagés resteront gravés dans mon cœur. Je vous remercie du fond du cœur pour votre amitié précieuse.*

*Que ce travail soit une humble expression de ma gratitude envers vous tous.*

*Aouaouche Wail Abdelillah*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail*

*À mes chers parents,*

*Votre soutien indéfectible, votre amour inconditionnel et vos sacrifices ont été les fondations sur lesquelles j'ai construit mon parcours. Vous êtes mes modèles et ma source constante d'inspiration. Cette réussite est aussi la vôtre, et je vous en suis infiniment reconnaissant(e).*

*À mes frères et sœurs,*

*Vous êtes mes compagnons de vie, mes premiers amis et mes plus grands supporters. Votre présence et votre soutien ont rendu ce chemin plus joyeux et plus significatif. Cette dédicace est un témoignage de notre lien indéfectible.*

*À mes chers amis,*

*Vous avez partagé avec moi des moments de joie, des défis et des souvenirs précieux qui resteront gravés dans mon cœur pour toujours. Votre amitié m'a apporté du réconfort et de la force tout au long de ce parcours académique.*

*Cette réussite est le fruit de nos échanges, de nos discussions et de nos partages. Merci pour votre soutien, votre encouragement et votre présence précieuse dans ma vie.*

*Que cette dédicace soit le témoignage de ma reconnaissance et de mon affection sincère envers chacun de vous.*

*Lemtouche Abdelaziz*

# Résumé

Ce mémoire représente un travail de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master en électromécanique industrielle sous le thème "L'impact du champ électrique sur la rigidité diélectrique des huiles utilisées dans les transformateurs de puissance. Le travail a été reparti selon trois chapitres dont le premier chapitre présente une vue générale sur les transformateurs de puissance, en décrivant leurs conceptions, leurs fonctionnement complexe et leurs rôles dans les réseaux électriques.

Le deuxième chapitre se concentre sur les huiles isolantes utilisées dans les transformateurs de puissance. Il décrit en détail leurs composition, leurs propriétés électriques et thermiques, ainsi que leur rôle crucial dans l'isolation électrique. Cette section met en lumière l'importance capitale des huiles isolantes pour assurer la fiabilité et la durabilité des transformateurs, pour répondre aux exigences croissantes des réseaux électriques modernes.

Enfin, le troisième chapitre présente une étude approfondie utilisant la modélisation numérique par COMSOL MULTIPHYSICS pour évaluer l'impact du champ électrique sur la rigidité diélectrique des huiles isolantes. Cette recherche se penche sur les mécanismes physiques et électriques sous-jacents qui influencent la capacité des huiles isolantes à résister aux tensions élevées et à maintenir leurs propriétés isolantes sur le long terme. Les résultats de cette étude visent à fournir des recommandations précieuses pour l'optimisation des transformateurs de puissance, afin d'améliorer leur performance globale et leur durabilité dans des environnements variés et exigeants.

En résumé, ce travail contribue à une meilleure compréhension des mécanismes responsables de la dégradation des huiles isolantes dans les transformateurs de puissance, en mettant l'accent sur l'importance des huiles isolantes dans le domaine industriel.

# Abstract

This study represents a final thesis for obtaining the master's degree in industrial electromechanics under the theme "The impact of the electric field on the dielectric strength of oils used in power transformers. The work was divided into three chapters, the first of which presents a general view of power transformers, describing their designs, their complex operation and their roles in electrical networks.

The second chapter focuses on insulating oils used in power transformers. It describes in detail their composition, electrical and thermal properties, and their crucial role in electrical insulation. This section highlights the critical importance of insulating oils in ensuring the reliability and durability of transformers, to meet the increasing demands of modern power grids.

Finally, the third chapter presents an in-depth study using numerical modeling by COMSOL MULTIPHYSICS to evaluate the impact of the electric field on the dielectric strength of insulating oils. This research looks at the underlying physical and electrical mechanisms that influence the ability of insulating oils to withstand high voltages and maintain their insulating properties over the long term. The results of this study aim to provide valuable recommendations for the optimization of power transformers, to improve their overall performance and durability in varied and demanding environments.

In summary, this work contributes to a better understanding of the mechanisms responsible for the degradation of insulating oils in power transformers, with emphasis on the importance of insulating oils in the industrial field.

# Sommaire

|  |          |
|--|----------|
| <b>Introduction Générale</b> .....   | <b>1</b> |
| <b>Chapitre I : Présentation générale d'un transformateur de puissance</b> ..... | <b>4</b> |
| 1. Introduction.....   | 4        |
| 2. Définition d'un transformateur de puissance .....                             | 4        |
| 3. Le rôle d'un transformateur .....   | 5        |
| 4. Description d'un transformateur.....  | 5        |
| 4.1 Les Enroulements .....   | 5        |
| 4.2 Circuit Magnétique :.....  | 6        |
| 5. Principe de fonctionnement .....  | 7        |
| 5.1 Transformateur parfait ou idéal.....   | 7        |
| 5.2 Transformateur réel .....  | 9        |
| 5.2.1 Transformateur réel monophasé.....   | 9        |
| 5.2.2 Transformateur réel triphasé .....   | 10       |
| 6. Les pertes d'un transformateur .....  | 11       |
| 6.1 Les pertes par effet Joule.....  | 11       |
| 6.2 Les pertes Fer .....   | 11       |
| 6.3 Mesures des pertes.....  | 12       |
| 7. Classification des transformateurs de puissance.....                          | 12       |
| 7.1 La puissance apparente.....  | 12       |
| 7.2 Le nombre des phases.....  | 12       |
| 7.3 Le mode de refroidissement .....   | 12       |
| 7.4 Le rapport de transformation.....  | 13       |
| 7.5 La forme du circuit magnétique .....   | 13       |
| 7.5.1 Le transformateur cuirassé .....   | 13       |
| 7.5.2 Le transformateur de type «colonne».....                                   | 14       |
| 8. Conception d'un Transformateur de puissance .....                             | 15       |

|  |    |
|--|----|
| 9. Système d'isolation des transformateurs ..... | 16 |
| 9.1 Isolation solide.....                        | 16 |
| 9.1.1 Isolation solide conventionnelle.....      | 16 |
| 9.1.2 Isolation solide haute température.....    | 17 |
| 9.2 Isolation liquide .....                      | 19 |
| 9.3 Complexe Liquide/Solide.....                 | 19 |
| IV. Conclusion .....                             | 20 |

## **Chapitre II : Paramètres influents sur l'isolation dans les transformateurs de puissances .....22**

|   |    |
|---|----|
| 1. Introduction.....  | 22 |
| 2. Le rôle d'huiles isolantes .....   | 22 |
| 3. Types des huiles isolantes.....  | 22 |
| 3.1 Huiles minérales isolantes .....  | 22 |
| 3.2 Huiles synthétiques.....  | 24 |
| 3.2.1 Les esters synthétiques .....   | 25 |
| 3.2.2 Huiles silicones.....   | 25 |
| 3.2.3 Les huiles végétales ou esters naturels .....                                   | 26 |
| 4. Choix d'une huile pour une application spécifique.....                             | 26 |
| 5. Les paramètres qui influent l'huile isolante.....                                  | 27 |
| 5.1 Les propriétés liées au transfert de chaleur ( les paramètres physiques)<br>..... | 27 |
| 5.1.1 La Viscosité dynamique .....  | 27 |
| 5.1.2 La Viscosité Cinématique .....  | 29 |
| 5.1.3 Point d'écoulement.....   | 29 |
| 5.1.4 Capacité et conductivité thermique .....  | 30 |
| 5.2 Les propriétés électriques .....  | 31 |
| 5.2.1 Permittivité .....  | 31 |
| 5.2.2 Conductivité / Résistivité .....  | 32 |
| 5.2.3 Facteur de dissipation .....  | 33 |
| 5.2.4 Rigidité diélectrique et tension de claquage.....                               | 34 |



|   |   |           |
|---|---|-----------|
| 5.2.4.1   | La géométrie des électrodes .....   | 35        |
| 5.2.4.2   | Influence de température : .....  | 35        |
| 5.2.4.3   | Influence de pression .....   | 36        |
| 5.2.4.4   | Influence d'Humidité .....  | 36        |
| 5.2.4.5   | Impact de champ électrique sur la rigidité diélectrique .....                         | 37        |
| 6.  | Conclusion .....  | 38        |
| <b>Chapitre III : La modélisation numérique de cellule de claquage ( Impact du champ ).....</b> |   | <b>40</b> |
| 1.  | Introduction .....  | 40        |
| 2.  | Définition .....  | 41        |
| 3.  | L'organisation .....  | 41        |
| 4.  | Initiation au logiciel .....  | 42        |
| 4.1   | Prise en main de logiciel .....   | 42        |
| 4.2   | Processus de résolution dans COMSOL Multiphysics .....                                | 43        |
| 4.3   | Résolution du problème.....   | 46        |
| 4.4   | Analyse des résultats .....   | 46        |
| 4.5   | Capacités et performances de COMSOL Multiphysics .....                                | 47        |
| 4.6   | Avantages de conception avec COMSOL Multiphysics.....                                 | 47        |
| 5.  | Modélisation de cellule de claquage.....  | 48        |
| 5.1   | Procédures de simulation de cellule de claquage à l'aide de COMSOL Multiphysics ..... | 48        |
| 6.  | Résultats et discussions.....   | 59        |
| 6.1   | Impact de la géométrie des électrodes.....  | 59        |
| 6.1.1   | Electrodes sphériques .....   | 59        |
| 6.1.2   | Electrodes elliptiques .....  | 60        |
| 6.1.3   | Electrodes Pointus .....  | 61        |
| 6.2   | Effet de qualité d'huile ( Minérale / Végétale ) .....                                | 64        |
| 6.2.1   | Huile minérale .....  | 64        |
| 6.2.2   | Huile végétale.....   | 65        |
| 6.3   | Impact de Matériau des électrodes .....   | 67        |

|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| 6.3.1 Cuivre .....              | 67           |
| 6.3.2 Aluminium.....            | 68           |
| 6.4 L'ajout de Papier .....     | 70           |
| 7. Conclusion .....             | 72           |
| <b>Conclusion générale.....</b> | <b>74</b>    |
| <b>Recommandations.....</b>     | <b>74</b>    |
| <b>Bibliographie .....</b>      | <b>.....</b> |

# Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| FIGURE 1 : TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE .....  | 4  |
| FIGURE 2 : LES ENROULEMENTS .....   | 6  |
| FIGURE 3 : LE CIRCUIT MAGNETIQUE .....  | 7  |
| FIGURE 4 : TRANSFORMATEUR PARFAIT .....   | 8  |
| FIGURE 5 : TRANSFORMATEUR REEL MONOPHASE.....   | 9  |
| FIGURE 6 : LES PERTES DANS UN TRANSFORMATEUR.....   | 11 |
| FIGURE 7 : TRANSFORMATEUR CUIRASSE .....  | 13 |
| FIGURE 8 : TRANSFORMATEUR DE TYPE COLONNE.....  | 14 |
| FIGURE 9 : CONCEPTION D'UN TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE [ 31 ].....                                    | 15 |
| FIGURE 10 : MOTIF ELEMENTAIRE D'UNE CELLULOSE [ 3 ].....  | 17 |
| FIGURE 11 : STRUCTURE ELEMENTAIRE DE L'ARAMIDE [ 32 ].....  | 18 |
| FIGURE 12 : PROCESSUS DE RAFFINAGE POUR LES HUILES BRUTES[ 8 ] .....                                  | 23 |
| FIGURE 13 : PRINCIPAUX CONSTITUANTS D'HUILE MINERALE ISSUE DE PETROLE BRUT.....                       | 24 |
| FIGURE 14 : VARIATION DE LA RESISTIVITE DE DIFFERENTES HUILES MINERALES ( COURANT CONTINU )[22] ..... | 32 |
| FIGURE 15 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE L'ANGLE DE PERTE (TAN $\Delta$ ).....                       | 33 |
| FIGURE 16 : CONFIGURATION D'ELECTRODES[ 24 ].....   | 35 |
| FIGURE 17 : INFLUENCE DE TEMPERATURE SUR LA TENSION DE CLAQUAGE[ 26].....                             | 36 |
| FIGURE 18 : INFLUENCE D'HUMIDITE SUR LA TENSION DE CLAQUAGE[ 25] .....                                | 37 |
| FIGURE 19 : FENETRES PRINCIPALES DE LOGICIEL .....  | 42 |
| FIGURE 20 : CHOIX DE MODELE .....   | 43 |
| FIGURE 21 : CHOIX DE DIMENSION D'ETUDE.....   | 43 |
| FIGURE 22 : CHOIX DE TYPE DE PHYSIQUE .....   | 44 |
| FIGURE 23 : CHOIX DE D'ETUDES (STATIONNAIRE OU EN FONCTION DU TEMPS) .....                            | 44 |
| FIGURE 24 : ATTRIBUTION DES PARAMETRES GLOBAUX.....   | 45 |
| FIGURE 25 : CELLULE DE CLAQUAGE.....  | 49 |
| FIGURE 26 : ICONE DE LOGICIEL .....   | 49 |
| FIGURE 27 : CHOIX DE DIMENSION .....  | 50 |
| FIGURE 28 : CHOIX DE PHYSIQUE .....   | 50 |
| FIGURE 29 : CHOIX DE L'ETUDE.....   | 51 |
| FIGURE 30 : DESSIN DE DEUX CERCLES.....   | 52 |
| FIGURE 31 : BLOC INTERNE DE CELLULE .....   | 53 |
| FIGURE 32 : BLOC EXTERNE DE CELLULE.....  | 53 |
| FIGURE 33 : FORME FINALE DE CELLULE AVEC ELECTRODES SPHERIQUES.....                                   | 54 |
| FIGURE 34 : FORME FINALE DE CELLULE AVEC ELECTRODES ELLIPTIQUES .....                                 | 55 |
| FIGURE 35 : FORME FINALE DE CELLULE AVEC ELECTRODES POINTUS .....                                     | 55 |
| FIGURE 36 : PARAMETRES DE HUILE MINERALE ( BIBLIO DE LOGICIEL ) .....                                 | 56 |
| FIGURE 37 : PARAMETRES DE HUILE VEGETALE ( BIBLIO DE LOGICIEL ).....                                  | 56 |
| FIGURE 38 : AJOUT DE POTENTIEL ELECTRIQUE.....  | 57 |
| FIGURE 39 : AJOUT DE LA MASS.....   | 57 |
| FIGURE 40 : LE MAILLAGE.....  | 58 |
| FIGURE 41 : MAILLAGE EXTREMEMENT FIN .....  | 58 |
| FIGURE 42 : LE CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE GEOMETRIE SPHERIQUE .....                              | 59 |
| FIGURE 43 : ELECTRODES EN CUIVRE DE FORME SPHERIQUE EN HUILE MINERALE.....                            | 59 |
| FIGURE 44 : ELECTRODES EN CUIVRE DE FORME ELLIPTIQUE EN HUILE MINERALE .....                          | 60 |
| FIGURE 45 : LE CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE GEOMETRIE ELLIPTIQUE .....                             | 60 |
| FIGURE 46 : ELECTRODES EN CUIVRE DE FORME POINTUS EN HUILE MINERALE.....                              | 61 |
| FIGURE 47 : LE CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE GEOMETRIE POINTUE .....                                | 61 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURE 48 : CHARGE ELECTRIQUE ENTRE LES SPHERES .....  | 62 |
| FIGURE 49 : CHARGE ELECTRIQUE ENTRE LES POINTES .....  | 62 |
| FIGURE 50 : ELECTRODES EN CUIVRE DE FORME SPHERIQUE EN HUILE MINERALE.....                   | 64 |
| FIGURE 51 : CHAMP ELECTRIQUE EN HUILE MINERALE .....   | 64 |
| FIGURE 52 : ELECTRODES EN CUIVRE DE FORME SPHERIQUE EN HUILE VEGETALE .....                  | 65 |
| FIGURE 53 : CHAMP ELECTRIQUE EN HUILE VEGETALE.....  | 65 |
| FIGURE 54 : ELECTRODES EN CUIVRE ( SPHERIQUE EN HUILE MINERALE ) .....                       | 67 |
| FIGURE 55 : CHAMP ELECTRIQUE EN CUIVRE.....  | 67 |
| FIGURE 56 : ELECTRODES EN ALUMINIUM ( SPHERIQUE EN HUILE MINERALE ) .....                    | 68 |
| FIGURE 57 : CHAMP ELECTRIQUE EN ALUMINIUM .....  | 68 |
| FIGURE 58 : AJOUT DE PAPIER .....  | 70 |
| FIGURE 59 : ELECTRODES EN CUIVRE DE FORME ELLIPTIQUE EN HUILE VEGETALE.....                  | 70 |
| FIGURE 60 : ELECTRODES EN CUIVRE DE FORME ELLIPTIQUE EN HUILE VEGETALE ( AVEC PAPIER ) ..... | 71 |

## Liste des tableaux

|   |           |
|---|-----------|
| <b>TABLEAU 1 : COMPOSANTES D'UN TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE .....</b> | <b>15</b> |
| <b>TABLEAU 2 : DIFFERENTES MARQUES DU PAPIER ARAMIDE[ 5 ] .....</b>   | <b>18</b> |
| <b>TABLEAU 3 : CHOIX DES HUILES[ 14].....</b>                         | <b>27</b> |

## Liste des abréviations

- **A** : Constante positive caractéristiques du liquide
- **B** : Constante positive caractéristiques du liquide
- **C<sub>0</sub>** : Capacité du condensateur vide
- **C<sub>p</sub>** : Capacité d'un condensateur rempli d'huile
- **e** : est la distance entre les deux électrodes
- **ebd** : Electronic Brakeforce Distribution
- **Ec** : La rigidité
- **φ<sub>2</sub>** : Flux qui traverse les spires secondaires
- **φ<sub>1</sub>** : Flux qui traverse les spires primaires
- **I<sub>1</sub>** : Courant du primaire
- **I<sub>2</sub>** : Courant du secondaire
- **IEC** : Commission électrotechnique internationale
- **L** : Inductance de circuit magnétique
- **L<sub>1</sub>** : Inductance de l'enroulement primaire
- **L<sub>2</sub>** : Inductance de l'enroulement secondaire
- **N<sub>1</sub>** : Nombre de spires du primaire
- **N<sub>2</sub>** : Nombre de spires du secondaire
- **PCB** : Polychlorobiphényles
- **PMMA** : Poly méthacrylate de méthyle
- **R<sub>1</sub>** : Résistance de l'enroulement primaire
- **R<sub>2</sub>** : Résistance de l'enroulement secondaire
- **R<sub>f</sub>** : Résistance de circuit magnétique
- **T** : La température
- **T<sub>0</sub>** : Température initial
- **Tan δ** : facteur de dissipation
- **U<sub>1</sub>** : Différence de potentiel aux bornes du primaire
- **U<sub>2</sub>** : Différence de potentiel aux bornes du secondaire
- **U<sub>c</sub>** : tension de claquage
- **v** : Viscosité cinématique
- **VFTH** : La relation de Vogel, Fulcher, Tamman et Hesse
- **ε** : La permittivité absolue
- **ε<sub>r</sub>** : La permittivité relative
- **ε<sub>0</sub>** : La permittivité du vide
- **η** : La viscosité dynamique
- **ρ** : Masse volumique
- **σ** : conductivité électrique

# **Introduction générale**

## Introduction Générale

Les transformateurs de puissance sont des composants essentiels et onéreux des réseaux d'énergie électrique. Ils représentent environ 60 % de l'investissement total d'un poste de transformation .

Ce sont des dispositifs électriques essentiels utilisés dans les réseaux de distribution d'électricité pour modifier la tension électrique selon les besoins. Leur fonction principale est de transférer de l'énergie électrique entre les différents systèmes de distribution et de transmission tout en maintenant l'efficacité du réseau.

Ils se présentent sous différentes tailles et configurations en fonction de la capacité de charge requise et des spécifications du réseau électrique. De plus, ils sont équipés de divers dispositifs de protection et de surveillance pour assurer un fonctionnement sûr et fiable.

Le bon fonctionnement des transformateurs haute tension dépend principalement de leur isolation électrique et de la régulation de leur température. Ces transformateurs intègrent deux types de matériaux isolants prédominants : de l'huile minérale, un liquide diélectrique favorisant le transfert de chaleur, et des matériaux lignocellulosiques. Parmi ces derniers, on trouve des papiers d'isolation qui enveloppent les fils de cuivre des enroulements, ainsi que des écrans en carton assurant le support mécanique des enroulements et l'isolation électrique entre les différentes phases du transformateur. Les surfaces des cartons sont constamment en contact avec un écoulement d'huile.

Dans un transformateur de puissance, l'isolation électrique est cruciale pour assurer la sécurité des opérateurs et la fiabilité de l'équipement. Elle permet de maintenir une séparation efficace entre les enroulements et les parties métalliques, ainsi qu'entre les différentes tensions électriques présentes dans le transformateur.

En résumé, les transformateurs de puissance jouent un rôle crucial dans la transmission et la distribution efficaces de l'électricité, permettant ainsi de répondre aux besoins croissants en énergie tout en garantissant la stabilité et la fiabilité des réseaux électriques.



Dans ce travail, on s'intéresse à l'isolation liquide dans les transformateurs de puissance et plus spécifiquement à la rigidité électrique des huiles isolantes et les paramètres influents. Parmi les paramètres d'influence sur la rigidité électrique le champ électrique.

Nous présentons le contenu de ce mémoire en trois chapitres, répartis comme suit :

Le premier chapitre est consacré à une vue générale sur les transformateurs de puissance, sa définition, son principe de fonctionnement, ses caractéristiques et ses modes d'isolation.

Le deuxième chapitre présente l'isolation liquide dans un transformateur de puissance et les paramètres d'influence sur cette isolation.

Les résultats de simulation de l'impact du champ électrique sur la rigidité diélectrique dans les transformateurs de puissance en simulant la cellule de claquage à l'aide de logiciel de simulation COMSOL MULTIPHYSICS sont présentés dans le chapitre trois .

**Chapitre I :**  
**Présentation générale**  
**d'un transformateur**  
**de puissance**

# Chapitre I : Présentation générale d'un transformateur de puissance

## 1. Introduction

Ce chapitre vise à fournir une vue d'ensemble des principaux aspects des transformateurs de puissance, notamment leur fonctionnement, leur construction, leurs applications, ainsi que leur importance dans l'infrastructure électrique mondiale.

## 2. Définition d'un transformateur de puissance

Selon la norme (IEC 60076-1, 2000) , le transformateur de puissance es un Appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et de courant de valeurs généralement différentes à la même fréquence dans le but de transmettre de la puissance électrique .

La figure 1 nous montre un transformateur de puissance .



**Figure 1 :** Transformateur de puissance

### 3. Le rôle d'un transformateur

Le transformateur de puissance est crucial dans les réseaux électriques. Il s'agit d'un dispositif électromagnétique qui permet de modifier le niveau de tension d'un courant alternatif. Son principe de fonctionnement repose sur l'induction électromagnétique entre deux enroulements, le primaire et le secondaire, couplés magnétiquement mais électriquement isolés. Le transformateur permet ainsi de convertir une tension de niveau élevé en une tension de niveau plus bas (abaisseur) ou inversement (élévateur), tout en conservant la puissance apparente. Cette capacité de transformation de tension est essentielle pour le transport efficace de l'électricité sur de longues distances, en minimisant les pertes ohmiques et en permettant l'adaptation des niveaux de tension entre les différentes parties du réseau, du générateur jusqu'aux points de consommation. En résumé, le transformateur de puissance joue un rôle central dans la distribution et la transmission de l'électricité, assurant un approvisionnement fiable et efficace en énergie électrique.

### 4. Description d'un transformateur

Afin de remplir son rôle, un transformateur est composé de bobines primaires et secondaires connectées par un noyau magnétique qui guide le flux magnétique généré par ces bobines. Ces composants sont logés dans un réservoir qui assure à la fois leur soutien mécanique et leur protection .[ 1 ]

#### 4.1 Les Enroulements

Ils sont composés de conducteurs en cuivre isolés les uns des autres par du papier Kraft, également appelé papier d'enrubannage ou de guipage. Les enroulements du primaire et du secondaire sont regroupés autour du même noyau afin de minimiser les fuites magnétiques. Chaque enroulement du primaire doit être soigneusement isolé des enroulements du secondaire. Pour cela, des écrans protecteurs, généralement en carton, sont placés entre les enroulements. Des cales, fabriquées en bois ou en bois lamellé bakéliné, sont insérées entre chaque enroulement ainsi qu'entre les bobines et le circuit magnétique, garantissant ainsi une structure très rigide pour limiter les contraintes mécaniques. Des canaux verticaux sont intégrés entre les cales pour assurer un bon refroidissement par circulation du liquide caloporteur à travers la bobine.

### 4.2 Circuit Magnétique :

Il est principalement fabriqué à partir de tôles ferromagnétiques à cristaux orientés, contenant environ 6% de silicium. Le circuit magnétique est divisé en deux parties pour faciliter l'assemblage lors de la construction : le noyau et les culasses. Le noyau, de forme carrée ou circulaire selon le type de transformateur et la configuration des bobines, est constitué de tôles assemblées en paquets de cinq à dix millimètres d'épaisseur. Des canaux de refroidissement sont intégrés à l'intérieur des noyaux pour les transformateurs de grande taille. Les culasses sont placées au-dessus et en-dessous des noyaux pour fermer le circuit magnétique, s'emboîtant dans les tôles magnétiques du noyau.

Les figures 2 et 3 nous démontre les composants principaux d'un transformateur .

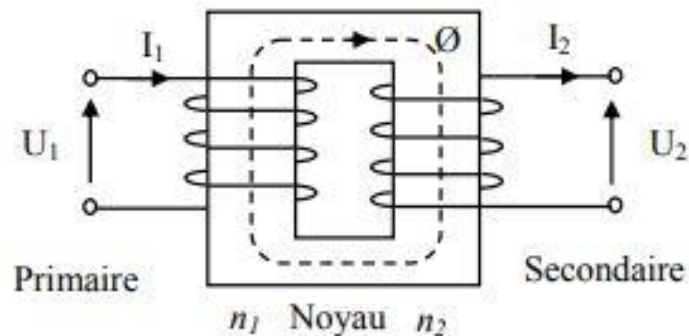


Figure 2 : Les enroulements

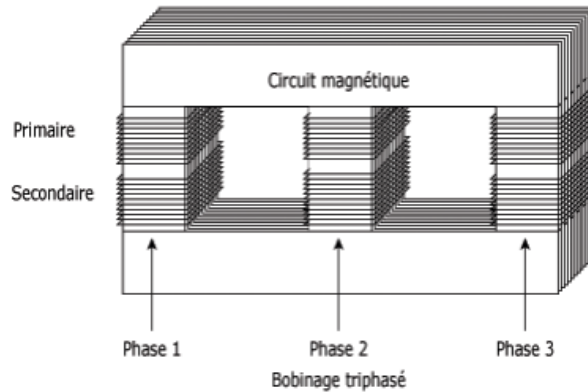


Figure 3 : Le circuit magnétique

## 5. Principe de fonctionnement

### 5.1 Transformateur parfait ou idéal

Un transformateur idéal ( Figure 4 ) est un concept abstrait représentant un transformateur théorique dépourvu de toute perte. Il est utilisé comme modèle pour représenter les transformateurs réels. Lorsque toutes les pertes et les fuites de flux magnétique sont négligées, le rapport entre le nombre de spires du primaire ( $N_1$ ) et le nombre de spires du secondaire ( $N_2$ ) détermine entièrement le rapport de transformation du transformateur. [ 1 ]

On a ( Eq I.1 ) :

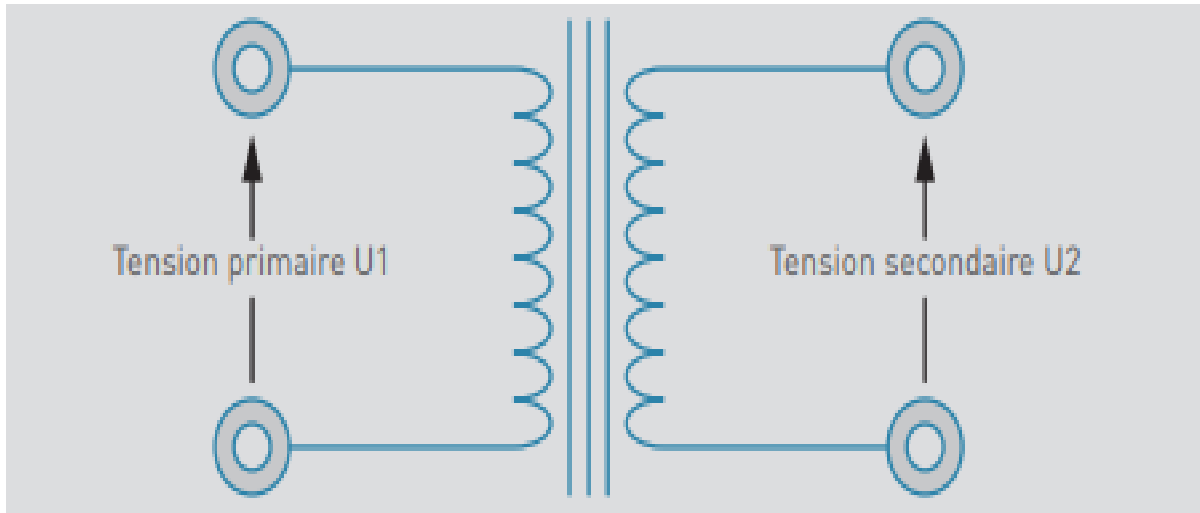
$$U_1/U_2 = N_1/N_2 \quad (\text{Eq I.1})$$

Avec  $U_1$  la différence de potentiel aux bornes du primaire, et  $U_2$  la différence de potentiel aux bornes du secondaire. Les pertes étant négligées, la puissance est transmise intégralement. Si on note  $I_1$  le courant du primaire et  $I_2$  le courant du secondaire, on a : ( Eq I.2 ) et ( Eq I.3 ) :

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (\text{Eq I.2})$$

d'où :

$$U_1/U_2 = I_2/I_1 \quad (\text{Eq I.3})$$



**Figure 4 :** Transformateur parfait

Le concept de transformateur parfait est utile pour comprendre le fonctionnement des transformateurs réels et pour simplifier les calculs .

Le transformateur parfait est un modèle théorique important qui permet de comprendre les principes de base du fonctionnement des transformateurs électriques. Bien qu'il ne soit pas réel, il est néanmoins un outil précieux .

### 5.2 Transformateur réel

Un transformateur réel présente des limitations et des inefficiences dues à des facteurs tels que les pertes joules dans les conducteurs, les pertes magnétiques dans le noyau, les pertes diélectriques dans l'isolant, et les courants parasites. De plus, les matériaux réels utilisés dans sa fabrication ont des propriétés qui peuvent dévier des hypothèses idéales, ce qui entraîne des inefficiences supplémentaires. En conséquence, un transformateur réel aura généralement une efficacité légèrement inférieure à 100% et nécessitera des mesures de conception et de maintenance spécifiques pour minimiser ces pertes et assurer un fonctionnement optimal.

Ces derniers sont considérés comme une combinaison d'un transformateur parfait et de diverses impédances .

#### 5.2.1 Transformateur réel monophasé

En réalité, les enroulements primaire et secondaire ont des résistances  $R_1$  et  $R_2$  et ne sont pas parfaitement couplés. Si le flux qui traverse les spires primaires est  $\phi_1$  à travers les spires secondaires est  $\phi_2$  ( Figure 5 ) .

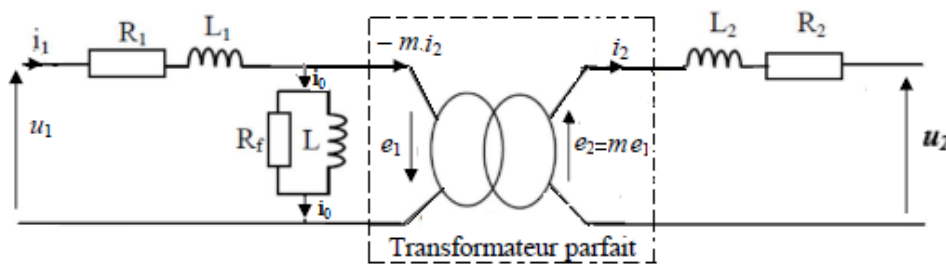


Figure 5 : Transformateur réel monophasé

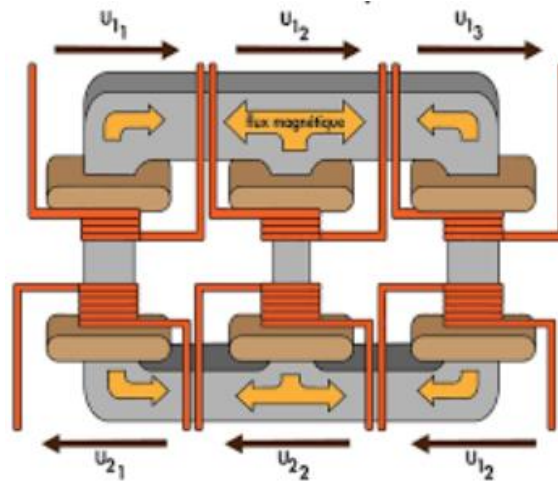
- o  $R_1$  : résistance de l'enroulement primaire
- o  $R_2$  : résistance de l'enroulement secondaire
- o  $L_1$  : Inductance de l'enroulement primaire
- o  $L_2$  : Inductance de l'enroulement secondaire
- o  $R_f$  : résistance de circuit magnétique
- o  $L$  : Inductance de circuit magnétique



### 5.2.2 Transformateur réel triphasé

La production de l'énergie électrique et son transport se fait généralement en triphasé, d'où la nécessité d'utiliser des transformateurs triphasés ( Figure 6 ) .

Un transformateur triphasé est équivalent à trois transformateurs monophasés.



**Figure 6 :** Transformateur réel Triphasé



**Figure 7 :** Transformateur triphasé abaisseur

### 6. Les pertes d'un transformateur

#### 6.1 Les pertes par effet Joule

Les pertes par effet Joule, connues sous le nom de pertes cuivre, se produisent lorsqu'un courant électrique traverse les enroulements, générant de la chaleur due à la résistance électrique des fils conducteurs. Ces pertes dépendent à la fois de la résistance des enroulements et de l'intensité du courant qui les traverse. En général, on observe qu'elles augmentent de manière proportionnelle au carré de l'intensité du courant.

#### 6.2 Les pertes Fer

Les pertes de fer se produisent principalement en raison du processus d'aimantation et de désaimantation du noyau magnétique du transformateur lorsqu'il est soumis à un champ magnétique alternatif. Lorsque le courant alternatif traverse les enroulements du transformateur, il crée un champ magnétique alternatif qui induit un flux magnétique alternatif dans le noyau ferromagnétique. Ce processus d'aimantation et de désaimantation entraîne des pertes d'énergie ( Figure 8 ) sous forme de chaleur dans le matériau ferromagnétique du noyau.

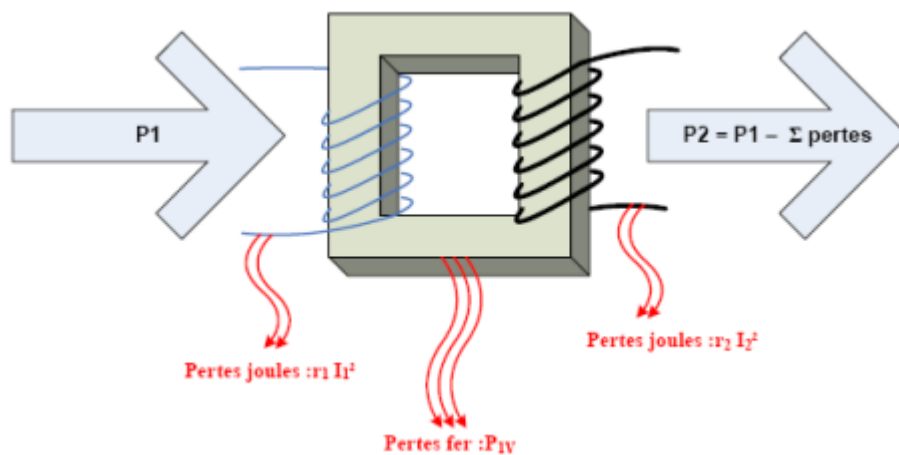


Figure 6 : Les pertes dans un transformateur

### 6.3 Mesures des pertes

Il est envisageable de distinguer et mesurer les deux types de pertes séparément. Les pertes par effet Joule sont évaluées lorsque le transformateur est soumis à un courant élevé et une tension basse (ce qui entraîne des pertes magnétiques réduites). Cette mesure est réalisée en court-circuitant le transformateur (test en court-circuit) avec une alimentation en tension réduite. Les pertes du transformateur sont alors presque équivalentes aux pertes par effet Joule. Les pertes magnétiques sont évaluées lorsque le transformateur est soumis à une tension élevée et un courant faible (ce qui engendre des pertes par effet Joule réduites). Cette mesure est effectuée lorsque le transformateur fonctionne à vide (test à vide), c'est-à-dire sans qu'un récepteur soit connecté au secondaire. Les pertes du transformateur sont alors pratiquement équivalentes aux pertes magnétiques.

## 7. Classification des transformateurs de puissance

Les transformateurs de puissance sont classés par des différents critères : [ 2 ]

### 7.1 La puissance apparente

Selon la commission Electrotechnique Internationale les transformateurs de puissance sont classés en trois catégories en fonction de la puissance apparente:

- Transformateurs de distribution : jusqu'à 2,5 MVA en triphasé ou 0,833MVA en monophasé.
- Transformateur de moyenne puissance : au-delà de 2,5 MVA et jusqu'à 100 MVA en triphasé et 33,3MVA en monophasé.
- Transformateur de grande puissance : au-delà de 100 MVA en triphasé 33,3 MVA en monophasé

### 7.2 Le nombre des phases

- Monophasé
- Triphasé

### 7.3 Le mode de refroidissement

- Air
- Huile
- Mixte

### 7.4 Le rapport de transformation

- Élévateur
- Abaisseur

### 7.5 La forme du circuit magnétique

#### 7.5.1 Le transformateur cuirassé

Le transformateur cuirassé est composé de bobines en forme de galettes rectangulaires (Figure 9).

Des écrans isolants en fibre de cellulose (carton dont l'épaisseur varie en fonction de la contrainte diélectrique) sont intercalés entre chaque galette. Ces écrans en carton comportent des cales qui délimitent les canaux par lesquels circule l'huile minérale. Le circuit magnétique, constitué d'un empilage de tôles, entoure les bobines disposées sur un axe horizontal.

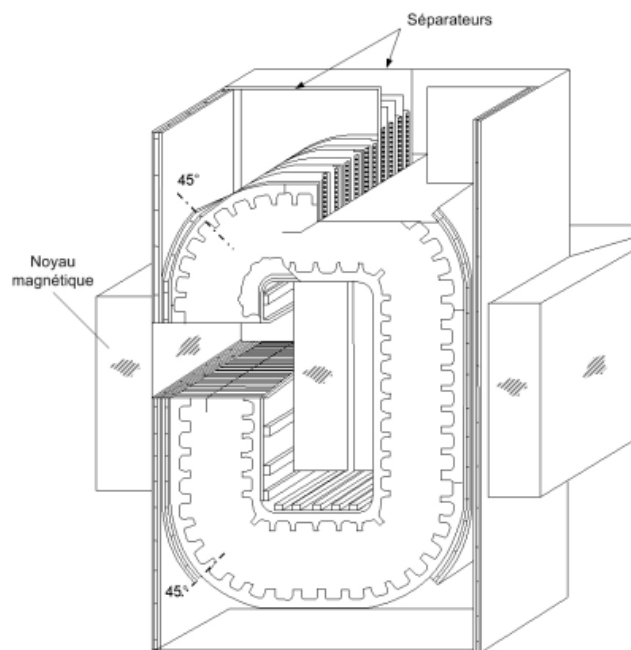
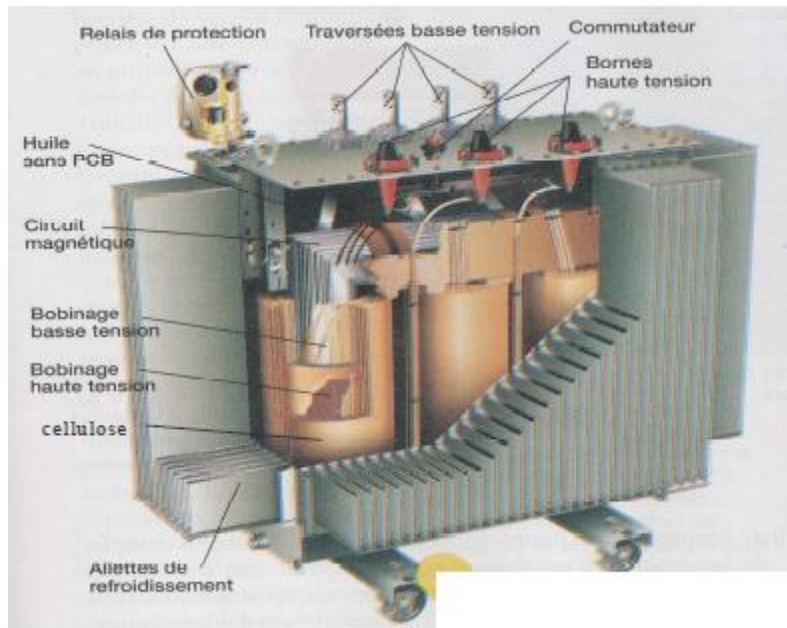


Figure 7 : Transformateur cuirassé

### 7.5.2 Le transformateur de type «colonne»

Le transformateur de type colonne ( Figure 10 ) est constitué d'un circuit magnétique composé de colonnes verticales autour desquelles sont enroulés des bobinages cylindriques isolés avec de la fibre de cellulose.



**Figure 8 :** Transformateur de type colonne

En résumé, les transformateurs de type "colonne" sont des transformateurs électriques robustes et polyvalents qui sont couramment utilisés dans une grande variété d'applications.

## 8. Conception d'un Transformateur de puissance

Voici un aperçu générale de la conception du transformateur de puissance : ( Figure 11)

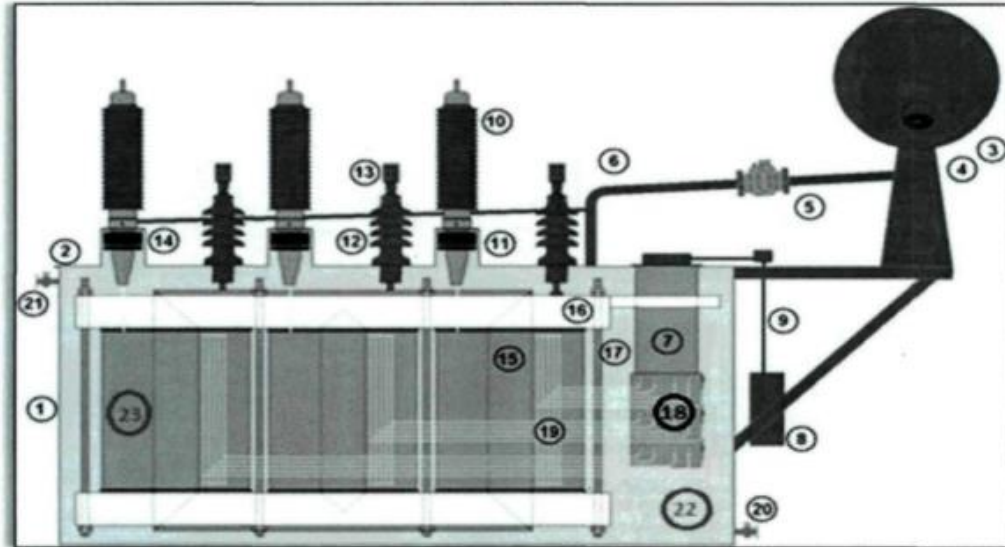


Figure 9 : Conception d'un transformateur de puissance [ 31 ]

Tableau 1: Composantes d'un transformateur de puissance

|    |  |    |   |
|----|--|----|---|
| 1  | Cuve   | 13 | Contact du secondaire   |
| 2  | Couvercle                                    | 14 | Transformateur de courant   |
| 3  | Conservateur                                 | 15 | Enroulements  |
| 4  | Indicateur de niveau d'huile                 | 16 | Noyau magnétique  |
| 5  | Relais Buchholz                              | 17 | Élément mécanique maintenant le noyau magnétique et les enroulements ensemble exerçant une force de compression |
| 6  | Tuyau d'huile                                | 18 | Bornes de connexion du changeur de prises   |
| 7  | Changeur de prises                           | 19 | Connexion du changeur de prises aux enroulements  |
| 8  | Moteur électrique du changeur de prises      | 20 | Robinet pour prélèvement d'huile  |
| 9  | Transmission mécanique du changeur de prises | 21 | Robinet d'air   |
| 10 | Connexion du primaire                        | 22 | fluide diélectrique (huile)   |
| 11 | Bornes de traversée                          | 23 | isolant solide (papier)   |
| 12 | Connexion du secondaire                      |    |   |

### 9. Système d'isolation des transformateurs

Le système d'isolation a pour rôle de séparer les composants actifs du transformateur tels que les bobinages, le circuit magnétique, etc., tout en assurant leur refroidissement. Il se compose à la fois d'une composante solide et d'une composante liquide, notamment de l'huile.

#### 9.1 Isolation solide

La composition de l'isolation comprend des matériaux tels que le papier et le carton. Le papier est utilisé pour isoler les enroulements, tandis que le carton isole entre les enroulements et entre les enroulements et le noyau. Ces matériaux sont ensuite imprégnés de diélectrique liquide (huile) pour renforcer leur rigidité diélectrique et réduire ainsi le risque de décharges partielles. Trois types d'isolation solide sont distingués : [ 31 ]

- Isolation solide conventionnelle : le papier et le carton sont fabriqués à partir de fibres de cellulose.
- Isolation solide haute température : le papier et le carton sont fabriqués à partir de polymères synthétiques (aramide).
- Isolation solide hybride : une combinaison de papier cellulose et d'aramide est utilisée.

##### 9.1.1 Isolation solide conventionnelle

Le papier et le carton sont fabriqués à partir de fibres de cellulose, qui sont des chaînes de glucose extraites de la pulpe de bois ou de fibres de coton. Ces fibres de cellulose se composent de longues chaînes contenant environ 1200 anneaux de glucose reliés par des ponts d'oxygène.

Le papier est principalement composé de 90% de cellulose, avec environ 6 à 7% de lignine, 3 à 4% d'hémicellulose (pentasaccharides), et des traces de cations métalliques [ 21].

La cellulose ( Figure 12 ) est un polysaccharide linéaire appartenant à la série des (3-D-glucanes). Elle se présente sous forme de longues chaînes, d'environ 100 nm de longueur, constituées par l'assemblage linéaire de motifs anhydroglucose reliés par des liaisons glycosidiques ( $\beta$ -1-4). Le degré de polymérisation moyen de la cellulose, qui représente le nombre moyen de motifs de glucose par chaîne de cellulose, peut être utilisé pour la caractériser. Les hémicelluloses sont des hétéropolysaccharides contenant divers types de monosaccharides, possédant soit 6, soit 5 atomes de carbone. Elles sont partiellement liées



aux molécules de cellulose et de lignine par des liaisons hydrogène. Les lignines sont des polymères tridimensionnels irréguliers constitués de motifs de phénylpropane, jouant un rôle de ciment. La lignine résiduelle dans la pâte après traitement est difficile à éliminer en raison de l'inaccessibilité physique et des liaisons lignines-hydrate de carbones, ce qui peut entraîner des coupures dans les chaînes de cellulose et ainsi une dépolymérisation significative de la cellulose. La constante diélectrique du papier est environ deux fois plus élevée que celle de l'huile. Ainsi, le papier et le carton seront utilisés dans les zones où un champ électrique intense prévaut pour renforcer l'isolation dans l'huile.

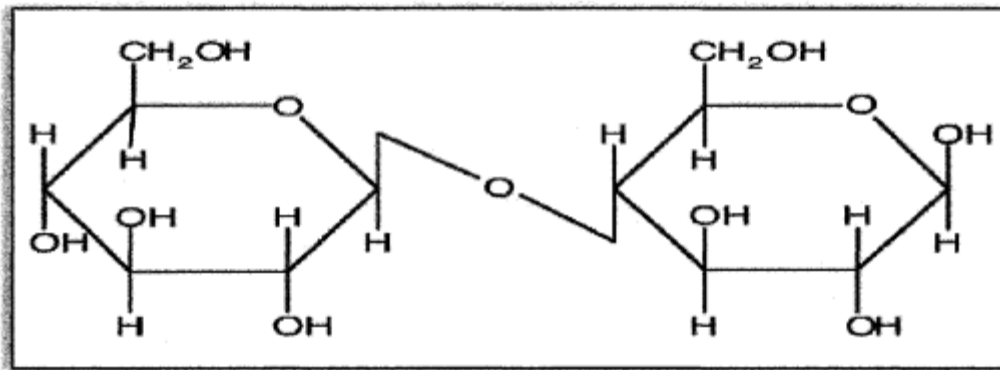


Figure 10 : Motif élémentaire d'une cellulose [ 3 ]

### 9.1.2 Isolation solide haute température

Le papier et le carton sont fabriqués à partir de polymères synthétiques connus sous le nom d'aramides. Les aramides, ou polyamides aromatiques, constituent une classe de matériaux résistants à la chaleur et présentant de bonnes propriétés mécaniques. Le terme "aramide" est dérivé de l'anglais "aromatic polyamide" et désigne les fibres synthétiques dont le polymère de base est composé d'une longue chaîne polymère dans laquelle au moins 85 % des groupements amides ( $\text{— NH — CO —}$ ) sont directement liés à deux noyaux benzéniques (aromatiques)[ 4 ].

Les premières applications des aramides (Figure 13 ) remontent aux années 1960. La structure chimique de l'aramide est illustrée dans la figure . On distingue deux types de polyamides : les para-aramides et les méta-aramides, seuls les méta-aramides trouvent leur application dans le domaine de l'isolation électrique. Plusieurs fabricants ont développé leurs



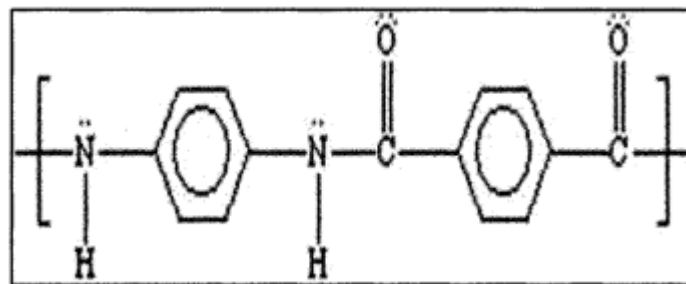
## Chapitre I : Présentation générale d'un transformateur de puissance

propres modèles d'aramide, comme indiqué dans le tableau qui présente trois marques de méta-aramides.

Voici un tableau qui montre les différents types de papier : ( Tableau 2 )

**Tableau 2** : différentes marques du papier Aramide[ 5 ]

| Fabricants         | Pays              | Marques           |
|--------------------|-------------------|-------------------|
| Du Pont De Nemours | USA               | Nomex             |
| Teijin             | Pays-Bas et Japon | Technora et Conex |
| Yantai             | Chine             | New Star          |



**Figure 11** : Structure élémentaire de l'Aramide [ 32 ]

Le Nomex, développé par Dupont de Nemours en 1961, est le méta-aramide le plus largement utilisé [ 32 ] . Il offre une excellente isolation électrique, même à des températures élevées. Le Nomex conserve ses propriétés intactes même à des températures dépassant 370°C. Parmi ses caractéristiques principales, on trouve : une résistance élevée à la chaleur et au feu, une grande résistance aux rayons ultraviolets, une résistance chimique élevée, une faible conductivité électrique, et un faible coefficient de contraction thermique.[ 32 ]

### 9.2 Isolation liquide

L'isolation liquide dans un transformateur de puissance est généralement réalisée à l'aide d'huile isolante. Cette huile joue un rôle crucial dans l'isolation électrique du transformateur, offrant une puissance diélectrique suffisante pour empêcher les décharges électriques et protéger les composants internes du transformateur. De plus, l'huile contribue au refroidissement du transformateur en créant des conduits de refroidissement pour dissiper la chaleur générée pendant le fonctionnement. Elle aide également à protéger le noyau et les enroulements en comblant les espaces dans les matériaux isolants, minimisant ainsi les risques d'arc électrique et d'oxydation.

L'isolation liquide, généralement composée d'huile, est essentielle pour assurer le bon fonctionnement et la durabilité des transformateurs de puissance, en garantissant une isolation électrique efficace et un refroidissement adéquat pour maintenir des performances optimales.

### 9.3 Complexe Liquide/Solide

L'association de l'huile et du papier forme un complexe isolant hautement efficace, jouant un rôle crucial dans l'isolation électrique des transformateurs de puissance.

Les propriétés électriques du complexe sont principalement attribuées à l'huile, tandis que sur le plan mécanique, la résistance du complexe est garantie par le papier, qui atténue en partie les vibrations générées par les composants actifs du transformateur. Cela contribue à limiter les contraintes exercées sur le complexe. Pour renforcer davantage la résistance mécanique du papier, il est disposé en bandes alternées de 75  $\mu\text{m}$  d'épaisseur autour de la barre de cuivre. Généralement, le nombre de ces bandes varie entre 3 et 12. [ 10 ]

Diverses caractéristiques peuvent être évaluées pour tester la qualité du papier utilisé :

- La résistance à la rupture ou la force à la traction.
  - L'allongement à la rupture.
  - L'indice de déchirement.
  - La résistance au pliage.
  - La limite élastique à la traction.
  - L'indice d'éclatement.
  - La mesure du degré moyen de polymérisation viscosimétrique.
- Ces mesures permettent d'assurer la fiabilité et la performance du papier dans son rôle crucial au sein du complexe isolant des transformateurs de puissance.

### IV. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté l'ensemble des éléments d'un transformateur de puissance, sa conception et son principe d'isolation. La classification des transformateurs est présentée aussi dans ce chapitre .

Le prochain chapitre sera consacré à l'isolation dans les transformateurs de puissance à savoir l'isolation liquide et l'isolation solide ainsi aux paramètres influents sur la qualité de l'huile .

**Chapitre II :**  
**Paramètres influents**  
**sur l'isolation dans**  
**les transformateurs**  
**de puissances**

## **Chapitre II : Paramètres influents sur l'isolation dans les transformateurs de puissances**

### **1. Introduction**

Les huiles isolantes sont couramment utilisées dans le domaine de l'électrotechnique pour différentes applications telles que l'imprégnation des isolants en cellulose ou le remplissage de divers équipements électriques tels que les transformateurs (de puissance, de distribution, de traction, de four, de mesure...), les réactances, les condensateurs, les câbles, les traversées, les disjoncteurs, les changeurs de prise, etc. Les quantités d'huile utilisées peuvent varier, allant de quelques litres pour les condensateurs à plusieurs dizaines de milliers de litres pour les transformateurs de puissance. Leur fonction principale est de chasser l'air et les autres gaz afin d'améliorer la résistance diélectrique de l'isolation solide, car la rigidité diélectrique des liquides est significativement supérieure à celle des gaz. Toutefois, dans de nombreux cas, elles jouent également un rôle crucial dans l'isolation électrique et l'évacuation de la chaleur d'un dispositif, comme c'est le cas pour les transformateurs.

### **2. Le rôle d'huiles isolantes**

L'huile remplit essentiellement trois rôles fondamentaux :

- Faciliter le transfert de chaleur générée par les pertes au niveau des enroulements, du circuit magnétique et des matériaux isolants vers les dispositifs de refroidissement externes tels que les radiateurs.
  - Retarder le processus d'oxydation (dégradation) des matériaux isolants solides.
  - Assurer l'isolation électrique.
- ✚ En plus de ces trois fonctions principales, il est également important de souligner sa capacité à résister au feu.

## **3. Types des huiles isolantes**

### **3.1 Huiles minérales isolantes**

Depuis plus d'un siècle, les huiles minérales sont utilisées comme isolants dans divers équipements électriques. À l'exception des transformateurs de distribution, qui subissent des contraintes de fonctionnement spécifiques, les transformateurs immergés sont généralement remplis d'huile minérale. Les caractéristiques essentielles recherchées pour l'huile minérale comprennent : [ 7 ]

- Une viscosité basse et une excellente fluidité pour garantir une circulation efficace.
  - Un point d'éclair élevé.
  - Une stabilité chimique optimale face aux processus d'oxydation et de décomposition.
  - Une haute rigidité diélectrique.
- ✚ L'huile minérale est produite par le raffinage du pétrole brut( Figure 14 ). Selon l'origine du pétrole et le processus de raffinage utilisé, différents types d'huiles peuvent être identifiés.

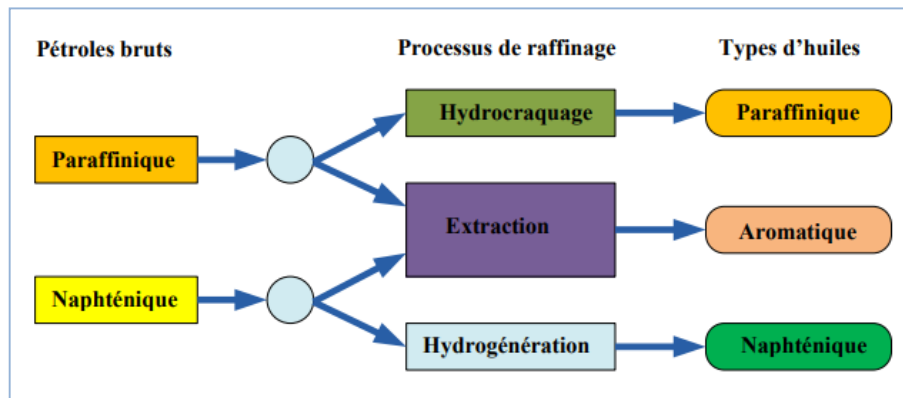
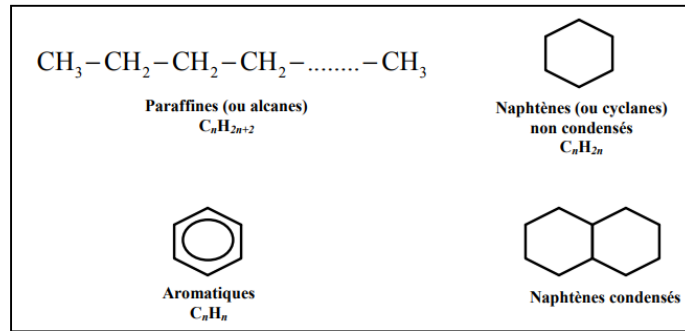


Figure 12 : Processus de raffinage pour les huiles brutes[ 8 ]

- ✚ Une fois purifiées, ces huiles se transforment en des mélanges extrêmement complexes, pouvant contenir plus de 3000 hydrocarbures distincts [ 9 ].
- ✚ Ces molécules sont composées exclusivement de carbone et d'hydrogène. Elles se répartissent en trois catégories, comme illustré dans la figure: les alcanes (ou paraffines), les cyclanes (ou naphtènes) et les composés aromatiques. En plus de ces éléments, d'autres constituants peuvent être présents dans l'huile, notamment de faibles quantités de soufre (0,1 à 7 % en masse), d'azote (0,001 à 2 %) et des traces d'oxygène (400 à 600 ppm en masse). La composition moléculaire générale de l'huile minérale fraîche est  $C_{20}H_{41.6}O_{0.3}$ , avec une masse moléculaire moyenne comprise entre 250 et 300 .[ 8 ]

La figure 15 montre les principaux constituants d'huile minérale .



**Figure 13 :** Principaux Constituants d'huile minérale issue de pétrole brut

### 3.2 Huiles synthétiques

Les huiles synthétiques sont adoptées dans les cas où les caractéristiques requises ne sont pas satisfaites par les huiles minérales. C'est notamment le cas lorsque l'amélioration de la résistance au feu est primordiale, comme dans le cas des transformateurs, ou lorsqu'une stabilité thermique accrue et des performances diélectriques supérieures sont recherchées, notamment pour les câbles et les condensateurs. Quatre types principaux de liquides synthétiques sont identifiés :

- 1) Les hydrocarbures aromatiques.
  - 2) Les hydrocarbures aliphatiques tels que les polyoléfines.
  - 3) Les esters synthétiques ou esters organiques, comme les esters de pentaérythritol ou les phtalates.
  - 4) Les silicones.
- ✚ Les liquides synthétiques se situent quelque part entre les PCB et les huiles minérales en termes de leurs points d'éclair et de leurs températures d'auto-inflammation. En effet, les liquides synthétiques sont classés parmi les liquides à point d'éclair élevé, également appelés liquides ininflammables, ayant un point d'éclair minimum dépassant les 300 °C. Cette caractéristique de résistance élevée à l'inflammation les rend particulièrement adaptés pour une utilisation dans les transformateurs situés dans des zones urbaines, où la sécurité des personnes et des biens pourrait être menacée par un incendie.

### **3.2.1 Les esters synthétiques**

Les esters synthétiques sont classifiables en cinq catégories distinctes : [ 11 ]

- Les monoesters,
- Les esters dicarboxyliques (diesters),
- Les esters du glycérol,
- Les polyolesters,
- Les esters complexes.

✚ Ces esters sont obtenus par la réaction de synthèse entre un acide et un alcool. Les polyesters et les esters complexes sont souvent privilégiés dans des environnements extrêmes, tels que ceux rencontrés dans les transformateurs de puissance. Ces catégories d'esters sont préférées en raison de l'absence de groupes hydroxyles secondaires et de la présence d'un carbone quaternaire dans leur structure chimique, en position p. Les alcools couramment utilisés pour cette synthèse incluent le pentaérythritol, le triméthylolpropane, le pentaérythritol ou encore le dipentaérythritol.

### **3.2.2 Huiles silicones**

Les silicones, également connus sous le nom de polysiloxanes, sont des composés inorganiques composés d'une chaîne alternée de silicium et d'oxygène (...-Si-O-Si-O-Si-O-...), sur laquelle des groupes sont fixés aux atomes de silicium.

Dans les transformateurs de puissance, les huiles silicones utilisées présentent des chaînes dont la valeur de n est généralement comprise entre 40 et 50, ce qui leur confère une viscosité acceptable avec un point d'éclair supérieur à 330 °C. Ces huiles silicones offrent de bonnes propriétés de résistance au vieillissement et à l'oxydation, leur stabilité étant attribuée à l'énergie de la liaison Si-O (374 kJ/mol, comparativement à 245 kJ/mol pour la liaison C-C)

[12 ]

L'huile silicone est généralement incolore et possède un point de congélation très bas par rapport aux huiles minérales, bien que sa viscosité à 20 °C soit plus élevée. En outre, les



huiles silicones sont également utilisées pour l'imprégnation des condensateurs à film de polypropylène métallisé.

### 3.2.3 Les huiles végétales ou esters naturels

Les huiles végétales ont été parmi les premiers liquides isolants utilisés dans la fabrication d'appareils électriques [ 13 ]. Leur composition chimique consiste en triesters principalement dérivés de triglycérides.

Ces huiles sont obtenues par estérification d'un tri-alcool simple avec trois acides gras. Elles se distinguent par leur faible toxicité et leur excellente biodégradabilité, bien qu'elles présentent une résistance relativement faible à l'oxydation et à l'hydrolyse. Actuellement, elles sont utilisées dans les transformateurs de distribution, et des recherches sont en cours pour évaluer leur applicabilité dans les transformateurs de grande puissance.

## 4. Choix d'une huile pour une application spécifique

Le choix d'une huile pour une application donnée repose sur un compromis entre les caractéristiques techniques et le coût. En comparaison avec les huiles minérales, les huiles à point d'éclair élevé ou alternatives telles que les huiles synthétiques ou végétales offrent de meilleures propriétés chimiques et thermiques, mais elles sont également 4 à 5 fois plus onéreuses. Néanmoins, lors du choix d'un liquide pour une application spécifique, il est essentiel de garantir la fiabilité du fonctionnement des équipements ainsi que la sécurité des opérateurs. Le tableau présente une gamme de types d'huiles adaptés à différents types de transformateurs.

Le tableau suivant montre les différents huiles et leurs utilisations en transformateurs de puissance .

**Tableau 3 : Choix des huiles[ 14]**

|   | <b>Huile minérale</b> | <b>Fluide Silicone</b> | <b>Ester synthétique</b> | <b>Huile végétale (ester naturel)</b> |
|---|-----------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| <b>Transformateurs de puissance</b>   | <b>A</b>              | <b>X</b>               | <b>B</b>                 | <b>B</b>                              |
| <b>Transformateurs de traction</b>  | <b>A</b>              | <b>A</b>               | <b>A</b>                 | <b>X</b>                              |
| <b>Transformateurs de distribution</b>  | <b>A</b>              | <b>A</b>               | <b>A</b>                 | <b>A</b>                              |
| <b>Transformateurs d'instruments</b>  | <b>A</b>              | <b>X</b>               | <b>X</b>                 | <b>X</b>                              |
| <b>A : Largement utilisé    B : Utilisé moins fréquemment    X : Couramment non utilisé</b> |                       |                        |                          |                                       |

## **5. Les paramètres qui influent l'huile isolante**

### **5.1 Les propriétés liées au transfert de chaleur ( les paramètres physiques)**

#### **5.1.1 La Viscosité dynamique**

La viscosité d'un fluide est une mesure de sa résistance à l'écoulement. En d'autres termes, elle représente la capacité des molécules du fluide à s'opposer aux efforts visant à les déplacer les uns par rapport aux autres par des glissements relatifs.

Un liquide homogène, avec une masse volumique supposée constante, présente des déformations relatives (glissements ou cisaillements) auxquelles il oppose une résistance mesurable. Selon leur comportement rhéologique, les fluides peuvent être catégorisés en deux types : les fluides dits "newtoniens" et les fluides dits "non newtoniens". La distinction entre ces deux types de liquides est réalisée grâce à la viscosité dynamique . Si un fluide, à température constante, maintient une viscosité constante quelle que soit la valeur de la contrainte appliquée, il est qualifié de newtonien. À l'inverse, si la viscosité varie en fonction de la contrainte appliquée, le fluide est considéré comme non newtonien. Les huiles de transformateurs appartiennent à la catégorie des fluides "newtoniens".

La viscosité diminue avec l'augmentation de la température, et plusieurs lois empiriques ont été proposées pour décrire ce phénomène. La relation de Vogel, Fulcher, Tamman et Hesse (VFTH) [ 15] est généralement utilisée à cet effet comme montre l'eq II.1 .

$$\log \eta = A + [B/(T - T_0)] \quad (\text{EqII.1})$$

$\eta$  est la viscosité dynamique,

A et B sont deux constantes positives caractéristiques du liquide,

T est la température (K),

$T_0 = 273,15$  K.

La viscosité dynamique d'un fluide dépend de plusieurs facteurs, dont :

- **La nature du fluide:** Les fluides plus **épais** ont généralement une viscosité plus élevée que les fluides plus **fluides**. Par exemple, le miel a une viscosité beaucoup plus élevée que l'eau.
- **La température:** Pour la plupart des fluides, la viscosité **diminue** lorsque la température **augmente**. Cela signifie que les fluides s'écoulent plus facilement à haute température qu'à basse température.
- **La pression:** Pour la plupart des fluides, la viscosité **augmente** légèrement avec la **pression**.
- **La présence de solutés:** La dissolution de solutés dans un fluide peut **augmenter** sa viscosité.

### **5.1.2 La Viscosité Cinématique**

La viscosité utilisée pour évaluer les huiles de transformateurs est la viscosité cinématique ( $\nu$ ), qui est plus simple à déterminer que la viscosité dynamique ( $\eta$ ). Le principe de mesure de ( $\nu$ ) repose sur l'application de la loi de Poiseuille, qui établit la relation entre le débit volumique d'un liquide newtonien s'écoulant en régime laminaire (c'est-à-dire avec une vitesse uniforme en tout point) dans un tube capillaire calibré, et la perte de charge linéaire (la perte d'énergie lors du mouvement). La viscosité cinématique ( $\nu$ ) peut être exprimée( en  $\text{mm}^2/\text{s}$  ), à une température donnée, par la formule suivante : [ 17 ]

$$\nu = \eta / \rho \quad (\text{EqII.2})$$

Ou :

- $\nu$  est la viscosité cinématique ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ),
- $\eta$  est la viscosité dynamique ( $\text{Pa.s}$ ),
- $\rho$  est la masse volumique ( $\text{kg.m}^3$ ).

### **5.1.3 Point d'écoulement**

Le point d'écoulement est un paramètre crucial dans le choix d'un liquide destiné à dissiper la chaleur. Il est défini comme la température la plus basse à laquelle le fluide continue de s'écouler lorsqu'il est refroidi sans agitation, dans des conditions normalisées. La solidification du liquide est influencée par des facteurs tels que la masse moléculaire, la composition chimique et le mélange de différentes molécules .[ 15]

La connaissance de cette caractéristique est essentielle pour l'utilisation de transformateurs dans des environnements froids.

Les liquides isolants utilisés dans le domaine de l'électrotechnique ont tendance à se solidifier à des températures variant généralement entre  $-60^\circ\text{C}$  et  $-30^\circ\text{C}$  .[17]

### **5.1.4 Capacité et conductivité thermique**

La capacité thermique augmente avec la température et diminue avec la masse volumique. Pour les huiles minérales, elle se situe généralement entre 1000 et 2300  $J.kg^{-1}.K^{-1}$  à 20°C .[18]

La conductivité thermique, quant à elle, est inversement proportionnelle à la masse volumique et diminue avec la température. Elle est généralement comprise entre 0,11 et 0,16  $W.m^{-1}.K^{-1}$ . [19]

Ces paramètres revêtent une grande importance car ils déterminent la capacité de l'huile à évacuer la chaleur. Toute variation anormale de ces valeurs peut entraîner des élévations de température pouvant altérer les propriétés électriques ou mécaniques des matériaux isolants du transformateur.

## **5.2 Les propriétés électriques**

### **5.2.1 Permittivité**

La permittivité est la constante macroscopique fondamentale qui caractérise un diélectrique.

Elle est définie par la relation (Eq II.3 ) suivante :

$$\epsilon = \epsilon_0 * \epsilon_r, \quad (\text{EqII.3})$$

où

- $\epsilon$  est la permittivité absolue de l'huile (F/m),
- $\epsilon_0$  est la permittivité du vide ( 8,85 pF/m.),
- $\epsilon_r$  est la permittivité relative de l'huile (sans unité).

$\epsilon_r$  est aussi appelée constante diélectrique, et est définie par le rapport entre la capacité d'un condensateur rempli d'huile ( $C_p$ ) et la capacité du même condensateur vide ( $C_0$ ) comme montre l'Eq II.4 .

$$\epsilon_r = C_p / C_0 \quad (\text{EqII.4})$$

En pratique, la permittivité (  $\epsilon_r$ ) est déterminée en comparant un condensateur immergé dans l'huile à un condensateur similaire placé dans l'air. Cette valeur sert de référence pour définir la permittivité d'une huile.

La permittivité est une caractéristique intrinsèque qui dépend principalement de la structure chimique du fluide et qui caractérise la polarité de ses molécules. Ainsi, on peut distinguer les liquides polaires (avec (  $\epsilon_r$  ) > 2,5) des liquides peu polaires ou non polaires (avec ( 1,5 <  $\epsilon_r$  , 2,5 )), comme c'est le cas pour l'huile minérale. [ 21]

La permittivité diminue avec l'augmentation de la température et de la fréquence. La contrainte électrique la plus élevée est toujours supportée par le milieu ayant la permittivité la plus faible. Généralement, pour les liquides isolants utilisés dans les applications industrielles, notamment les huiles diélectriques, la constante diélectrique est comprise entre 2 et 5.

## 5.2.2 Conductivité / Résistivité

Afin d'être un bon isolant électrique, un liquide doit minimiser la conduction du courant électrique sous l'application d'une tension. Par conséquent, sa conductivité électrique  $\sigma$  doit être aussi basse que possible, ou inversement, sa résistivité  $\rho$  (exprimée en ohm.m) doit être aussi élevée que possible ( $\rho = 1/\sigma$ ) (Eq II.5)

La conductivité d'un liquide isolant est attribuable à la présence de charges libres. Sous l'influence d'un champ électrique, ces charges se déplacent, induisant ainsi un courant de conduction. Contrairement à la permittivité, qui est essentiellement une caractéristique intrinsèque de la composition de l'huile, la résistivité dépend fortement des conditions environnementales. Ainsi, la présence de substances étrangères considérées comme des impuretés (telles que poussières, particules, gaz, humidité), même en quantités minimales telles que quelques parties par million (ppm), influence significativement les valeurs mesurées de résistivité.

À mesure que la température augmente, la viscosité du liquide diminue, ce qui accroît la mobilité des ions [21] et donc la conductivité électrique. En outre, la dissociation des impuretés solubles en ions est plus prononcée à des températures élevées. Par conséquent, la résistivité d'un liquide diminue avec l'augmentation de la température. Comme montre la figure .

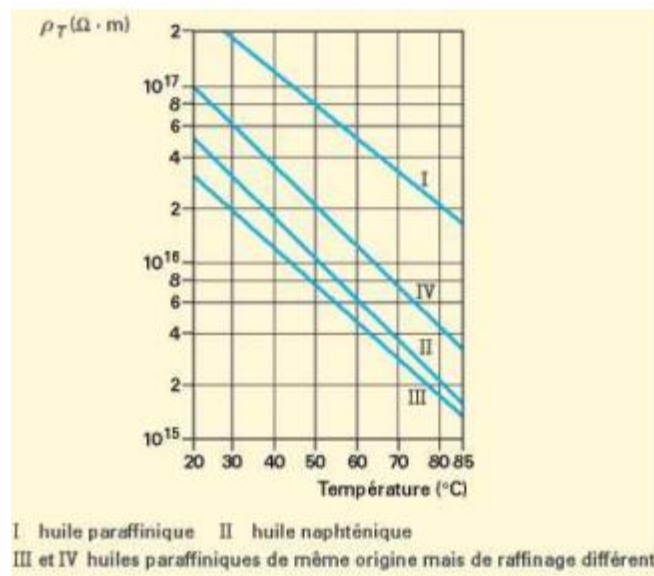


Figure 14 : variation de la résistivité de différentes huiles minérales ( courant continu )[22]

### 5.2.3 Facteur de dissipation

Le facteur de dissipation, également appelé facteur de pertes ( $\tan\delta$ ), est une grandeur adimensionnelle qui est directement liée à la résistivité et à la permittivité sous tension alternative. La représentation de ces pertes par un schéma équivalent, comprenant un condensateur ( $C$ ) et une résistance en parallèle ( $R$ ), permet d'établir la relation EqII.6 : [15]

$$\tan \delta = 1/R.C \quad (\text{EqII.6})$$

Dans des conditions idéales, c'est-à-dire pour un isolant parfait ( $\sigma = 0$ ), la différence de phase ( $\theta$ ) entre la tension appliquée et le courant résultant est de ( $\pi/2$ )

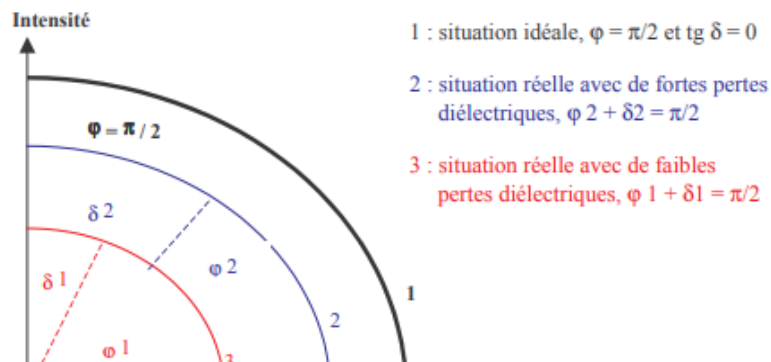


Figure 15 : Représentation schématique de l'angle de perte ( $\tan \delta$ )



### **5.2.4 Rigidité diélectrique et tension de claquage**

La rigidité diélectrique moyenne  $E_c$ , d'une huile est la valeur maximale du champ électrique qu'on peut lui appliquer sans décharge, entre deux électrodes. Elle est donnée par la relation suivante ( EqII.7) :

$$E_c = U_c / e \quad (\text{EqII.7})$$

Ou

- $E_c$  est la rigidité en kV/mm,
- $U_c$  est la tension de claquage en kV,
- $e$  est la distance entre les deux électrodes en mm.

Dans l'industrie, la tension de claquage d'un matériau est souvent utilisée pour évaluer sa résistance diélectrique. Elle représente le stade ultime d'une série de processus irréversibles conduisant à l'apparition soudaine d'un arc électrique qui traverse l'isolant. En général, les solides présentent une tension de claquage plus élevée que les liquides, et les liquides ont une tension de claquage supérieure à celle des gaz. C'est pourquoi on cherche à éviter la présence de gaz, et le liquide, tel que celui utilisé dans les transformateurs, est souvent considéré comme le maillon faible des isolants imprégnés. Par exemple, à une fréquence de 50 Hz et à pression atmosphérique, la tension de claquage entre des électrodes sphériques de 12,5 mm de diamètre et espacées de 2,5 mm est d'environ 6 kV pour l'air, de 50 à 100 kV pour les huiles diélectriques, et supérieure à 200 kV pour les solides .[ 23]

Dans les liquides, le phénomène de claquage est engendré par l'initiation et la propagation d'un streamer, qui est un canal gazeux ionisé générant une décharge lumineuse, entre deux électrodes . Le déclenchement de ce processus, en plus des caractéristiques intrinsèques du liquide, dépend de diverses conditions de mesure , telles que la nature, l'état de surface et la géométrie des électrodes (rayon, espacement), la durée d'application et la forme de la tension (fréquence), ainsi que la température et la pression. De plus, la présence d'impuretés telles que l'eau, les particules solides ou les bulles de gaz (ce qui explique pourquoi les huiles sont systématiquement traitées avant leur utilisation) influe sur ce phénomène.

Lorsqu'on mesure à plusieurs reprises la tension de claquage d'une huile, en maintenant les autres paramètres constants, on observe une variation des valeurs d'un essai à l'autre. Cette dispersion est principalement due à la présence d'impuretés, dont le contrôle total est difficile à atteindre. Cette dimension statistique conduit à l'utilisation des transformateurs avec des contraintes électriques toujours bien en deçà de leur rigidité diélectrique moyenne, afin d'assurer un niveau de sécurité élevé.

### 5.2.4.1 La géométrie des électrodes

Les cellules utilisées à des fins d'essais industriels (souvent effectués sous tension alternative à 50 Hz) et celles conçues pour des recherches fondamentales présentent de nombreuses similitudes dans leur conception et leur mise en œuvre, comme illustré dans la figure sont généralement simples à réaliser et sont spécialement conçues pour des mesures rapides et systématiques des tensions de claquage. Elles ont une configuration fixe avec une distance prédéterminée entre les électrodes, allant de quelques millimètres à quelques centimètres. Ces essais sont généralement réalisés à température ambiante et à pression atmosphérique, et les profils d'électrodes ainsi que leur espacement sont standardisés selon les normes. Cette configuration d'électrodes permet de créer un champ électrique uniforme ou quasi-uniforme.

La figure suivante montre quelques configuration d'électrodes .



Figure 16 : Configuration d'électrodes[ 24 ]

### 5.2.4.2 Influence de température :

Des études ont démontré que, à une teneur en eau constante, la tension de claquage connaît une augmentation en fonction de la température [ 25][ 26]

Ce phénomène est directement lié à la solubilité de l'eau dans l'huile ( Figure 19) , une caractéristique qui croît avec la température. Cependant, il convient de noter que cet effet est interrompu lorsque la teneur en eau dans l'huile atteint un niveau trop élevé (200 ppm).

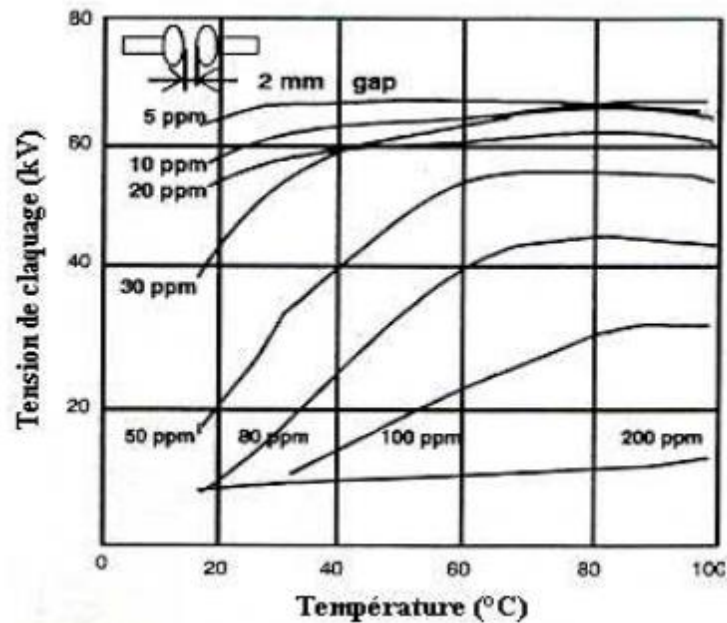


Figure 17 : Influence de température sur la tension de claquage[ 26]

### 5.2.4.3 Influence de pression

Il convient de souligner que l'effet de la pression n'est pas à négliger. En effet, NIKURADSE [28] a observé une augmentation de la rigidité diélectrique avec une augmentation de la pression. De même, BEROUAL [ 27]a démontré que l'augmentation de la pression restreignait la propagation des streamers.

### 5.2.4.4 Influence d'Humidité

L'humidité représente un facteur défavorable pour la qualité de l'isolation électrique, avec une influence significative sur la tension de claquage des isolants liquides [25, 26]. Comme le montre la figure 20 , une augmentation de la teneur en eau est associée à une diminution de la tension de claquage de l'huile.

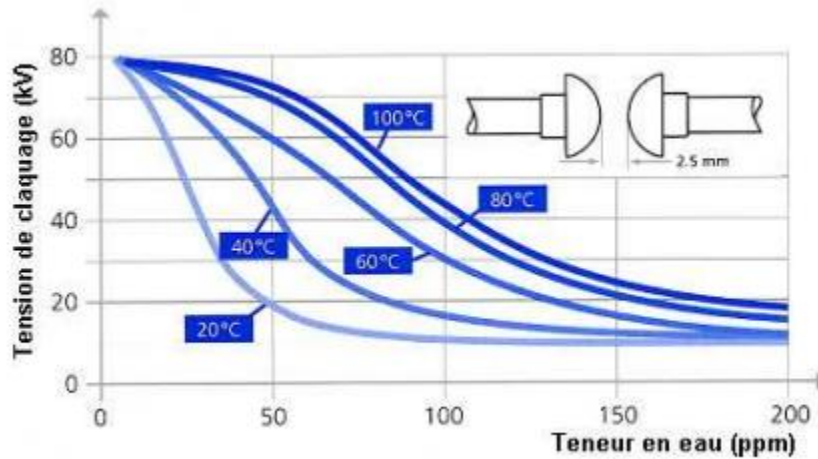


Figure 18 : Influence d'humidité sur la tension de claquage [ 25]

### 5.2.4.5 Impact de champ électrique sur la rigidité diélectrique

L'influence du champ électrique sur la tension de claquage est un aspect crucial dans l'étude des isolants électriques. En effet, la tension de claquage d'un matériau isolant diminue à mesure que le champ électrique auquel il est soumis augmente. Cette diminution peut être observée à travers différents phénomènes, tels que la polarisation des molécules du matériau sous l'effet du champ électrique, la création et la propagation de streamers ou d'autres décharges partielles, ainsi que la rupture diélectrique du matériau.

Plus précisément, lorsque le champ électrique dépasse un seuil critique, il peut provoquer la formation de zones d'ionisation dans le matériau isolant, conduisant à la création de conducteurs électriques temporaires ou à des arcs électriques. Ces phénomènes contribuent à une diminution de la tension de claquage effective du matériau, ce qui peut entraîner une défaillance de l'isolation électrique et des dommages aux équipements électriques.

En résumé, l'augmentation du champ électrique entraîne généralement une diminution de la tension de claquage des isolants électriques, ce qui souligne l'importance de maintenir les champs électriques à des niveaux sécuritaires pour assurer le bon fonctionnement des équipements électriques.

Et pour cela on va utiliser le logiciel de simulation COMSOL MULTIPHYSICS pour explorer l'impact du champ électrique sur la rigidité diélectrique de l'huile isolante .

COMSOL MULTIPHYSICS offre une plate-forme puissante pour modéliser et simuler le comportement électrique des matériaux isolants .

### 6. Conclusion

Les huiles jouent un rôle crucial dans l'élimination de l'air et d'autres gaz, améliorant ainsi la tenue diélectrique de l'isolation solide. De plus, elles contribuent à l'évacuation de la chaleur, assurant ainsi le bon fonctionnement et la durabilité des équipements électriques.

Cependant, il est important de reconnaître que les huiles isolantes ne sont pas exemptes de limitations. Elles peuvent être sujettes à la contamination par des impuretés, ce qui peut affecter leurs performances électriques. De plus, des facteurs tels que l'humidité, le champ électrique, la température et d'autres paramètres peuvent influencer leur comportement et leur efficacité en tant qu'isolants.

La raison pour laquelle le chapitre trois est consacré à l'influence du champ électrique sur la rigidité diélectrique sur l'huile isolantes.

**Chapitre III : La  
modélisation  
numérique de cellule  
de claquage ( Impact  
du champ )**

## **Chapitre III : La modélisation numérique de cellule de claquage ( Impact du champ )**

### **1. Introduction**

Dans le domaine de l'ingénierie, la simulation numérique est devenue une pratique essentielle pour comprendre et optimiser le comportement des matériaux isolants, tels que les huiles isolantes, dans diverses conditions de fonctionnement. Parmi les outils de simulation les plus avancés et polyvalents se trouve le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS.

Grâce à COMSOL MULTIPHYSICS, les ingénieurs et les chercheurs peuvent créer des modèles numériques des systèmes électriques, en tenant compte des propriétés spécifiques des huiles isolantes, telles que leur permittivité, leur conductivité, leur viscosité et leur réponse aux champs électriques. Ces modèles permettent d'analyser en profondeur le comportement des huiles isolantes dans des conditions de fonctionnement.

Dans ce chapitre la cellule de claquage est simulé à l'aide du logiciel COMSOL pour étudier l'impact de champ électrique sur la tenson de claquage ( la rigidité diélectrique ).

### **2. Définition**

Ce logiciel permet de modéliser une multitude de phénomènes physiques et d'applications en ingénierie, en mettant particulièrement l'accent sur les simulations couplées et multiphysiques. COMSOL fournit des solveurs puissants et une grande flexibilité dans le domaine de la physique appliquée [ 29 ].

COMSOL est un programme polyvalent en terme de :

1- Multiphysiques, c'est-à-dire: touchant plusieurs domaines d'utilisation tels que :

Médecine, électromagnétisme, mécanique des structures, électronique. . . etc.

2- Multiplateforme, c'est-à-dire : compatible avec plusieurs systèmes d'exploitation (mac.

L,Unix. . .) . [ 29 ]

### **3. L'organisation**

Le Bureau COMSOL ( Figure 21) simplifie l'organisation de votre simulation en offrant une vue claire de votre modèle à tout moment. Il privilégie la fonctionnalité, la structure et l'esthétique pour simplifier la modélisation des réalités complexes. Par exemple, des outils spécifiques à la tâche apparaissent automatiquement sur le bureau à droite lorsque vous en avez besoin, ce qui vous montre uniquement ce qui est actuellement pertinent, éliminant ainsi l'incertitude lors de la construction de modèles et apportant de l'ordre à vos simulations. Le bureau est composé de plusieurs fenêtres, qui peuvent être affichées ou masquées selon vos besoins. Ces fenêtres incluent le constructeur de modèle, les paramètres, les graphiques, les messages, la progression, l'aide, et d'autres encore.

La Figure 21 montre l'interface de logiciel .



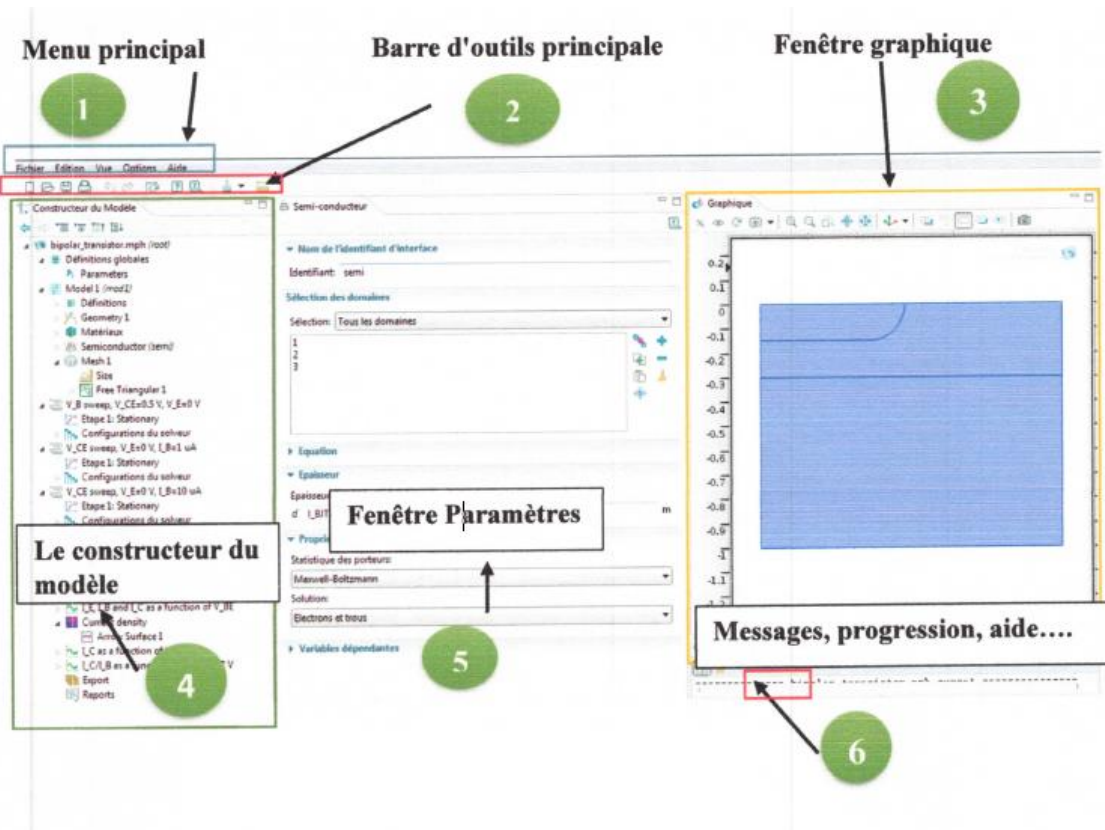


Figure 19 : Fenêtres principales de logiciel

## 4. Initiation au logiciel

### 4.1 Prise en main de logiciel

Nous commençons par créer la géométrie du modèle à concevoir. Ensuite, une fois que le modèle est dessiné, nous ajoutons les caractéristiques de la matière à chaque forme. Les conditions aux limites et les paramètres du modèle sont également ajoutés.

Cela inclut :

- Définir globalement les paramètres et les variables liées au modèle.
- Définir sa géométrie.
- Tenir compte des différents phénomènes physiques qui peuvent exister dans le problème considéré.
- Résoudre le problème à l'aide de différents solveurs disponibles.
- Visualiser les résultats.

### 4.2 Processus de résolution dans COMSOL Multiphysics

En ouvrant COMSOL, l'assistant de Modélisation permet de configurer toutes les étapes de modélisation mentionnées précédemment de manière concise. Ces étapes incluent :

- 1- L'utilisation de l'Assistant Modèle implique de sélectionner le système de coordonnées du modèle(Figure 22), la physique appropriée au problème et le type d'étude à effectuer (stationnaire ou transitoire). Nous débuterons en choisissant le modèle, en lançant le module électrostatique (ES) dans le navigateur de modèle .( Figure 24) , et après on choisi une étude à 2 dimensions ( Figure 23) .

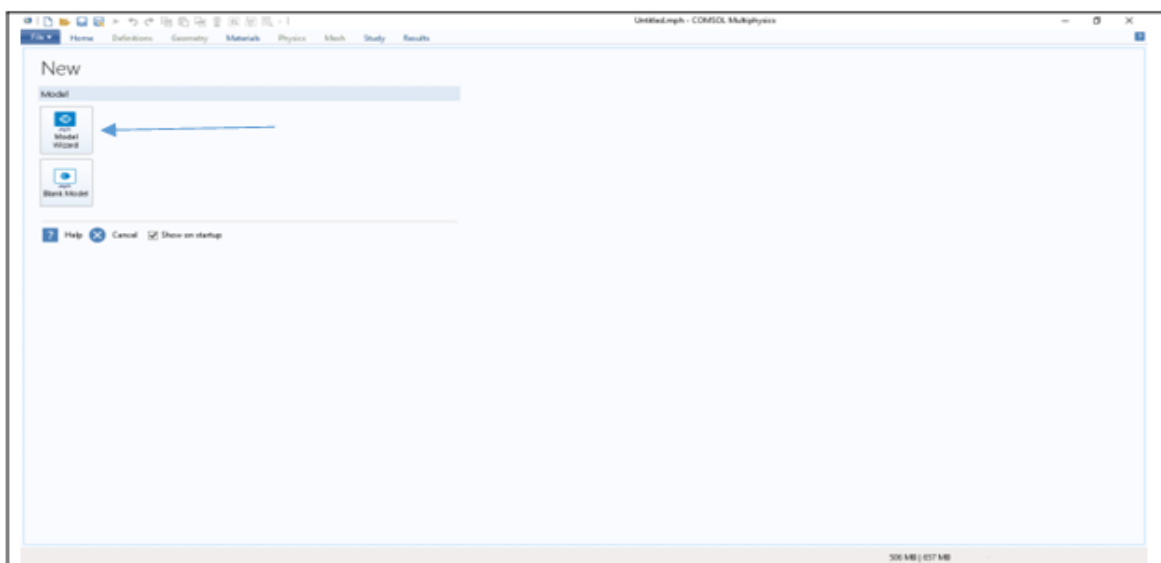


Figure 20 : Choix de modèle

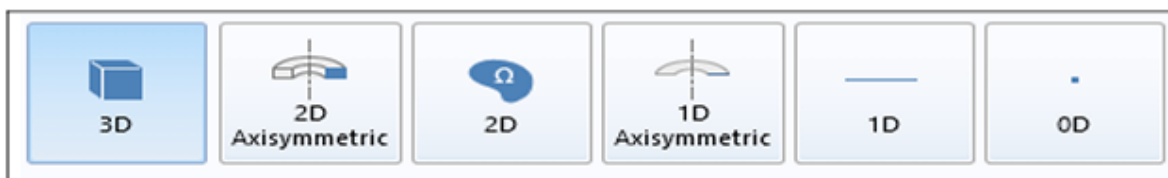


Figure 21 : Choix de dimension d'étude

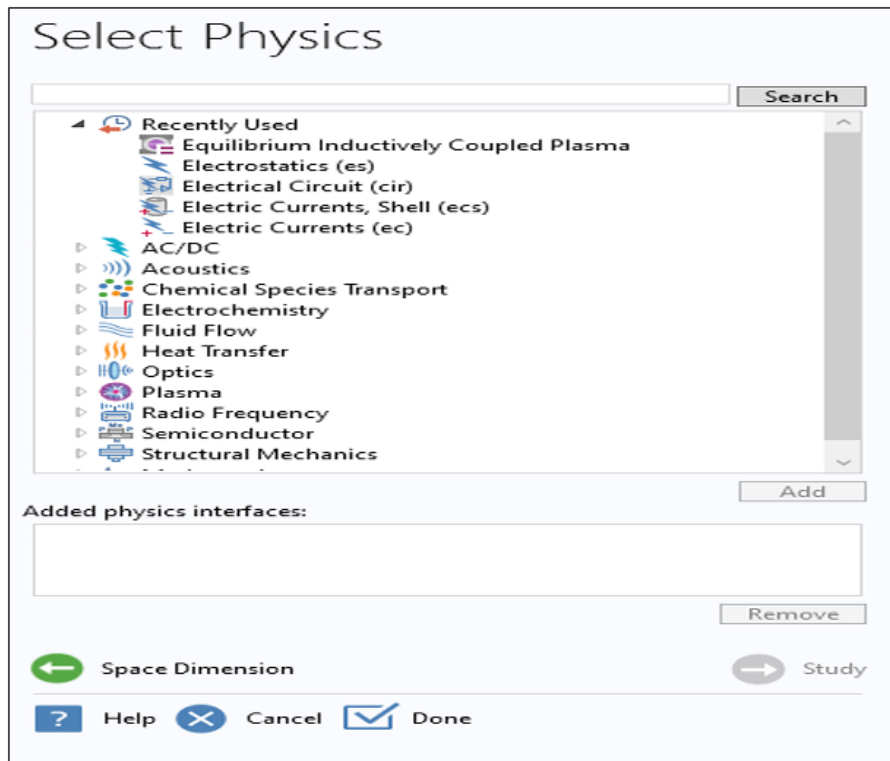


Figure 22 : Choix de type de physique

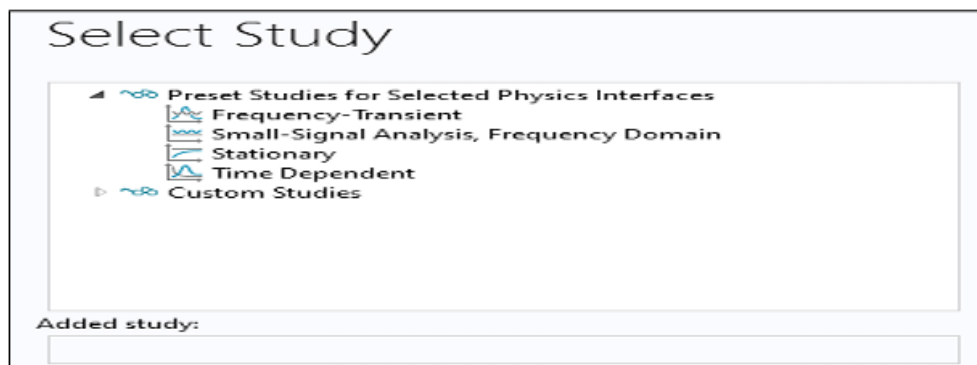
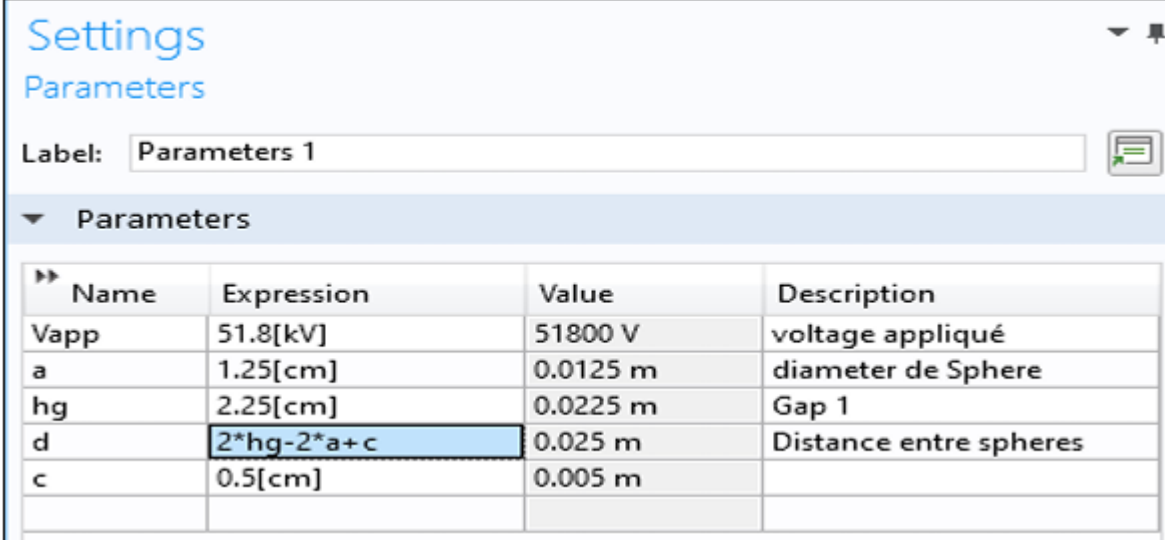


Figure 23 : Choix de d'études (stationnaire ou en fonction du temps)

## Chapitre III :La modélisation numérique de cellule de claquage (Impact du champ)

- 2- Déterminez les paramètres, équations et variables appropriés pour le modèle (dans le répertoire des Définitions Globales). L'objectif est de spécifier les paramètres physiques définissant le domaine, tels que la constante diélectrique, la distance, la conductivité, etc. Ces paramètres sont directement liés au modèle physique sous étude ( Figure 26 )



| Name | Expression   | Value    | Description            |
|------|--------------|----------|------------------------|
| Vapp | 51.8[kV]     | 51800 V  | voltage appliqué       |
| a    | 1.25[cm]     | 0.0125 m | diameter de Sphere     |
| hg   | 2.25[cm]     | 0.0225 m | Gap 1                  |
| d    | $2*hg-2*a+c$ | 0.025 m  | Distance entre spheres |
| c    | 0.5[cm]      | 0.005 m  |                        |

Figure 24 : Attribution des paramètres globaux

- 3- Esquisser la géométrie du modèle (Geometry). La première étape après avoir ouvert le programme est de créer la représentation géométrique de notre système (dans ce cas, une cellule de claquage).
- 4- Sélectionner le ou les matériaux appropriés du modèle depuis le répertoire (Materials).
- 5- Définir les conditions initiales et aux limites de votre modèle pour chaque aspect physique utilisé.
- 6- Choisir la taille des éléments pour le maillage ainsi que les différents types de maillage disponibles.
- 7- Configurer les paramètres du solveur et démarrer les calculs dans le répertoire d'études (Study).
- 8- Mailler les domaines : Un maillage consiste en un ensemble de nœuds et d'éléments. Un nœud représente un point géométrique supportant une ou plusieurs inconnues, tandis qu'un élément est un ensemble de nœuds associés à un domaine géométriquement simple. La définition de chaque élément par les nœuds qui le

composent est soumise à des règles précises pour assurer sa validité (par exemple, en deux dimensions, le parcours des nœuds suit le sens trigonométrique direct).[ 33 ]

✚ Une explication simple de la méthode des éléments finis (MEF) pourrait être formulée comme suit : la structure à étudier est fragmentée en plusieurs éléments (semblables à des pièces de puzzle). Ces éléments sont ensuite reliés entre eux par des nœuds .Ces nœuds agissent comme des "punaises" ou des "points de colle" qui maintiennent les éléments ensemble en formant un tout cohérent.

9- Présenter de manière optimale les résultats désirés dans le répertoire de résultats (Result) afin de les rendre significatifs.

### **4.3 Résolution du problème**

Une fois que le problème est entièrement défini, il ne reste plus qu'à le résoudre. Il est alors possible d'accéder à des menus pour ajuster la résolution selon les besoins.

De même, lors de la résolution d'un problème impliquant plusieurs aspects physiques, il est possible de se concentrer uniquement sur une partie spécifique des variables.[ 34 ]

### **4.4 Analyse des résultats**

Une fois que le programme a convergé vers une solution, il passe automatiquement à la fenêtre de post-traitement, permettant d'analyser les résultats.

Ceux-ci peuvent être visualisés sous forme de remplissage de couleur, de lignes de courant, de champ de flèches, etc...

### **4.5 Capacités et performances de COMSOL Multiphysics**

Les possibilités offertes par Comsol Multiphysics sont vastes et dépendent du nombre d'applications qu'il peut résoudre grâce à son environnement complet dédié au calcul scientifique. Il permet le couplage et la résolution d'équations dans divers domaines tels que la mécanique des fluides, le transfert thermique, l'électromagnétisme, la dynamique des fluides, la chimie, les MEMS et la mécanique des structures.

En outre, il propose plusieurs solveurs de haute performance capables de traiter des problèmes avec des temps de résolution optimaux. Ces caractéristiques, entre autres, font de COMSOL un environnement de modélisation inégalé pour la conception industrielle, la recherche et développement, ainsi que pour l'enseignement.

Dans le cadre de cette étude, COMSOL a été utilisé pour modéliser et simuler numériquement une cellule de claquage afin d'analyser l'influence de divers paramètres tels que l'impact de champ électrique sur le claquage des huiles.

### **4.6 Avantages de conception avec COMSOL Multiphysics**

L'objectif principal de la création de COMSOL Multiphysics est de fournir aux scientifiques et aux ingénieurs un logiciel leur permettant de formuler, via une interface utilisateur conviviale, des systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP) basés sur les lois fondamentales de la physique, en se concentrant notamment sur les aspects les plus courants en physique et en ingénierie. Cette interface repose sur un interpréteur d'équations qui effectue une discrétisation par éléments finis de manière dynamique, en fonction du système entièrement couplé. Des interfaces de modélisation prédéfinies sont disponibles pour différents domaines de la physique appliquée, incluant des couplages multiphysiques.

Grâce à la technologie sous-jacente, les propriétés, les sources, les puits et les conditions aux limites peuvent être définies comme des fonctions des variables modélisées et de leurs dérivées partielles.

COMSOL Multiphysics a été sélectionné pour plusieurs raisons :

- Il est spécialisé dans la résolution de problèmes électromagnétiques.
- Il permet de prendre en compte la présence de plusieurs diélectriques.

- Il permet de modéliser des surfaces conductrices de faible épaisseur, telles que les couches de pollution.
- Il offre la possibilité de travailler en régime statique ou quasi-statique (50 Hz).
- Enfin, il permet une modélisation rapide des problèmes.[35 ]

### **5. Modélisation de cellule de claquage**

Dans le contexte de la simulation numérique, la modélisation est une étape cruciale qui précède l'exécution de la simulation elle-même. La modélisation consiste à définir les paramètres, les équations et les conditions initiales qui caractérisent le système ou le phénomène que l'on souhaite simuler.

L'objectif principale de cette simulation est savoir l'impact de champ électrique sur la tension de claquage ( tenue diélectrique ) d'une huile isolante , donc pour étudier l'impact de champ électrique , nous avons changer la formes des électrodes métalliques .

D'autres aspects sont prises en considération tels que : le matériau d'électrode , type de huile et la présence de carton .

#### **5.1 Procédures de simulation de cellule de claquage à l'aide de COMSOL Multiphysics**

La cellule d'essai est construite en PMMA (poly méthacrylate de méthyle) connu sous le nom de Plexiglas de forme cubique ( Figure 27 ) .



**Figure 25** : Cellule de claquage

- La simulation passe par les étapes suivantes :
- **Lancement de Logiciel** : en cliquant sur l'icône de logiciel ( Figure 28 )



**Figure 26** : Icône de logiciel

- **Sélection de la dimension d'espace**

Nous choisissons un dimension 2d pour notre étude comme montre la figure 29 .





Figure 27 : Choix de dimension

### - Choix de physique

Nous allons choisir la physique ( Figure 30 ) Electrostatique : **AC/DC** > **champs et courants électriques**> **électrostatique (es)**.

Et après on choisi Détection de claquage :**Plasma**> **Détection de claquage (ebd)**.

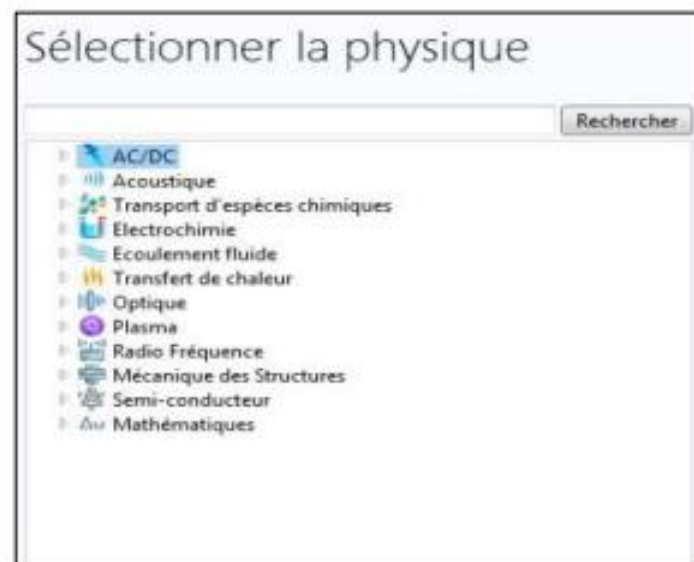
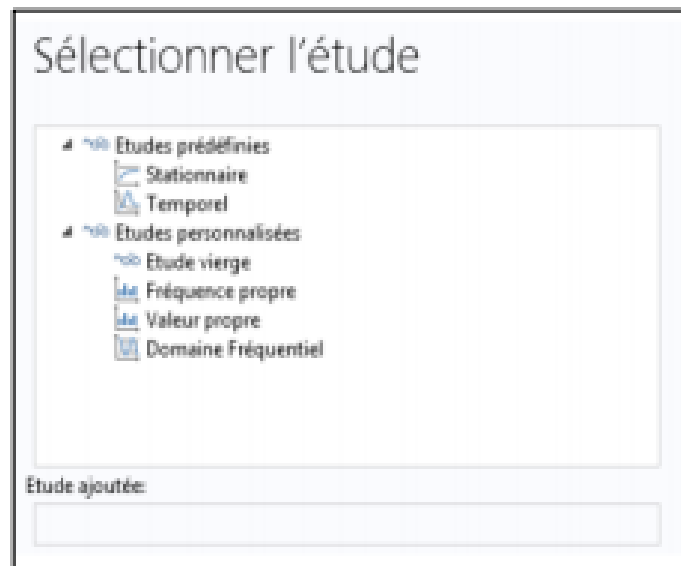


Figure 28 : Choix de Physique

## Chapitre III :La modélisation numérique de cellule de claquage (Impact du champ)

- **Sélection d'étude** : comme elle est montrée en figure 31 .

Dans ce cas on sélectionne l' étude : **Stationnaire** .



**Figure 29** : Choix de l'étude

## Chapitre III :La modélisation numérique de cellule de claquage (Impact du champ)

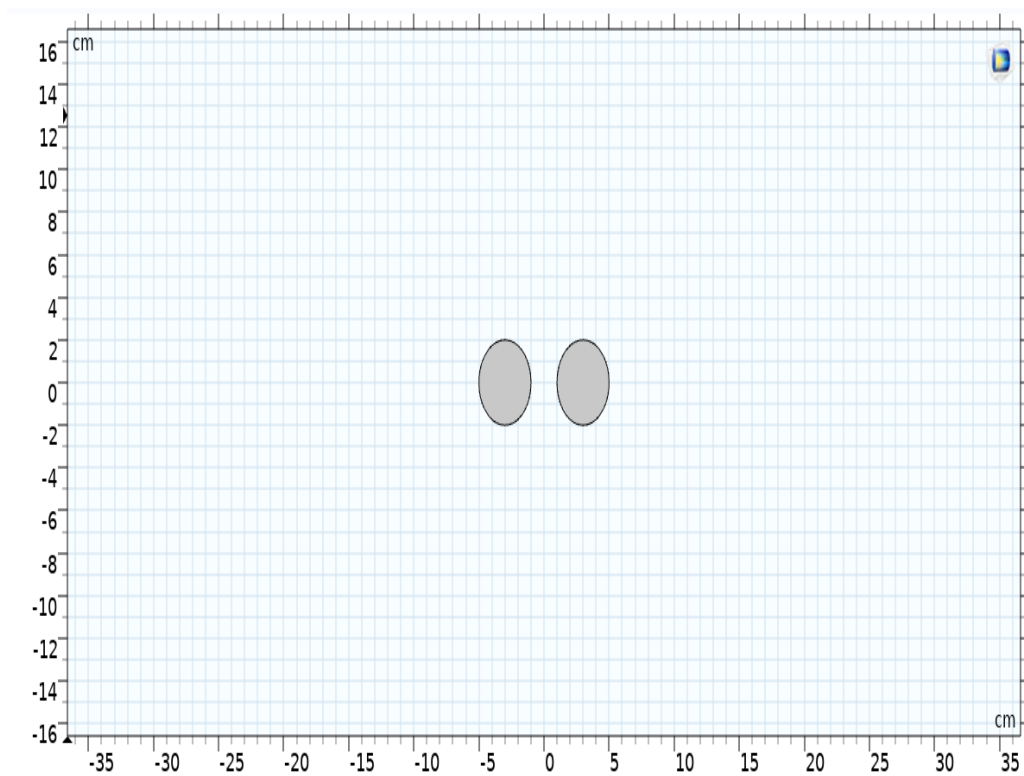
- **Définition de géométrie : en dessinant notre géométrie ( figure 32 )**

1) 1<sup>ère</sup> configuration : Sphérique .

✚ On crée une géométrie en Cm , on ajoute 2 cercles identiques avec les paramètres suivants :

Cercle 1 :- Rayon : 2cm                      - Cordonnées : (- 3,0)

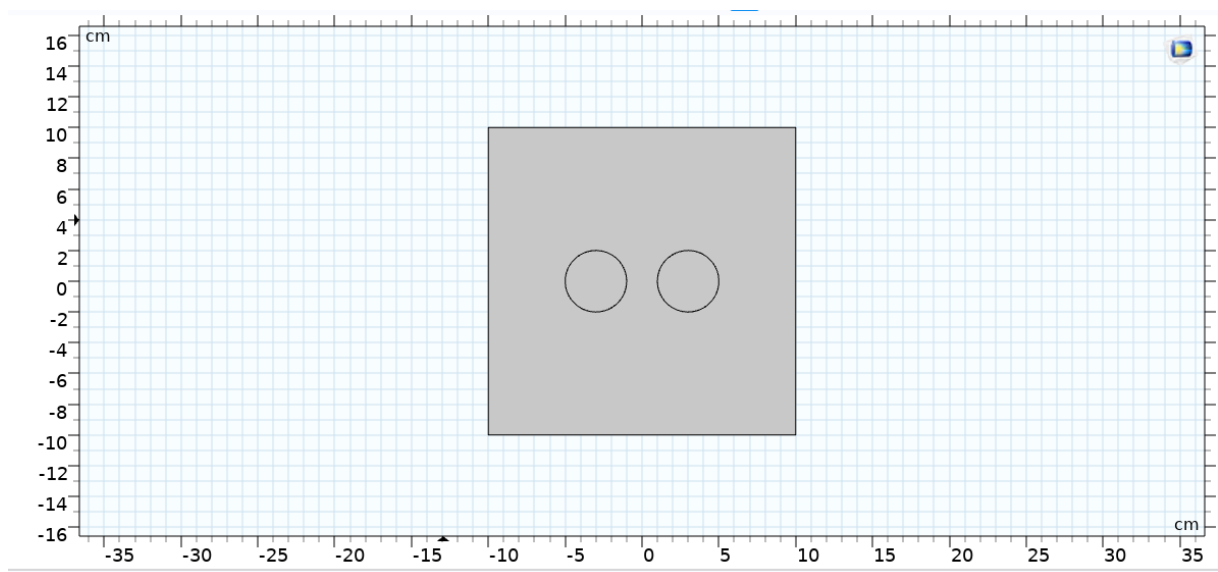
Cercle 2 :- Rayon : 2cm                      - Cordonnées : ( 3,0)



**Figure 30 :** Dessin de deux cercles

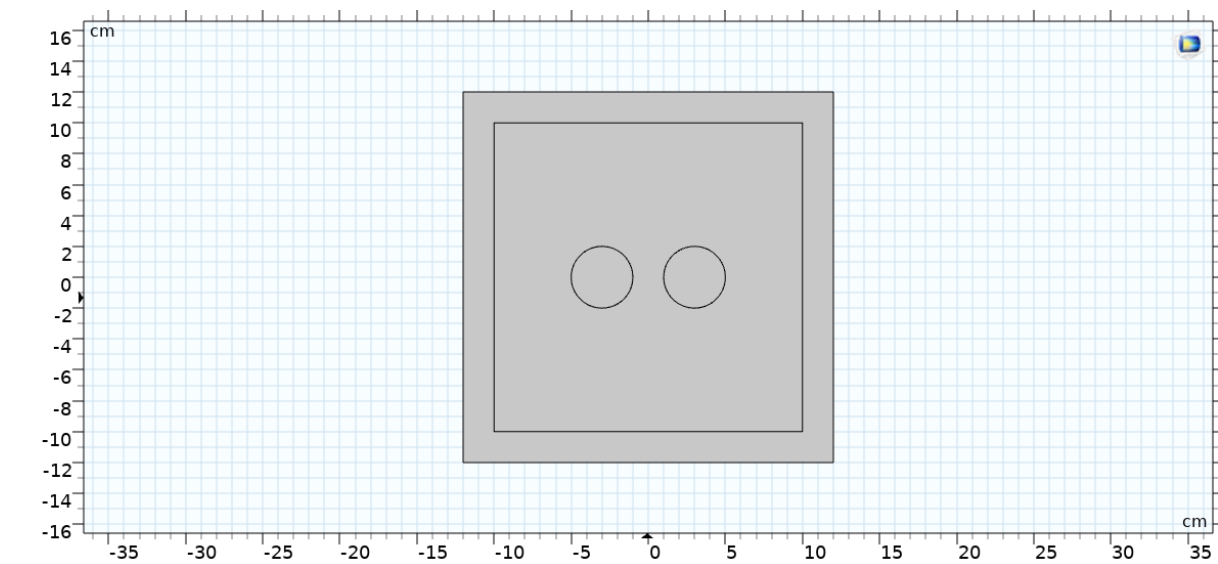
## Chapitre III :La modélisation numérique de cellule de claquage (Impact du champ)

On crée un bloc interne du forme carrée de longueur : 20cm ( Figure 33 )



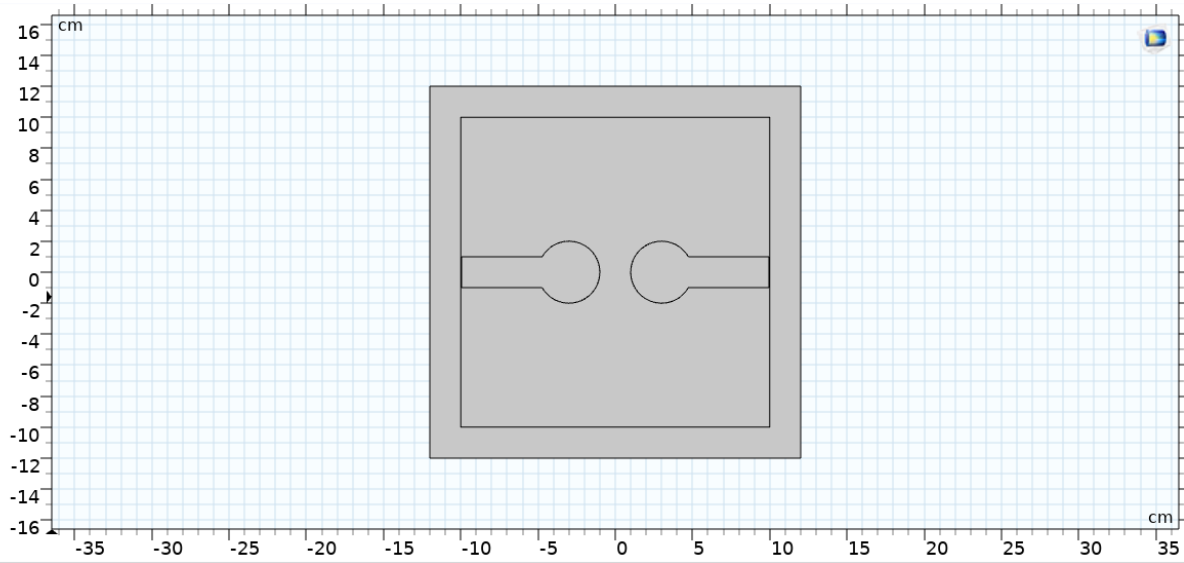
**Figure 31** : Bloc interne de cellule

On crée un bloc externe du forme carrée de longueur : 24cm ( Figure 34 )



**Figure 32** : Bloc externe de cellule

✚ On relie les électrodes avec l'extrémités de bloc interne .( Figure 35 )



**Figure 33 :** Forme finale de cellule avec électrodes sphériques

2) 2ème configuration : Elliptique .

✚ On crée une géométrie en Cm , on ajoute 2 ellipses identiques centrés avec les paramètres suivants :

Ellipse 1 : Demi axe A : 1cm

Demi axe B : 1.7cm

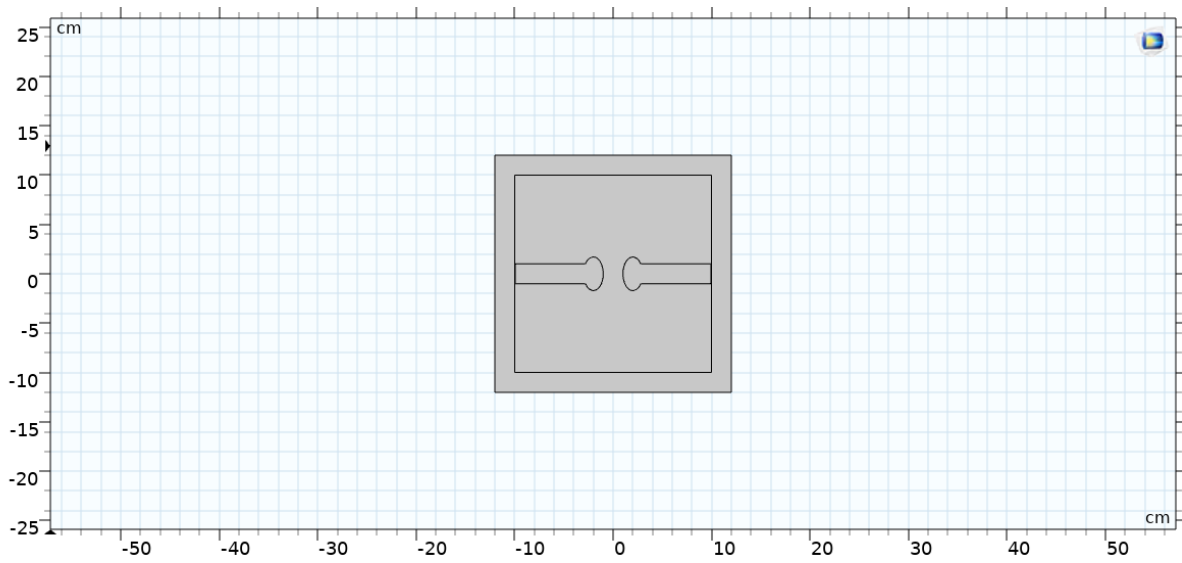
Cordonnées : ( -2,0)

Ellipse 2 : Demi axe A : 1cm

Demi axe B : 1.7cm

Cordonnées : ( 2,0)

✚ Ensuite : on continue avec les mêmes étapes précédentes pour dessiner le reste de cellule. ( Figure 36 )



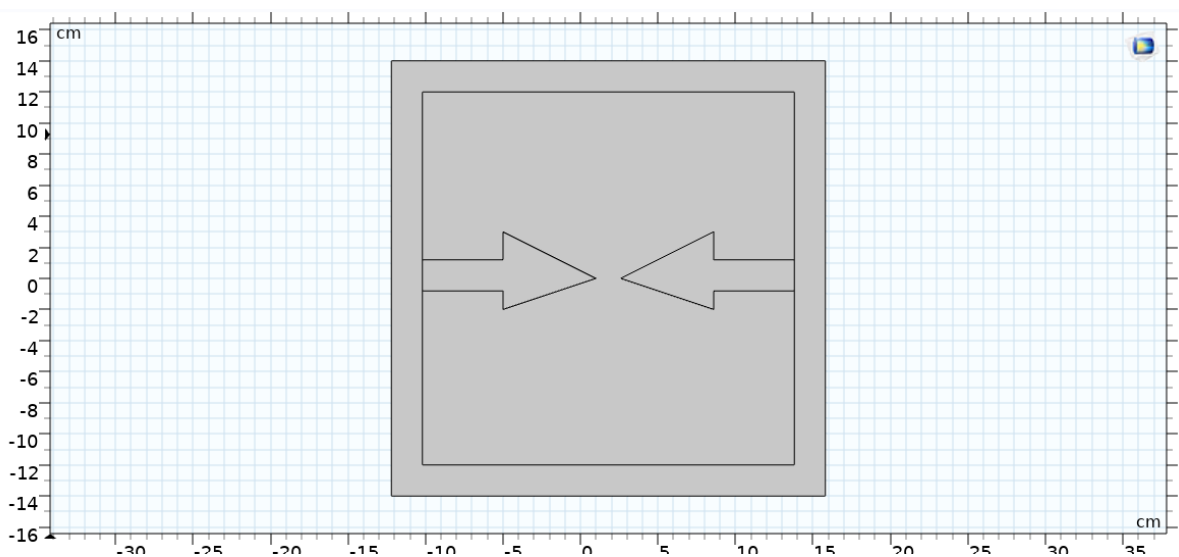
**Figure 34 :** Forme finale de cellule avec électrodes elliptiques

3) 3ème configuration : Pointu

On a créé 2 triangles en points avec des coordonnées précises :

$(-5, -2)$  ;  $(-5, 3)$  ,  $(1, 0)$

Ensuite : on continue avec les mêmes étapes précédentes pour dessiner le reste de cellule ( Figure 37 ) .



**Figure 35 :** Forme finale de cellule avec électrodes Pointus

## Chapitre III :La modélisation numérique de cellule de claquage (Impact du champ)

### - Choix de matériau :

On attribue les matériaux suivants :

- ✚ Pour les électrodes : Cuivre / Aluminium ( Dans la bibliothèque de logiciel )
- ✚ Pour le bloc externe : PMMA ( Dans la bibliothèque de logiciel )
- ✚ Pour le bloc interne : Huile minérale / Huile végétale ( Soja ) avec les paramètres suivants :

- L'huile minérale :La figure 39 montre les paramètres d'huile minérale (Biblio de Comsol )

| Propriété                               | Variable       | Valeur | Unité             | Groupe de propriétés |
|---|----------------|--------|-------------------|----------------------|
| Permittivité relative                   | epsilon_l...   | 2.2    | 1                 | Basique              |
| Masse volumique                         | rho            | 900    | kg/m <sup>3</sup> | Basique              |
| Viscosité dynamique                     | mu             | 0.085  | Pa·s              | Basique              |
| Capacité thermique à pression constante | Cp             | 1925   | J/(kg·K)          | Basique              |
| Conductivité thermique                  | k_iso ; kii... | 0.14   | W/(m·K)           | Basique              |
| Coefficient de dilatation thermique     | alpha_iso...   | 0.028  | 1/K               | Basique              |

**Figure 36 :** Paramètres de huile minérale ( Biblio de logiciel )

- L'huile végétale : La figure 38 montre les paramètres d'huile végétale (Biblio de Comsol )

| Propriété                               | Variable       | Valeur | Unité             | Groupe de propriétés |
|---|----------------|--------|-------------------|----------------------|
| Permittivité relative                   | epsilon_l...   | 2.83   | 1                 | Basique              |
| Masse volumique                         | rho            | 919    | kg/m <sup>3</sup> | Basique              |
| Viscosité dynamique                     | mu             | 0.057  | Pa·s              | Basique              |
| Capacité thermique à pression constante | Cp             | 1926   | J/(kg·K)          | Basique              |
| Conductivité thermique                  | k_iso ; kii... | 0.180  | W/(m·K)           | Basique              |
| Coefficient de dilatation thermique     | alpha_iso...   | 0.2710 | 1/K               | Basique              |

**Figure 37 :** Paramètres de huile végétale ( Biblio de logiciel )

## Chapitre III :La modélisation numérique de cellule de claquage (Impact du champ)

### - Electrostatique :

- On ajoute de potentiel électrique aux frontières 15-16 au valeur de 90Kv ( Figure 40)

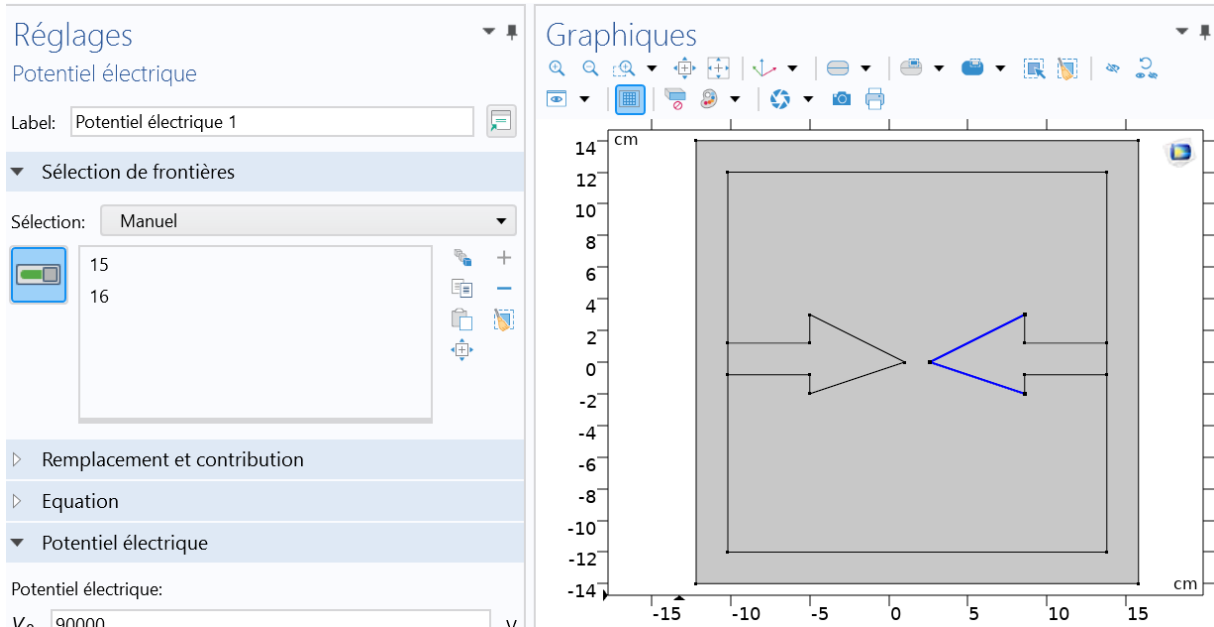


Figure 38 : Ajout de potentiel électrique

- On ajoute la Masse aux frontières 7 ;9 ;11 ;12 ;13 ( figure 41 )

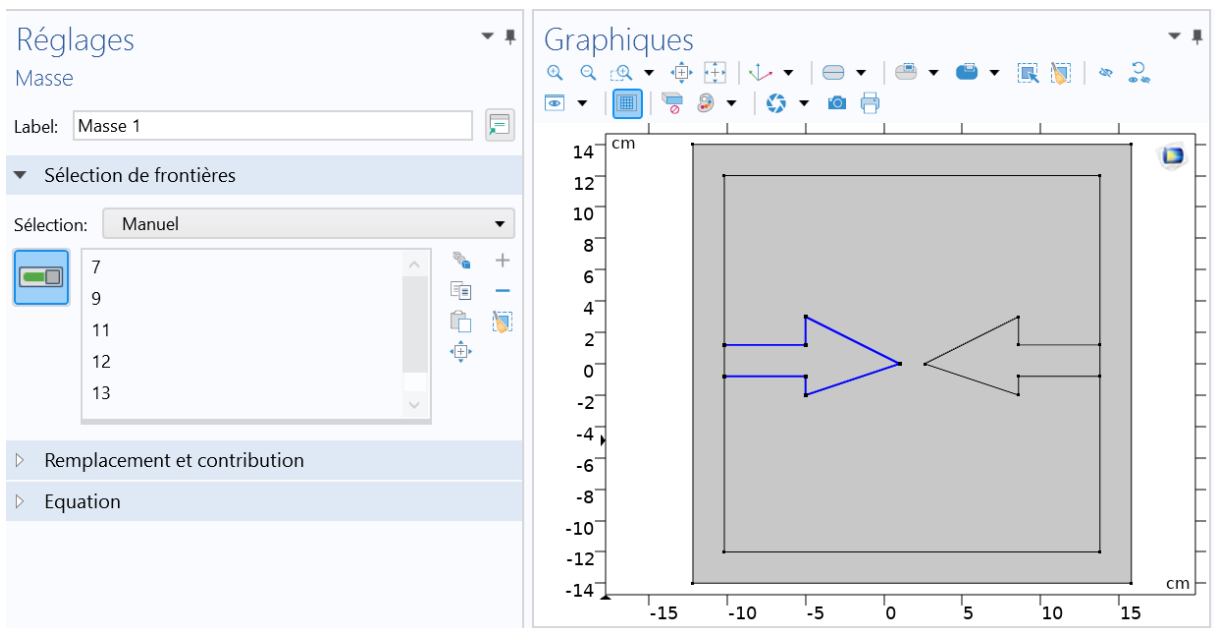
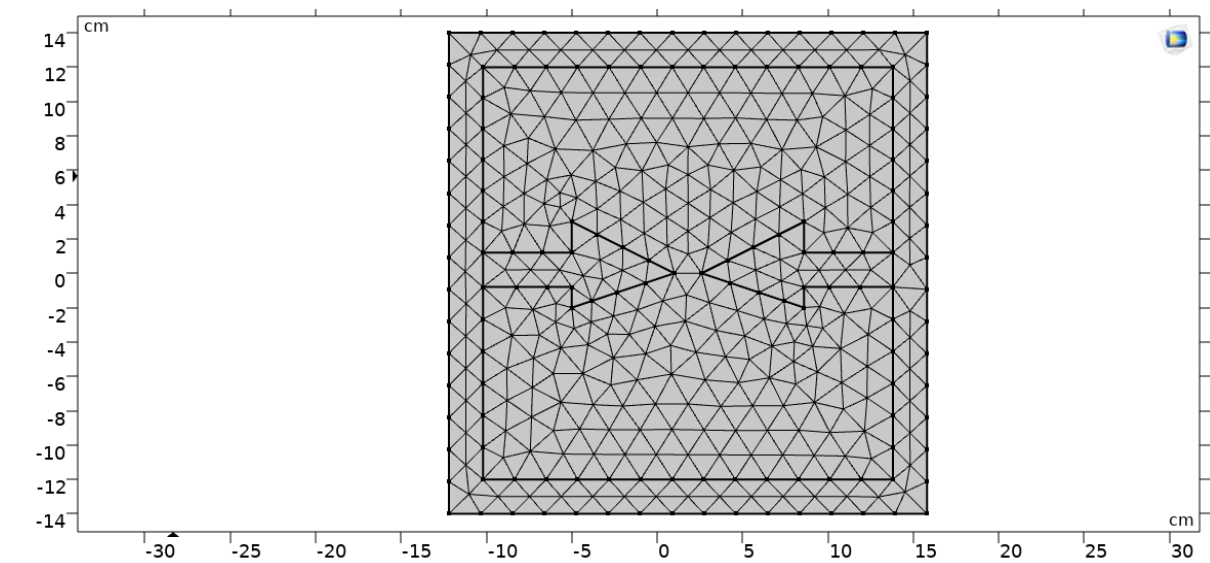


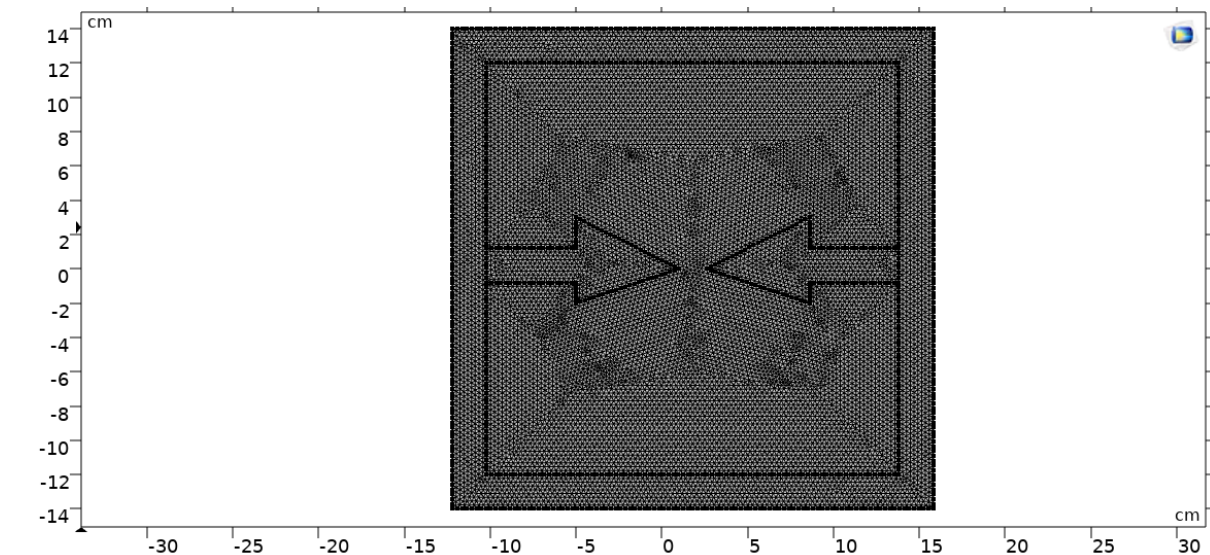
Figure 39 : Ajout de la mass





**Figure 40 : Le maillage**

On choisi le type de maillage : extrêmement fin ( Figure 43 )



**Figure 41 : Maillage extrêmement fin**

### - Lancement de simulation

Ensuite on lance la simulation on appuyant sur le bouton Calcule .

## 6. Résultats et discussions

### 6.1 Impact de la géométrie des électrodes

#### 6.1.1 Electrodes sphériques

Les figures 45 et 44 montrent simultanément la variation de la tension de claquage et le champ électrique d'une huile minérale dans le cas des électrodes sphériques en cuivre .

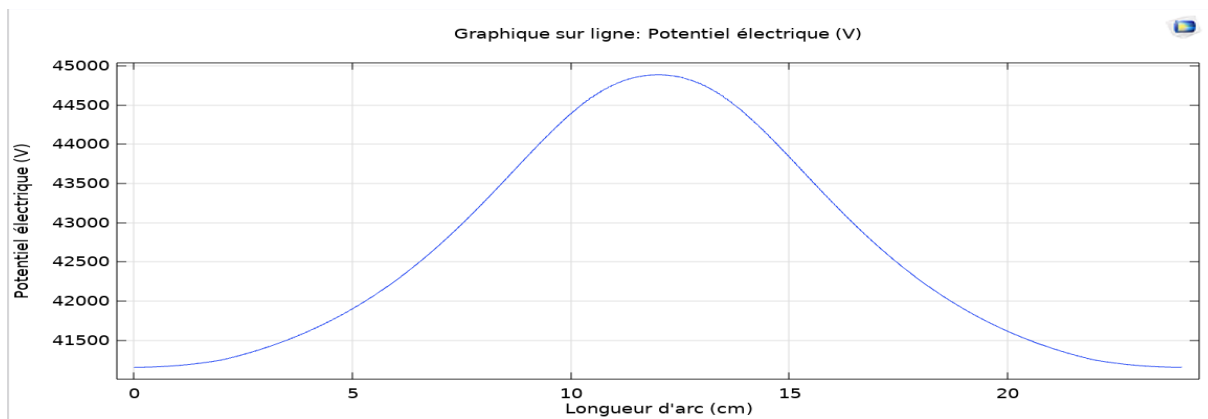


Figure 43 : Electrodes en cuivre de forme sphérique en huile minérale

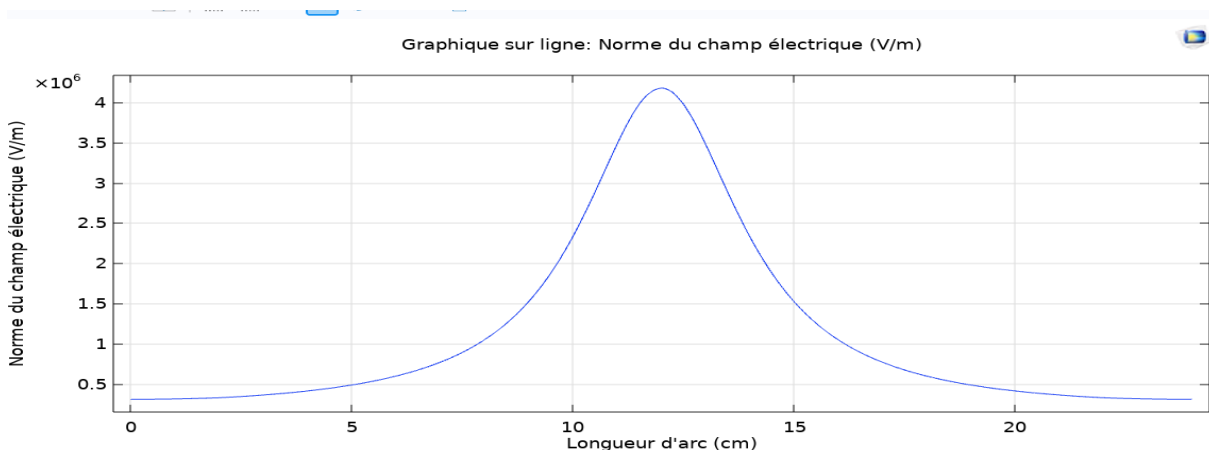
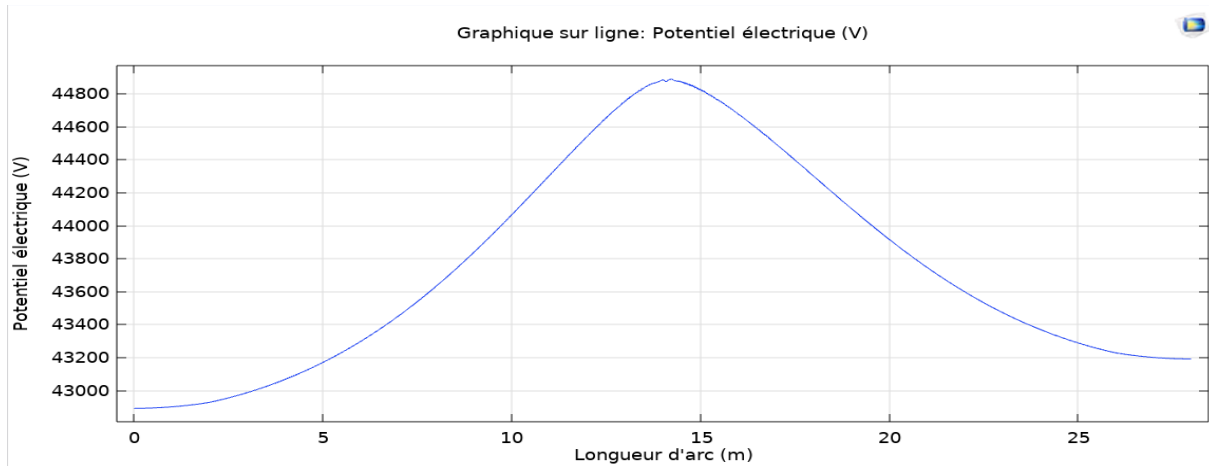


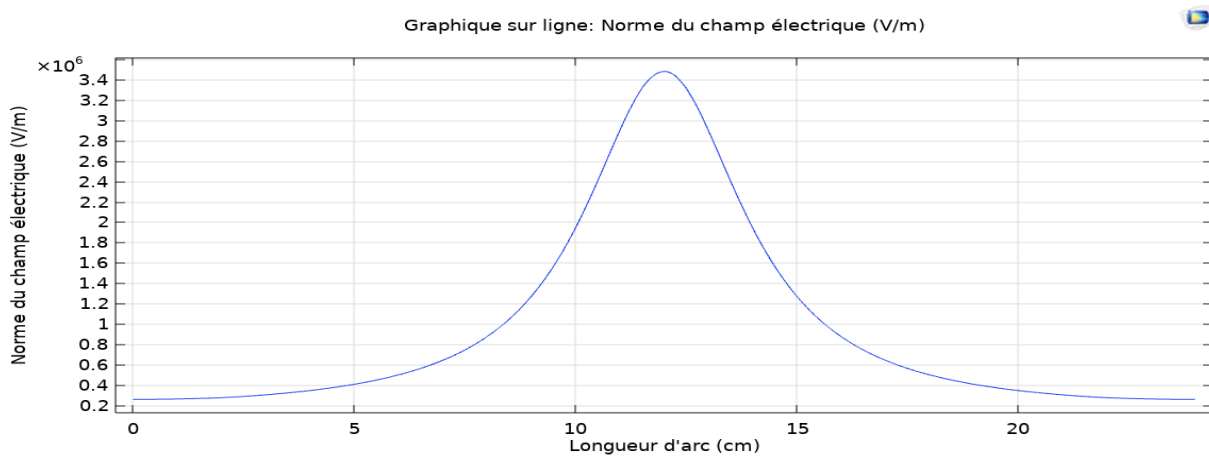
Figure 42 : Le champ électrique dans le cas de géométrie sphérique

↳ On constate que dans ce cas l'huile se claque à une valeur de potentiel électrique de 44900 V et à un champ électrique de valeur  $4.2 * 10^6$  V/M .

**6.1.2 Electrodes elliptiques :** Figure 46 et 47 montrent le cas des électrodes elliptiques.



**Figure 44 :** Electrodes en cuivre de forme Elliptique en huile minérale



**Figure 45 :** Le champ électrique dans le cas de géométrie Elliptique

↳ Il est observable que la valeur de tension de claquage de huile est à 44800 V et à un champ électrique de  $3.5 * 10^6$  V/M , donc la forme Elliptique est plus rigide .

### 6.1.3 Electrodes Pointus : Figure 48 et 49 montrent le cas des électrodes pointus .

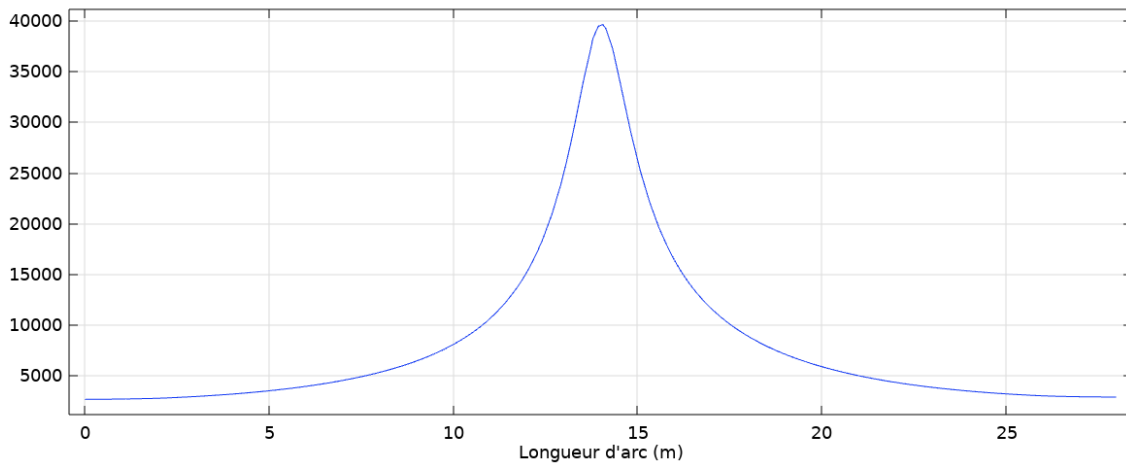


Figure 46 : Electrodes en cuivre de forme Pointus en huile minérale

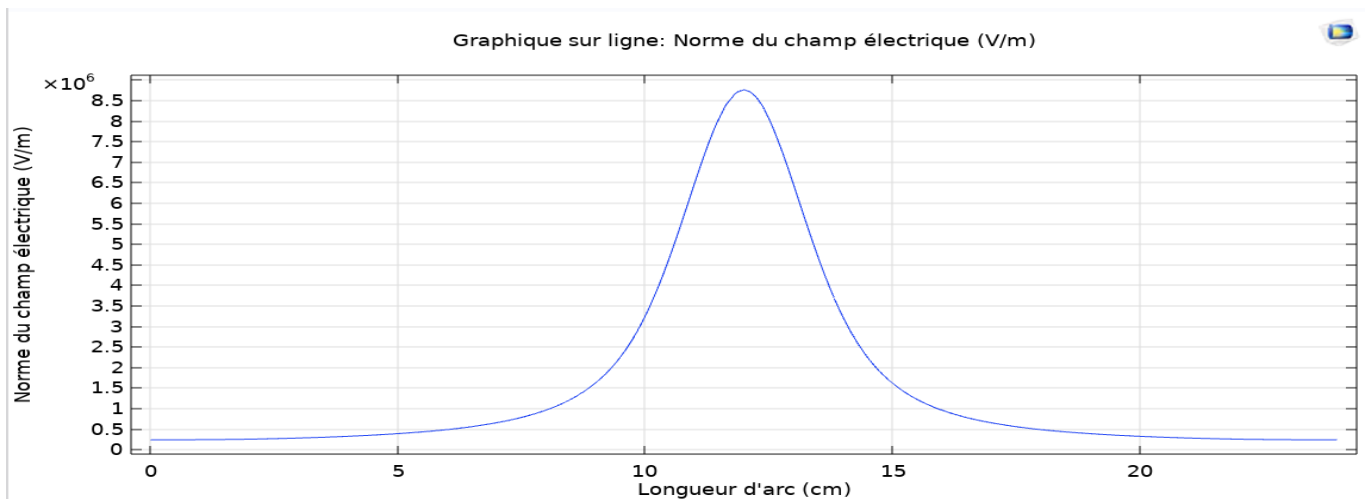


Figure 47 : Le champ électrique dans le cas de géométrie Pointue

↳ Il est évident que la forme pointue a une faible rigidité diélectrique ( tension de claquage : 40000 V et champ de :  $8.6 \times 10^6$  V/M ) en comparant avec les autres géométries .

### Chapitre III :La modélisation numérique de cellule de claquage (Impact du champ)

✚ La forme sphérique ( et elliptique ) et la forme pointue ont des impacts distincts sur la rigidité électrique d'une huile isolante. La forme sphérique, par sa géométrie régulière et ses courbes douces, tend à répartir les charges électriques de manière plus uniforme ( Figure 50 ) . Cela réduit les concentrations locales de champ électrique et diminue ainsi les risques de décharge électrique. En revanche, la forme pointue crée des zones de concentration de champ électrique élevé autour de son extrémité ( Figure 51 ), ce qui augmente le risque de rupture diélectrique.

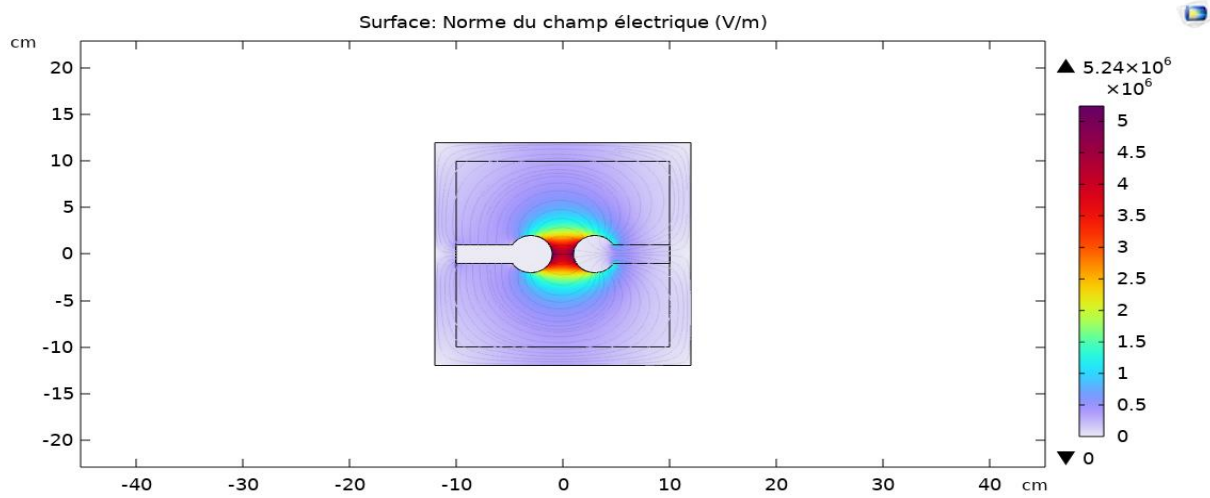


Figure 48 : Charge électrique entre les sphères

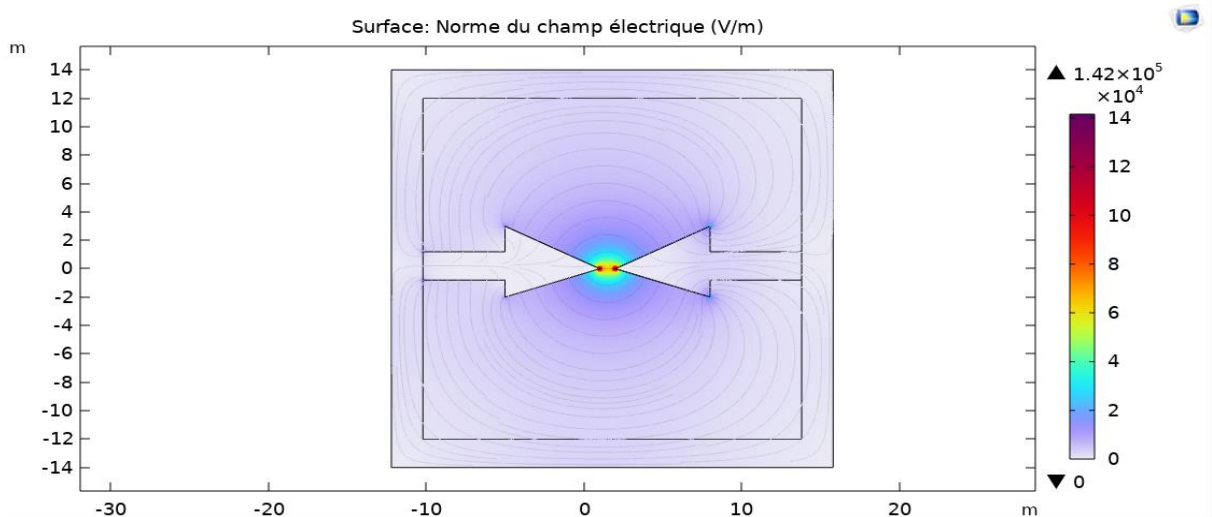


Figure 49 : Charge électrique entre les pointes

### **Chapitre III :La modélisation numérique de cellule de claquage (Impact du champ)**

---

**Champ électrique non uniforme:** Dans les géométries non uniformes, le champ électrique est plus intense dans certaines zones, ce qui crée des points de faiblesse où la claquage est plus susceptible de se produire .

- ✚ La géométrie de la configuration électrode-isolant joue un rôle important dans la détermination de la rigidité diélectrique de l'huile. En général, **plus la géométrie est non uniforme, plus la rigidité diélectrique est faible.**
- ✚ Par conséquent, les formes sphériques sont souvent préférées dans les applications où la rigidité électrique est cruciale, comme dans les transformateurs de puissance , car elles favorisent une isolation électrique plus fiable et stable comparé aux formes pointues.

### 6.2 Effet de qualité d'huile ( Minérale / Végétale )

#### 6.2.1 Huile minérale :

Les figures 52 et 53 montrent simultanément la variation de la tension de claquage et le champ électrique d'une huile minérale dans le cas des électrodes sphériques en cuivre .

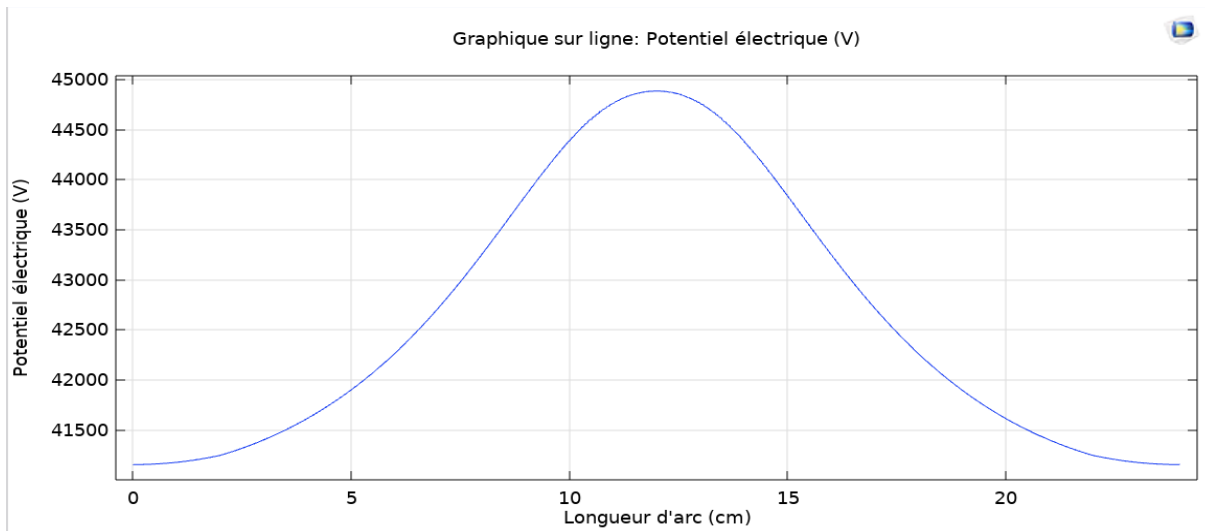


Figure 50 : Electrodes en cuivre de forme sphérique en huile minérale

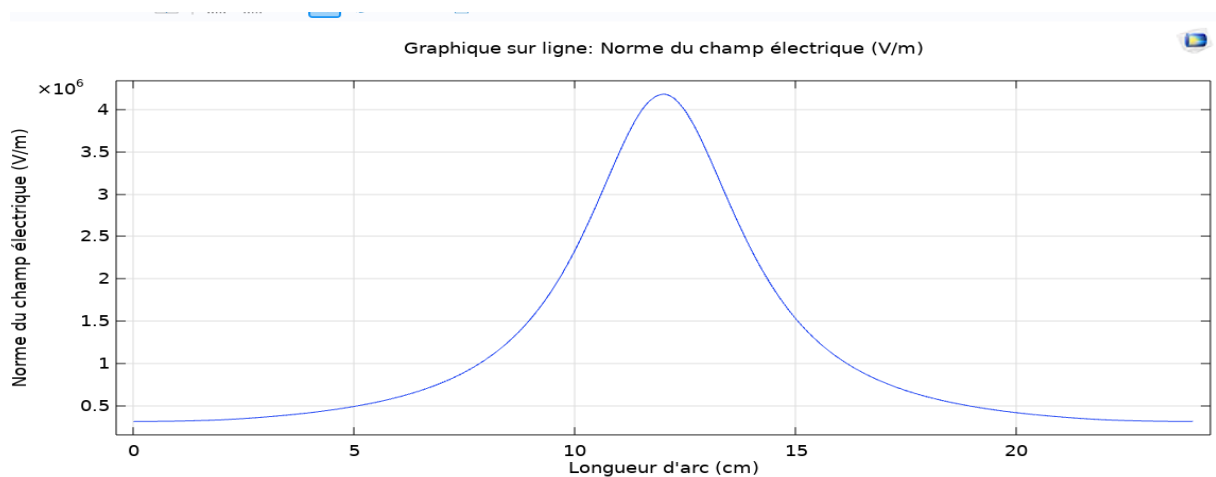


Figure 51 : Champ électrique en huile minérale

### 6.2.2 Huile végétale

Les figures 54 et 55 montrent simultanément la variation de la tension de claquage et le champ électrique d'une huile végétale dans le cas des électrodes sphériques en cuivre .

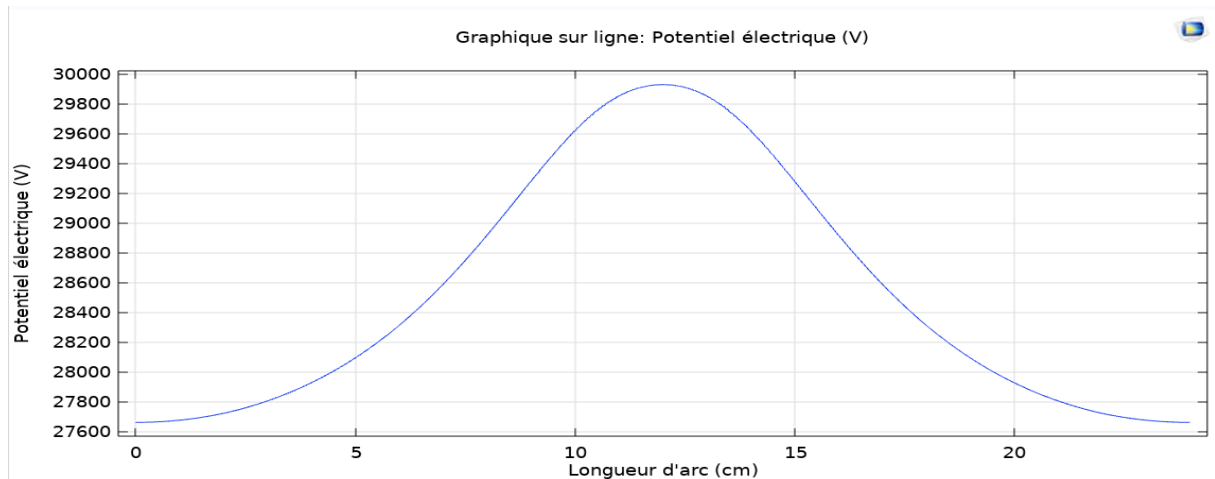


Figure 52 : Electrodes en cuivre de forme sphérique en huile végétale

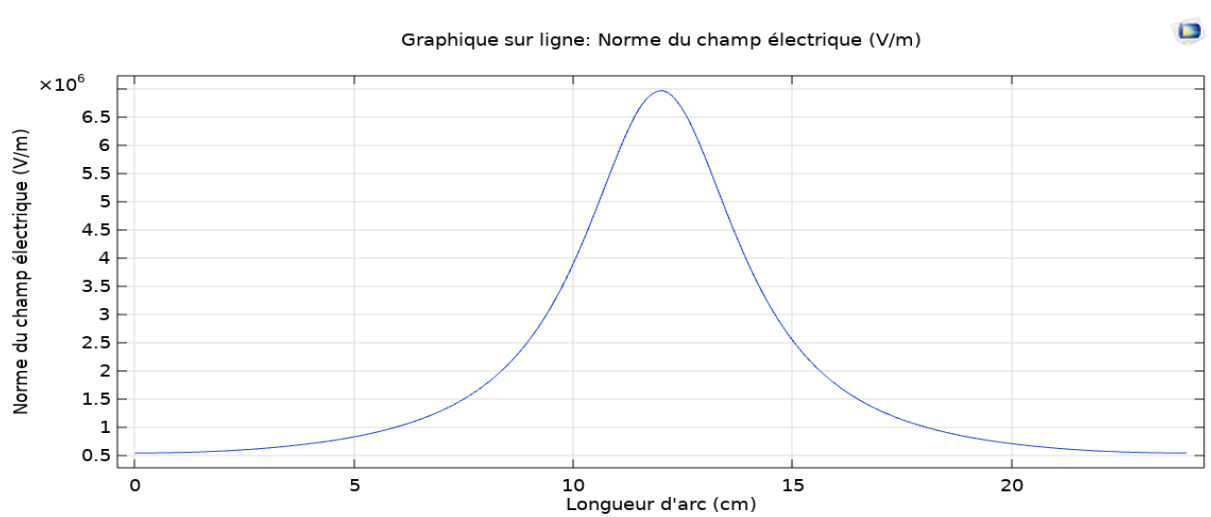


Figure 53 : Champ électrique en huile végétale



### **Chapitre III :La modélisation numérique de cellule de claquage (Impact du champ)**

---

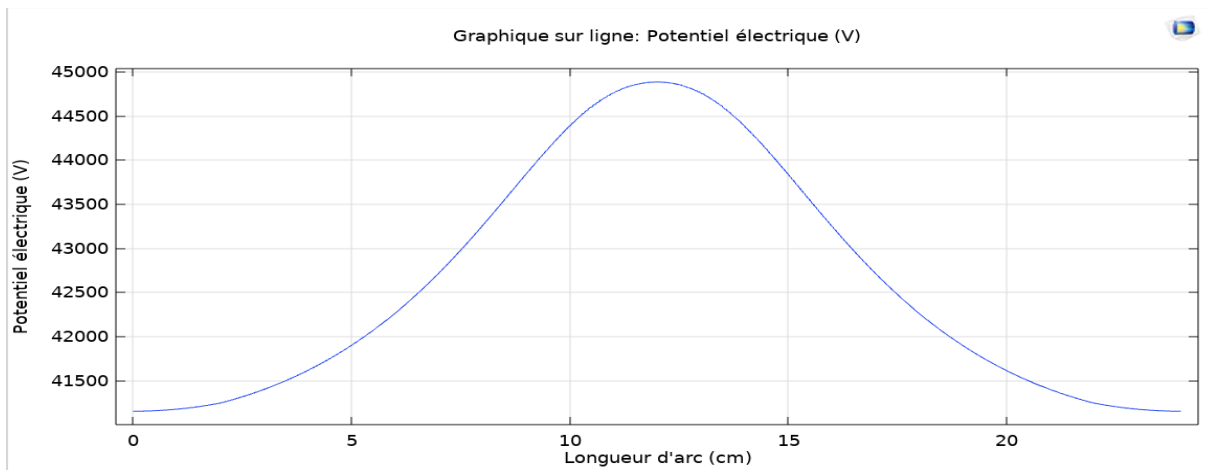
↳ Il est évident que la tension de claquage d'huile végétale est plus petite que celle d'huile minérale ( 29900 V < 44900 V ) .

✚ Lorsqu'il s'agit de la tenue diélectrique, l'huile minérale a généralement une performance supérieure à celle de l'huile végétale. La tenue diélectrique d'un fluide isolant mesure sa capacité à résister à la dégradation électrique sous tension. Les huiles minérales sont spécialement raffinées pour garantir des propriétés diélectriques élevées, assurant une isolation fiable dans les transformateurs et autres équipements électriques. Elles présentent une faible conductivité électrique et une excellente stabilité chimique, ce qui prolonge leur durée de vie opérationnelle et maintient l'intégrité électrique des systèmes. En revanche, bien que les huiles végétales soient parfois utilisées comme alternatives écologiques, elles tendent à avoir une tenue diélectrique inférieure en raison de leur composition chimique différente et de leur susceptibilité accrue à l'oxydation et à la dégradation sous contraintes électriques élevées. Ainsi, dans les applications nécessitant une haute performance diélectrique et une fiabilité à long terme, les huiles minérales restent souvent le choix privilégié.

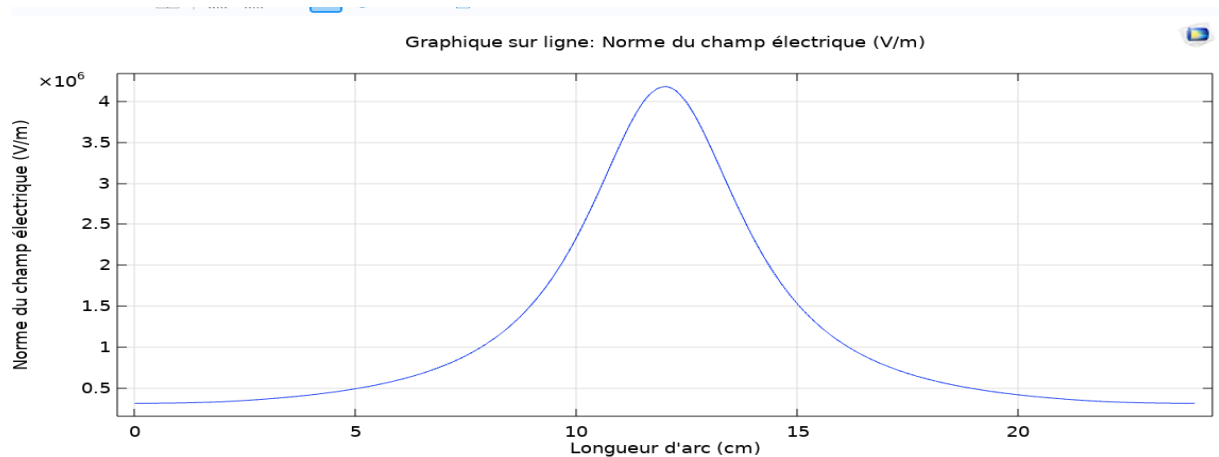
### 6.3 Impact de Matériau des électrodes

#### 6.3.1 Cuivre

Les figures 56 et 57 montrent simultanément la variation de la tension de claquage et le champ électrique d'une huile minérale dans le cas des électrodes sphériques en cuivre .



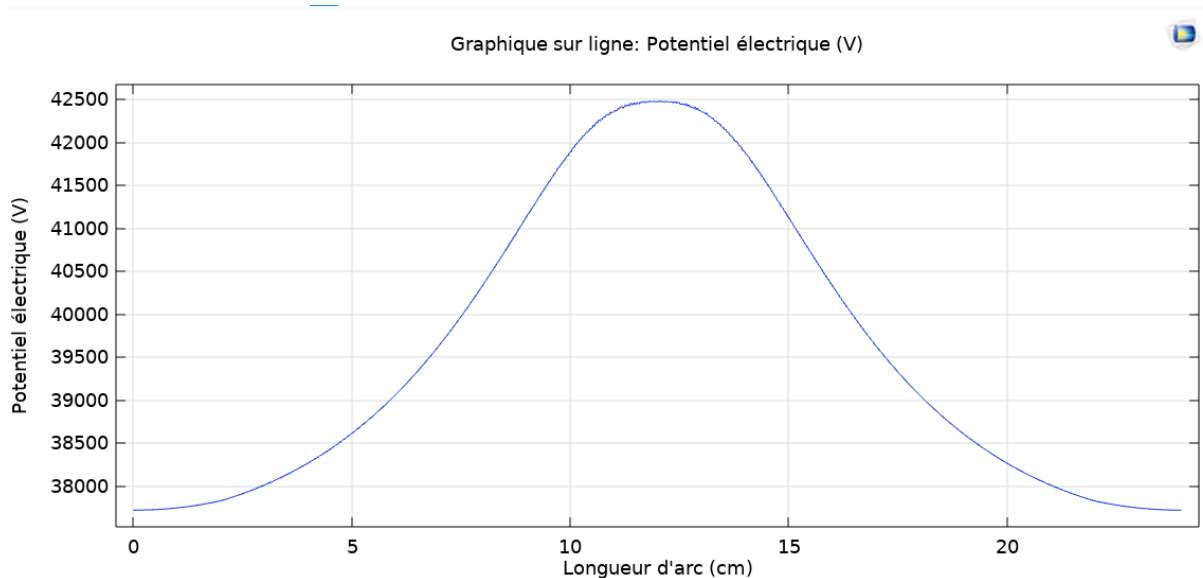
**Figure 54 :** Electrodes en cuivre ( Sphérique en huile minérale )



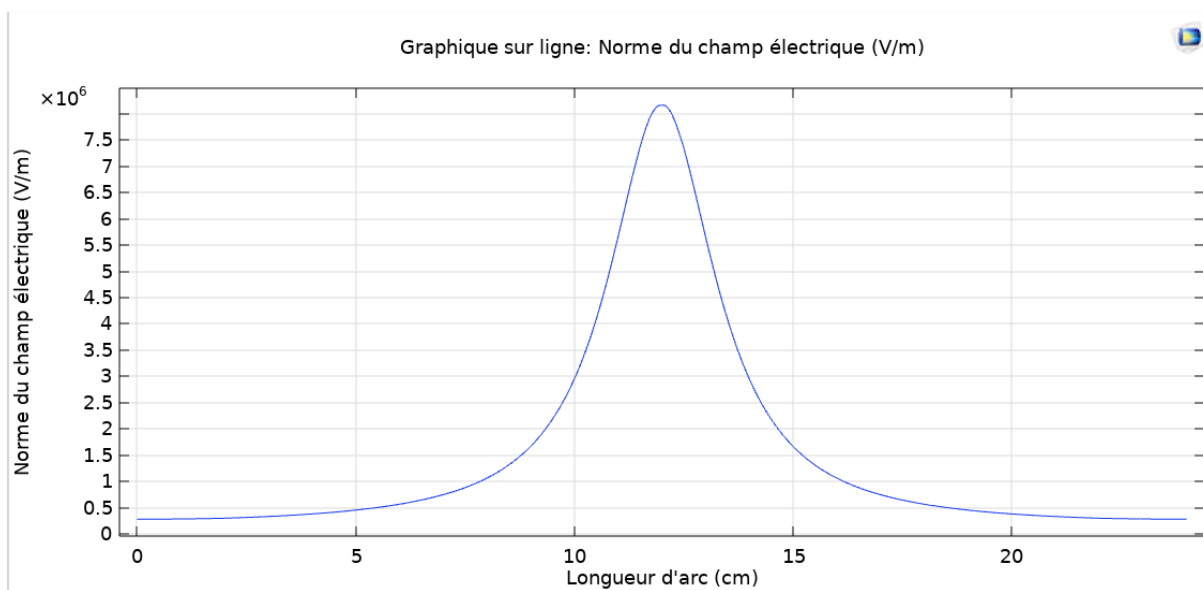
**Figure 55 :** Champ électrique en cuivre

### 6.3.2 Aluminium

la figure 58 et 59 montrent le cas des électrodes en aluminium .



**Figure 56 :** Electrodes en Aluminium ( Sphérique en huile minérale )



**Figure 57 :** Champ électrique en Aluminium

↳ Il est clair que le matériau d'électrode affecte la rigidité électrique d'huile , l'électrode en aluminium a une faible tenue diélectrique par rapport au l'électrode en cuivre .

### **Chapitre III :La modélisation numérique de cellule de claquage (Impact du champ)**

---

- ✚ Le choix entre le cuivre et l'aluminium en tant que matériau d'électrode peut significativement influencer la rigidité diélectrique d'huile isolante .
- ✚ Cuivre: Le cuivre présente une conductivité électrique élevée et une permittivité relative faible, ce qui signifie qu'il concentre moins le champ électrique dans l'huile que d'autres matériaux.
- ✚ Aluminium: L'aluminium a une conductivité électrique plus faible et une permittivité relative plus élevée que le cuivre, ce qui peut conduire à une concentration plus importante du champ électrique dans l'huile .
- ✚ En général, les électrodes en cuivre sont préférées pour les applications haute tension en raison de leur conductivité électrique élevée, qui permet une distribution plus uniforme du champ électrique et réduit les échauffements.
- ✚ Néanmoins, l'aluminium peut être une alternative intéressante dans certains cas, notamment pour son poids plus léger et son coût inférieur. Cependant, il est important de sélectionner des alliages d'aluminium adaptés aux applications électriques et de concevoir soigneusement la géométrie des électrodes pour minimiser les effets négatifs sur la rigidité diélectrique.

### 6.4 L'ajout de Papier

On a pu ajouter du papier FiberFax 970 H ( de bibliothèque de logiciel) à notre cellule et on essaie de voir la différence ( Figures 60 ;61 ;62 ) .

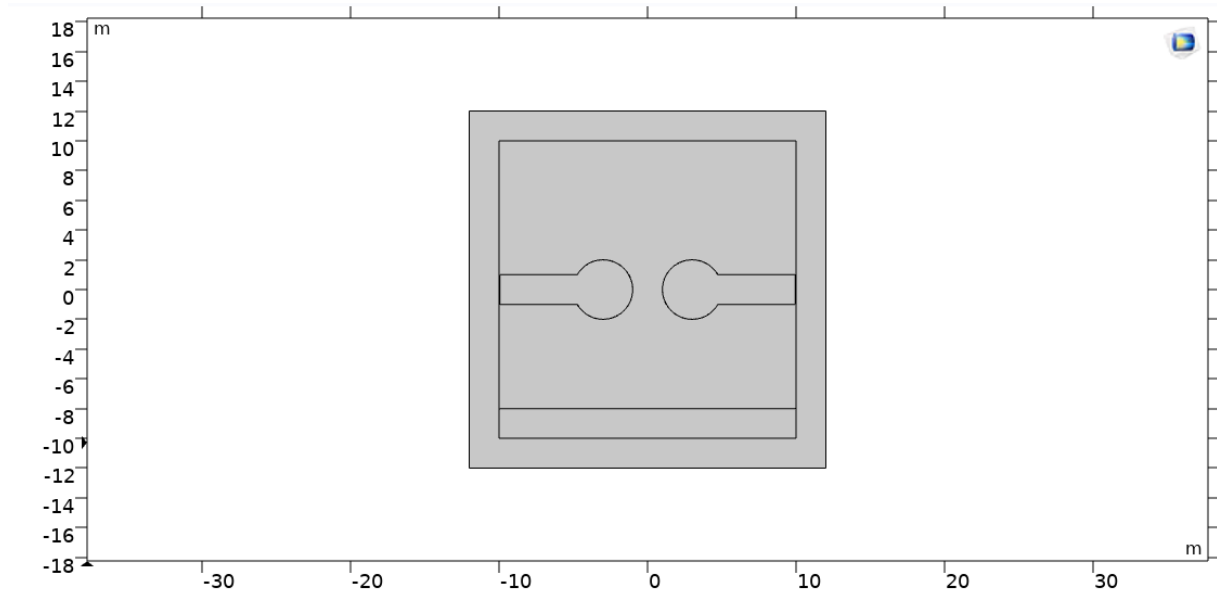


Figure 58 : Ajout de papier

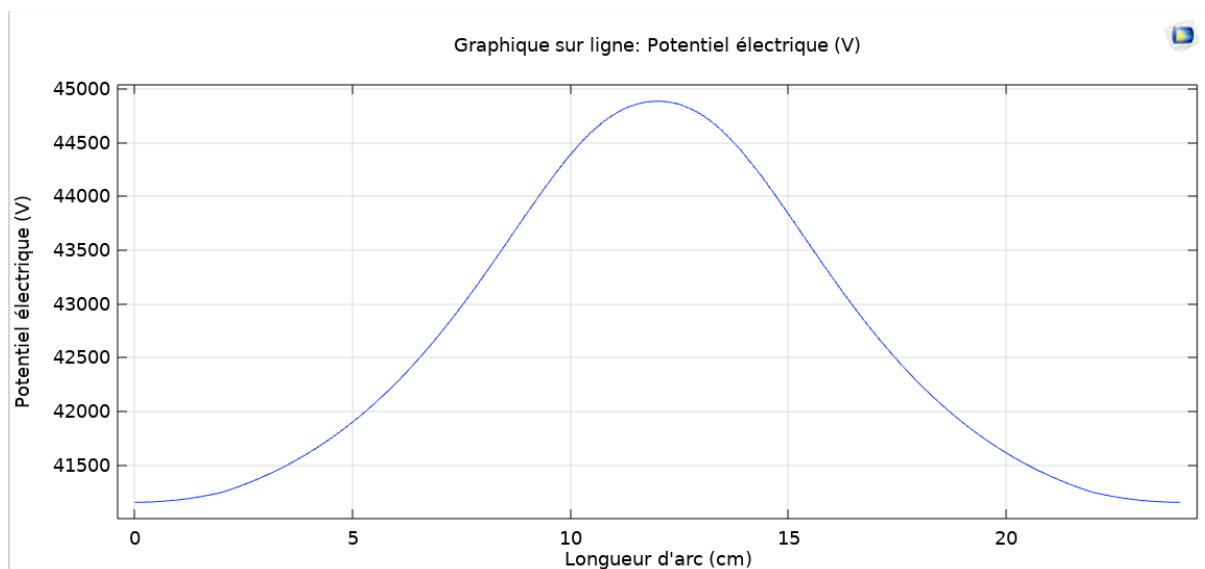
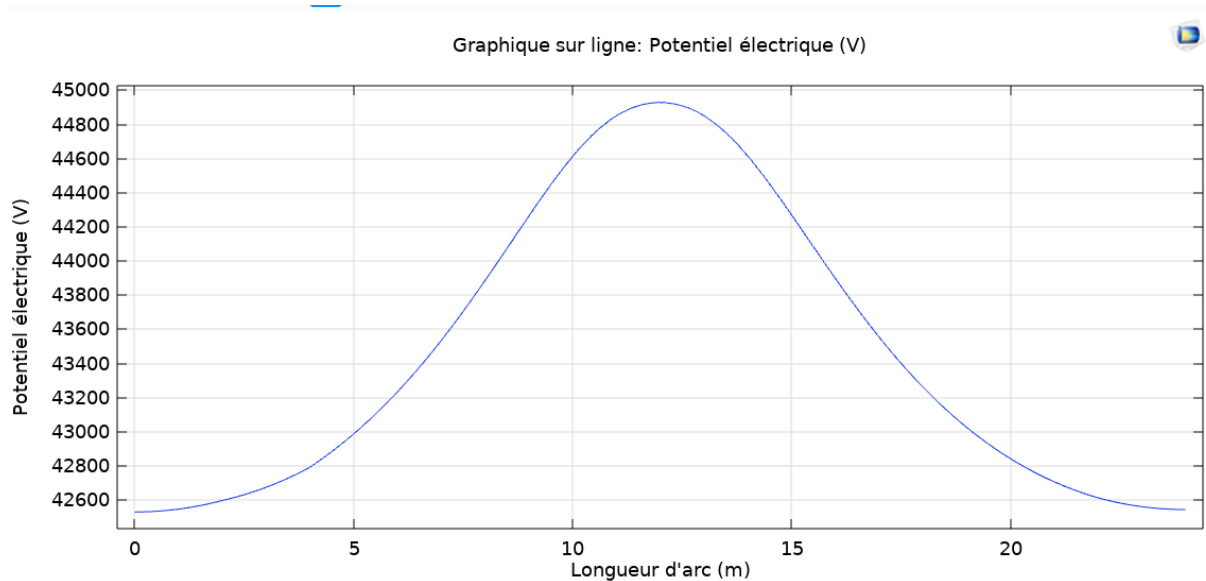


Figure 59 : Electrodes en cuivre de forme Elliptique en huile végétale



**Figure 60 :** Electrodes en cuivre de forme Elliptique en huile végétale ( avec papier )

↳ Il est évident que l'ajout de papier a remporté un plus à la rigidité diélectrique d'huile .

- ✚ Le papier, en tant qu'isolant supplémentaire, tend à augmenter la rigidité diélectrique mesurée de l'ensemble cellule-échantillon. Cela est dû à l'allongement du chemin de claquage électrique que la décharge doit parcourir, augmentant ainsi la résistance à la claquage.
- ✚ Les propriétés du papier, telles que sa composition, sa densité et son épaisseur, influencent son impact sur la rigidité diélectrique. Il est important de choisir un papier adapté à l'application et de caractériser ses propriétés diélectriques avant son utilisation dans la cellule de claquage.
- ✚ En résumé, l'ajout de papier dans une cellule de claquage peut avoir des effets complexes sur la rigidité diélectrique mesurée.

### **7. Conclusion**

L'huile isolante joue un rôle crucial en tant que milieu diélectrique, offrant une barrière électrique efficace contre les décharges électriques et les défaillances.

La géométrie des électrodes ,le matériau des électrodes et la qualité d'huile influent sur le champ électrique appliqué à une huile isolante le champ électrique a un impact significatif sur la rigidité diélectrique des huiles électriques. Plus le champ électrique est élevé, plus la rigidité diélectrique est faible, ce qui augmente le risque de claquage, rupture brutale de l'isolation.

# **Conclusion générale**



### Conclusion générale

Il est évident que les transformateurs de puissance jouent un rôle crucial dans la distribution efficace et sécurisée de l'énergie électrique. Les transformateurs de puissance, en tant que cœur des réseaux électriques, nécessitent des huiles isolantes de haute qualité pour assurer une isolation fiable et une longue durée de vie. L'huile isolante agit non seulement comme un diélectrique, mais également comme un agent de refroidissement et de protection contre l'oxydation.

Notre étude a mis en lumière l'importance de maintenir une rigidité diélectrique élevée dans les huiles isolantes sous divers niveaux de champ électrique. Nous avons constaté que des facteurs tels que la composition physique et chimique de l'huile, la géométrie des électrodes, leurs matériaux ainsi que la gestion appropriée du transformateur et de son environnement, jouent un rôle déterminant dans la préservation de cette rigidité diélectrique. Les résultats montrent que des tensions électriques élevées peuvent compromettre la performance diélectrique de l'huile isolante, mettant en évidence la nécessité de surveiller et de contrôler rigoureusement ces conditions pour éviter toute défaillance.

En conclusion, la continuité de la recherche dans ce domaine est très importante pour développer des technologies plus avancées, améliorer la fiabilité des transformateurs et des réseaux électriques, tout en assurant une sécurité maximale pour les opérateurs et les consommateurs d'électricité à travers le monde.

### Recommandations

- Il est vivement recommandé d'étudier les caractéristiques physico-chimiques de la nouvelle huile NITRO BIO 300X et sa tenue diélectrique

### Bibliographie

- [1] -- Etude du phénomène d'électrisation par écoulement sur les cartons des transformateurs de puissance Audrey Bourgeois
- [2] -- IEC, "IEC 60076-7 First edition 2005-12 Power transformers Part 7: Loading guide for oilimmersed power transformers," ed, 2005
- [3] --R. Fournié, "Les isolants en électrotechnique : Essais, Mécanismes de dégradation, Applications Industrielles", Collection de la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France, Eyrolles, Paris, 1990.
- [4] -- R. PINZELU, Fibres aramides pour matériaux composites vol. A3985: Techniques Ingénieur, 1995. ) (Wikipedia. (15-03-13). Les polyamides aromatiques, ou aramides.)
- [5] --W. University, Eau, Claire. (30 April 2001). AramidFibers)
- [6] -- N. BERGER, M. RANDOUX, G. OTTMANN et P. VUARCHEX, « Revue des isolants liquides », Electra (F), n° 171, Avril 1997
- [7] -- T. O. Rouse, "MineralInsulatingOil in Transformers". IEEE ElectricalInsulation Magazine; Volume 14, N°3, pp 6-16, 1998.
- [8] -- I. Fofana and J. Sabau, "Application of Petroleum-basedoil in Power Transformer", 23 pages, In Natural GasResearch Progress, Editors: Nathan David and Theo Michel, © 2008 Nova Science Publishers, Inc., ISBN: 978-1-60456-700-7.
- [9] -- J. Sabau, "Determination of Solid Suspensions in ElectricalInsulatingOils by Turbidimetry", SAIT/CEA Technology Symposium Calgary (Alberta), 11-12 June 1998.
- [10] -- J. Vergne, "Étude du vieillissement physico-chimique du complexe papier-huile dans les transformateurs électriques" Thèse INPT, 1992.
- [11] -- H. Boris, E. Gockenbach, and B. Dolata, "Ester fluids as alternative for mineralbased transformer oil," in DielectricLiquids, 2008. ICDL 2008. IEEE International Conference on, 2008
- [12] -- J. S. N'CHO, "Développement de nouvelles méthodes de diagnostic et de régénération des huiles pour transformateurs de puissance," Ecole Centrale de Lyon, 2011.
- [13] -- F. M. Clark, Insulatingmaterials for design and engineering practice: John & Sons, 1962.
- [14] -- Working Group A2.35 of CIGRE StudyCommittee TB 436- Experiences in Service with New InsulatingLiquids, October 2010.
- [15] -- P. J. VUARCHEX, << huiles et liquides isolants », Techniques de l'ingénieur, Volume DAB, Traité D230, Juin 1995.

- [16] -- Norme ISO 3104, «Produits pétroliers - Liquides opaques et transparents Détermination de la viscosité cinématique et calcul de la viscosité dynamique »>, Octobre 1994.
- [17] -- Norme ISO 3016, « Produits pétroliers - Détermination du point d'écoulement »>, Août 1994.
- [18] -- Norme ASTM D 2766, « Standard test method for specific heat of liquids and solids »>, 1995.
- [19] -- Norme ASTM D 2717, « Standard test method for thermal conductivity of liquids »>, 1995.
- [20] -- R. TOBAZEON, «< Conduction électrique dans les liquides »>, Techniques de l'ingénieur, Traité D 2430, Novembre 1996
- [21] -- B. P. KANG, «< Thermal dependency of viscosity, power factor and ion content of electrical insulating oil »>, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, (USA) 9, September 1965.
- [22] -- N. BERGER, «< Liquides isolants en électrotechnique - Caractéristiques des produits »>, Techniques de l'ingénieur, Traité D2471, Novembre 2002
- [23] -- N. BERGER, «< Liquides isolants en électrotechnique Présentation générale »>, Techniques de l'ingénieur, Traité D 2470, Mai 2002,
- [24] -- R. TOBAZEON, « Préclaquage et claquage des liquides diélectriques »>, Techniques de l'ingénieur, Traité D2450, Novembre 1997
- [25] -- Transformer oil handbook »>, Copyright Nynas Naphtenics AB, Sweden, 2004.
- [26] -- R. MUSIL, M. BAUR, and W. PFISTER, «< Testing practices for the AC breakdown voltage testing of insulation liquids »>, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, n° 15, January/February 1995
- [27] -- A. BEROUAL, «< Electronic and gaseous processes in prebreakdown phenomena of dielectric liquids »>, J. Appl. Phys. 73 (9), 1993
- [28] -- A. NIKURADSE, «< Das flüssigedielektrikum (le diélectrique liquide) »>, Springer Verlag, Berlin, 1934
- [29] - - Wikipédia - www.comsol.com, [https://fr.wikipedia.org/wiki/COMSOL Multiphysics](https://fr.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics)
- [30] —www.comsol.com
- [31] —Wikipédia « Transformateur de puissance »
- [32] -- Wikipédia « les Polyamides aromatiques »

## Bibliographie

---

[33] -- Christian Le Cartier de Veslud, « présentée devant l'Institut National Polytechnique de Lorraine pour l'obtention du titre de Docteur de l' I.N.P.L», 1991.

[34] -- Hamza Slamet Amina, «Contribution à l'étude du modèle développé d'un isolateur

[35] -- H. Benguesmia, N. M'ziou, A. Boubakeur, «simulation of the potential and electricfield distribution on high voltage insulatorusing the finiteelementmethod », diagnostyka, 2018, vol. 19, no. 2.