



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique Industrielle
Spécialité : Electromécanique Industrielle

Thème

**La tenue diélectrique des huiles végétales
comme substitut aux huiles minérales dans les
équipements électriques**

Présenté et soutenu en ligne par :

Halim Mohamed Farouk

et

Benmeddah Mostafa

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Djelghoum Farida	MAA	IMSI/Univ-Oran2	Présidente
Talhi Mama	MCB	IMSI/Univ-Oran2	Encadreur
Chouitek Mama	MCA	IMSI/Univ-Oran2	Examinatrice

Année 2019/2020

Remerciements

Nous remercions ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Nous exprimons nos profondes gratitudes à notre famille, et surtout nos parents, pour leurs patiences, leurs soutiens et leurs encouragements pour terminer ce travail.

*Nous tenons aussi à remercier Notre encadreur **Mme Talhi Mama**, pour ses précieux conseils et son assistance tout au long de la période de travail.*

*Nous remercions ensuite l'ensemble des membres du jury, qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir étudier avec attention notre travail: **Mme djelghoum.F** et **Mme chouitek. M** pour avoir accepté d'être examinateurs de cet mémoire.*

Nous exprimons nos sincères remerciements à tous les enseignants de l'institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle pour leurs patiences, leur dévouement à notre formation.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Halim med Farouk

Dédicaces



Je dédie ce modeste travail à : Mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leurs amours, leurs tendresses et leurs soutiens tout au long mes études.

Ma chère sœur lina Mes frères Abdelrahmane, Housseem, Ilias, Safouane et sur tous Rayane.

Dédicace à ma chère Abir et mon ami et frère Alaa eddine et Omar pour son encouragement.

Tous mes amis de promotion 2014/2020 avec qui j'ai passé six merveilleuses années surtout : Amin, Ahmed, Yanis, Bachir, loḳmen, Isalm, Hocine, Ghafour, da2a, Hssissen. Et tous mes amis.

Farouk

Mostafa benmeddah
Dédicaces



Je dédie ce modeste travail à : Mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leurs amours, leurs tendresses et leurs soutiens tout au long mes études.

Ma chère sœurs Karima, Radia et Fatima.

Dédicace à me chère Abdelhafid, Abdelrahime et mon ami et frère Abdalsalame pour son encouragement.

Tous mes amis de promotion 2014/2020 avec qui j'ai passé six merveilleuses années surtout : Mouade, Abdelrahmane, Bachir, Lokmen, Youcef, Samie, Swidé, Da2a, Tofalé, Zaki, Salah. Et tous mes amis.

Mostafa

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : Présentation générale des transformateurs de puissance.....	3
I.1 Introduction	4
I.2 Historique	4
I.3 Définition de transformateur	4
I.4 Classification	7
I.5 Principe de fonctionnement	8
I.5.1 Schéma électrique équivalent	8
I.5.2 Essais sur les transformateurs	9
I.5.3 Bilan de puissance	11
I.5.4 Rendement.....	11
I.6 Isolation dans les transformateurs de puissance	11
I.6.1 Isolation liquide.....	11
I.7 Utilisation de transformateur de puissance.....	13
I.8 Techniques de diagnostic.....	14
I.8.1 Mesures électriques	14
I.8.2 Mesures diélectriques	15
I.8.3 Techniques physico-chimiques	16
I.9 Conclusion.....	19
Chapitre II : Les huiles végétales.....	20
II.1. Introduction	21
II.2. Liquides isolants	21
II.2.1. Rôle des huiles isolantes dans un transformateur.....	21
II.3. Huiles isolantes.....	23
II.3.1. Huiles végétales.....	23
II.4. Rôles et intérêt des huiles végétales	26
II.4.1. Rôles physiologiques.....	26
II.4.2. Rôles nutritionnel	26
II.4.3. Rôles Isolants	27
II.5. Avantages et inconvénients des huiles végétales	27
II.5.1. Avantages	27
II.5.2. Inconvénients	28

II.6.	Propriétés des huiles végétales isolantes	29
II.6.1.	Propriétés électriques	29
II.6.2.	Propriétés physico-chimiques	32
II.7.	Conclusion.....	35
Chapitre III : COMSOL Multiphysics.....		36
III.1.	Introduction	37
III.2.	Définition.....	37
III.3.	Prise en main du logiciel	38
III.3.1.	Étapes de résolution dans COMSOL Multiphysic	38
III.3.2.	Résolution du problème	42
III.3.3.	Analyse des résultats	43
III.4.	Potentialités et performances de COMSOL Multiphysics	43
III.5.	Avantages de conception avec COMSOL Multiphysics :	43
III.6.	Modélisation d'une cellule de claquage	44
III.7.	Conclusion.....	44
Chapitre IV : Modélisation de la cellule de claquage		45
IV.1	Introduction	46
IV.2	Procédures de simulation d'une cellule de claquage sous COMSOL MULTIPHYSICS 5.5	46
IV.2.1	Procédure de simulation.....	47
IV.3	Lancement de la simulation et analyse des résultats	58
IV.4	Résultat et discussions	58
IV.4.1	Le champ électrique	58
IV.4.2	L'indicateur de claquage	59
IV.4.3	Trajectoires de particules	60
IV.4.4	Tension de claquage.....	61
IV.5	Influence de la permittivité sur la tension de claquage	63
IV.5.1	Variation de la permittivité relative	64
IV.5.2	Variation de tension de claquage	65
IV.6	Influence de la conductivité sur la tension de claquage	66
IV.6.1	Variation de la conductivité thermique.....	66
IV.6.2	Variation de tension de claquage	68
IV.7	Influence de la densité sur la tension de claquage.....	69
IV.7.1	Variation de la densité	69
IV.7.2	Variation de tension de claquage	70
IV.8	Influence de la viscosité sur la tension de claquage	71

IV.8.1	Variation de la viscosité dynamique	71
IV.8.2	Variation de tension de claquage	73
IV.9	Tension de claquage de l'huile minérale	74
IV.10	Conclusion	76
Conclusion générale		77
Bibliographie.....		79

Liste des figures

Figure I. 1 : Transformateur monophasé.....	5
Figure I. 2 : transformateur triphasé.....	5
Figure I. 3 : Symbole de transformateur de puissance.....	5
Figure I. 4 : Schéma d'un transformateur monophasé.....	6
Figure I. 5 : Schéma d'un transformateur triphasé de type colonne.....	6
Figure I. 6 : Vue intérieure d'un transformateur, type colonne.....	7
Figure I. 7 : Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance.....	8
Figure I. 8 : Schéma électrique monophasé.....	9
Figure I. 9 : Schéma de bilan de puissance d'un transformateur.....	11
Figure I. 10 : Emplacement d'un transformateur dans le réseau électrique [4].....	13
Figure II. 1 : Structure chimique d'une huile végétale, aussi appelé triester (triglycérides); R, R' et R'' sont les chaînes acides gras du même ou de la différent types.....	25
Figure II. 2 : Les acides gras majoritairement présents dans les huiles végétales.....	26
Figure II. 3 : Comportement d'une huile végétale.....	28
Figure II. 4 : Schéma d'un condensateur,.....	30
Figure II. 5 : Représentation schématique de l'angle de pertes [9].....	32
Figure III. 1 : choix du modèle.....	39
Figure III. 2 : choix la dimension d'étude (3d, 2d, 1d).....	39
Figure III. 3 : choix du type de physique a étudié.....	40
Figure III. 4 : choix du type d'études (stationnaire ou en fonction du temps).....	40
Figure III. 5 : Définitions des paramètres globaux.....	41
Figure III. 6 : Discrétisation d'une structure en nœuds et éléments (dent d'une roue dentée).....	42
Figure IV. 1 : Cellule et les électrodes.....	46
Figure IV. 2 : L'interface de COMSOL MULTIPHYSICS 5.5.....	47
Figure IV. 3 : L'icône de COMSOL MULTIPHYSICS 5.5.....	48
Figure IV. 4 : Les différentes dimensions de simulation.....	48
Figure IV. 5 : Le choix de la physique à utiliser.....	48
Figure IV. 6 : Le choix de l'étude.....	49
Figure IV. 7 : Création d'une géométrie cellule.....	50
Figure IV. 8 : la géométrie de cellule de claquage.....	52
Figure IV. 9 : Figure choix des matériaux.....	52
Figure IV. 10 : Domaine deux en huile végétale soja.....	53

Figure IV. 11 : Frontières 6-13(potentiel électrique).....	54
Figure IV. 12 : Frontières 14--21(mass).	54
Figure IV. 13 : Frontière 13 (Cathode).	55
Figure IV. 14 : Les frontières 14–17(Compteur de particules).....	55
Figure IV. 15 : Maillage des domaines.	56
Figure IV. 16 : maillage en triangle libre des frontières 11–22	57
Figure IV. 17 : maillage en quadruple libre.	58
Figure IV. 18 : Multicoupes : Champ électrique, x component (V/m).....	59
Figure IV. 19 : Champ électrique entre les sphères	59
Figure IV. 20 : Indicateur de claquage sur la surface de la cathode.	60
Figure IV. 21 : Trajectoires de particules	60
Figure IV. 22 : Trajectoires de particules agrandies	61
Figure IV. 23 : Potentiel électrique entre les sphères.	62
Figure IV. 24 : Potentiel électrique agrandi entre les sphères.	63
Figure IV. 25 : Champ électrique (v/m) entre les sphères.	63
Figure IV. 26 : Potentiel électrique entre les sphères.	64
Figure IV. 27 : Potentiel électrique entre les sphères.	65
Figure IV. 28 : Influence de la permittivité sur la tension de claquage.	66
Figure IV. 29 : Potentiel électrique entre les sphères.	67
Figure IV. 30 : Potentiel électrique entre les sphères.	68
Figure IV. 31 : Influence de la conductivité sur la tension de claquage.	68
Figure IV. 32 : Potentiel électrique entre les sphères.	69
Figure IV. 33 : Potentiel électrique entre les sphères.	70
Figure IV. 34 : Influence de la densité sur la tension de claquage.	71
Figure IV. 35 : Potentiel électrique entre les sphères.	72
Figure IV. 36 : Potentiel électrique entre les sphères.	73
Figure IV. 37 : Influence de la conductivité sur la tension de claquage.	74
Figure IV. 38 : Potentiel électrique entre les sphères.	75
Figure IV. 39 : Comparaison entre l'huile végétale et l'huile minérale.	75

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Essai à vide.....	9
Tableau I. 2 : Essai en court-circuit	10
Tableau II. 1 : la densité relative des huiles végétales	32
Tableau II. 2 : Le point d'éclair de quelques huiles végétales	33
Tableau II. 3 : La viscosité de quelques huiles végétales.....	34
Tableau II. 4 : Teneur en eau de l'huile RS50.....	34
Tableau IV. 1 : définition des paramètres global.....	49
Tableau IV. 2 : les paramètres d'huile de soja.....	53
Tableau IV. 3 : Statistiques de maillage	56
Tableau IV. 4 : REGLAGE DES PARAMETRES DE MAILLAGE	57
Tableau IV. 5 : Condition initiale d'huile soja (Valeur de permittivité 2.5)	64
Tableau IV. 6 : Condition initiale d'huile soja (Valeur de permittivité 2)	65
Tableau IV. 7 : condition initiale d'huile soja (Valeur de conductivité 0.2)	66
Tableau IV. 8 : Condition initiale d'huile soja (Valeur de conductivité 0.1)	67
Tableau IV. 9 : Condition initiale d'huile soja (Valeur de la densité 0.88).....	69
Tableau IV. 10 : Condition initiale d'huile soja (Valeur de la densité .85).....	70
Tableau IV. 11 : Condition initiale de l'huile de soja (Valeur de la viscosité $4.7e-2$).	71
Tableau IV. 12 : Condition initiale d'huile soja (Valeur de la viscosité $3.7e-2$).....	72
Tableau IV. 13 : Condition initiale d'une huile minérale	74

Liste des abréviations et symboles

CEI	: commission électrotechnique internationale
PCB	: polychlorobiphényles
X_{eq}	: Réactance équivalente
Φ	: Flux magnétique
N₁	: Nombre des spires primaire
I₁	: Courant primaire
U₁	: Tension primaire
N₂	: Nombre des spires secondaire
I₂	: Courant secondaire
U₂	: Tension secondaire
m	: Rapport de transformation
Cos (φ)	: Facteur de puissance
1/R_f	: Résistance shunt
1/X_m	: Réactance shunt
Z_{eq}	: L'impédance équivalente
EN	: Etats Normale
Req	: Résistance équivalente
P_{cc}	: Puissance en court-circuit
V_{cc}	: Tension en court-circuit
I_{cc}	: Courant en court-circuit
P_{J1}	: Pertes joule au primaire
P₀	: puissance à vide
V₀	: tension à vide
I₀	: courant à vide
P_{J2}	: Pertes joule au secondaire
P_{fer}	: Pertes ferromagnétique
P₂	: Puissance utile
η	: Rendement
HT	: Haute tension
BT	: Bas tension
T_c	: Transformateur de courant

V_{cc}	: Tension en court-circuit
I_{cc}	: Courant en court-circuit
tan(δ)	: Facteur de dissipation
DP	: Décharge partielles
CM	: Circuit magnétique
MT	: Moyen tension
AFSSA	: Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments
ANSES	: Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
ANC	: Apports Nutritionnels Conseillés
EDF	: Électricité de France
tanδ	: facteur de pertes
ε₀	: permittivité absolue
S	: surface
e	: Épaisseur
δ	: le complémentaire de l'angle de déphasage entre le courant et la tension
ε_r	: permittivité relative
C	: condensateur est rempli par un isolant
C₀	: condensateur plan à vide
R''	: chaîne acide gra
Z	: isomère trans
E	: isomère trans
ρ	: la résistivité
σ	: La conductivité
φ	: la différence de phase
RS50	: huile végétale modifiée partir d'une huile de colza
MEF	: Méthode des éléments finis
EDP	: équations aux dérivées partielles
Pmma	: poly méthyl méthacrylate
ct	: Conductivité thermique
ex	: Coefficient de dilatation thermique
C_p	: Capacité thermique à pression constante
dn	: Masse volumique

vd	: Viscosité dynamique
pr	: Permittivité relative
V_{app}	: Tension appliquée
ebd	: Détection de claquage
es	: électrostatique
E	: l'intensité du champ électrique
D	: le déplacement électrique
ρ	: la densité de charge d'espace
ε	: le constant diélectrique du matériau
V	: potentiel électrique
ε₀	: la permittivité de l'espace libre
TDC	: Tension de claquage

INTRODUCTION GENERALE

Les transformateurs de puissance sont des composants essentiels dans les systèmes de transport et de distribution de l'énergie électrique. Ils constituent l'un des éléments les plus chers et il est donc fondamental qu'ils fonctionnent correctement durant de nombreuses années. La plupart des transformateurs de puissance à travers le monde sont remplis avec des liquides isolants. Ces liquides permettent d'assurer aussi bien l'isolation électrique (par imprégnation des isolants solides, cellulosiques) que thermique puisqu'ils ont de bonnes propriétés de dissipation de chaleur comparés aux isolants solides et gazeux. L'huile minérale constitue le liquide le plus communément employé dans les transformateurs de puissance d'une part pour ses propriétés chimiques et d'autre part pour son faible coût. En revanche, les liquides diélectriques présentent une grande inflammabilité, c'est pour cela que les polychlorobiphényles (PCB) ont été utilisés comme diélectriques isolants jusqu'à la fin des années 1970 où ils sont reconnus comme produits dangereux et nuisibles à l'environnement car ils sont source de dioxines lors de la combustion, même incomplète. Ainsi, les huiles minérales restent les seules à être utilisées dans les transformateurs de puissance. Par ailleurs, de nouveaux liquides de synthèse à basse inflammabilité telles que les huiles silicones ou esters synthétiques ont été mis au point pour remplacer les PCB mais leur utilisation reste limitée de par leur coût élevé.

Afin de garantir les performances d'un transformateur et augmenter sa durée de vie, les constructeurs misent d'une part, sur la qualité du système isolant et l'exploitant d'autre part, veille au bon fonctionnement et à la maintenance régulière du produit.

Les esters naturels sont constitués de triglycérides (R-COO-R') synthétisés à partir de ricin, de colza ou de tournesol. Ces huiles ne sont pas normées (en 2005) par la Commission Huile végétale ou ester Naturel.

Un transformateur rempli d'huile végétale selon la commission électrotechnique internationale (CEI). Au niveau de ses avantages, elle est écologique, très biodégradable, peu inflammable et a une grande solubilité de l'eau. Au niveau de ses défauts, elle ne supporte pas une météo froide : point d'écoulement aux alentours de 20 °C, elle est très visqueuse et surtout elle s'oxyde très vite. Ce dernier défaut peut être compensé par l'usage d'antioxydant.

Dans ce travail de recherche, nous nous intéressons aux huiles végétales proposées comme alternatives aux huiles minérales dans les transformateurs de puissance. Nous avons étudiés plus particulièrement la tenue diélectrique (tension de claquage) de cette huile végétale, on compare ses caractéristiques à celles de l'huile minérale sous tensions alternative (AC). Nous avons aussi étudié l'influence de quelques propriétés physicochimiques sur la tension de claquage.

Le présent manuscrit est divisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre, nous présentons une recherche biographique sur les transformateurs de puissance, leurs applications, les méthodes diagnostic et les huiles utilisées.

Dans le deuxième chapitre, Nous exposons les huiles végétales, leurs applications, leurs inconvénients. Nous exposons aussi les propriétés électriques, chimiques et diélectriques des huiles végétales. Dans le troisième chapitre, nous présentons le logiciel de simulation que nous avons utilisé dans notre étude. Le quatrième chapitre présente les résultats de simulation de la tension de de claquage des huiles végétales. L'influence des propriétés physico-chimiques sont présentés aussi dans ce chapitre

Chapitre I : Présentation générale des transformateurs de puissance

I.1 Introduction

Le transformateur est l'un des éléments clés du réseau électrique tant sur le plan horizontal du fait de son nombre énorme et sa diversité dans ses formes, ses tailles et ses fonctions, ou au point de vue vertical où cet appareil représente 60% du coût d'un poste de transformation [1]. Le réseau électrique contient des dizaines de générateurs, mais on y trouve des milliers de transformateurs. Et bien sûr, il ne peut rivaliser avec sa dispersion que les câbles et lignes aériennes. L'importance de cet appareil qui est attribuée à leur coût d'investissement élevé et les pertes financières associées à leur indisponibilité justifie largement la recherche et la mise en place de moyens de surveillance (appelée aussi monitoring). L'objectif visé consiste à évaluer l'état effectif des transformateurs afin de limiter leurs risques de défaillances et d'éviter toute indisponibilité prolongée. Par ailleurs, dans l'optique de la réduction des coûts d'exploitation, la connaissance de l'état effectif du transformateur doit permettre d'optimiser la planification de la maintenance [2].

I.2 Historique

En 1820, Hans Christian Oersted, physicien danois a découvert qu'un conducteur traversé par un courant électrique génère un champ magnétique. Quelques années plus tard, en 1830, Josef Henry explique les notions d'induction et de self-induction. En 1831 Michael Faraday a utilisé un appareil constitué d'un anneau de fer et d'un enroulement en cuivre isolé. En 1832 Lucien Gaulard (1850-1880), jeune électricien français, chimiste de formation, présente à la société Française des Électriciens un « générateur Secondaire », dénommé depuis Transformateur [1].

I.3 Définition de transformateur

Le transformateur est une machine électrique statique, appelé aussi un convertisseur statique à induction, il comporte deux (**Figure I.1**) ou plusieurs enroulements fixes (**Figure I.2**), destiné à transformer la tension et le courant alternatifs, à une tension et courant alternatifs de même fréquence mais d'amplitude différent selon les besoins d'utilisation [2].



Figure I. 1 : Transformateur monophasé.



Figure I. 2 : transformateur triphasé

➤ *Symbole de transformateur*

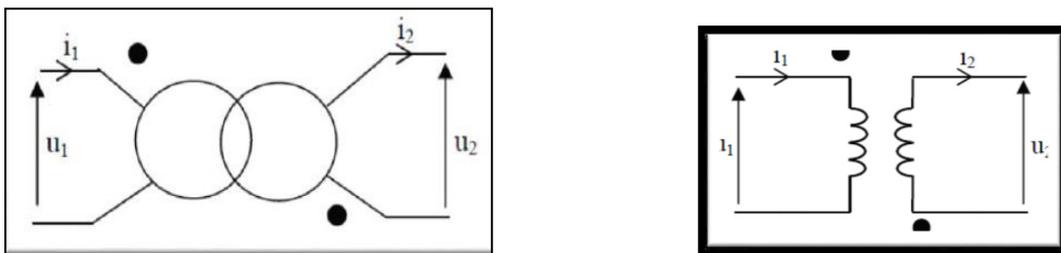


Figure I. 3 : Symbole de transformateur de puissance.

➤ Schéma

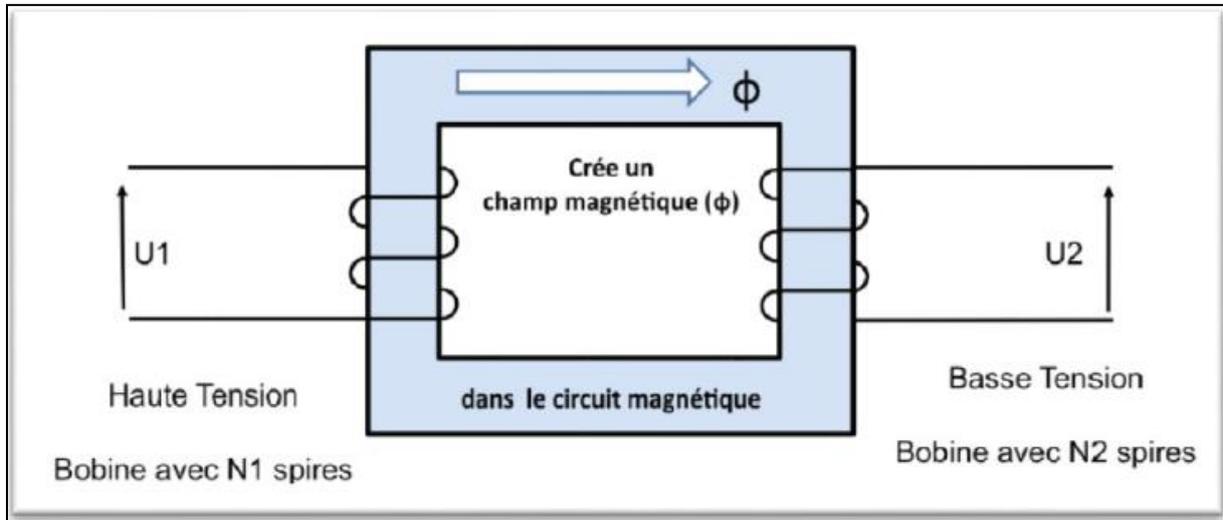


Figure I. 4 : Schéma d'un transformateur monophasé.

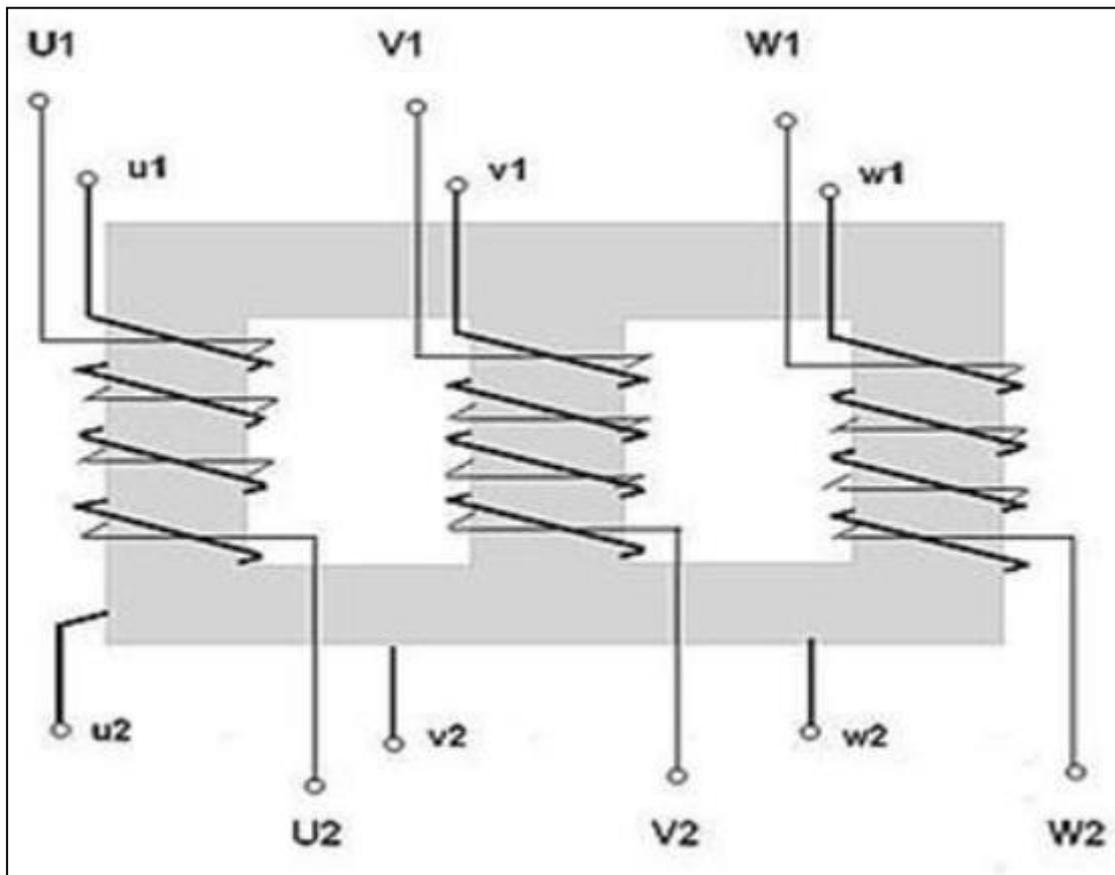


Figure I. 5 : Schéma d'un transformateur triphasé de type colonne.

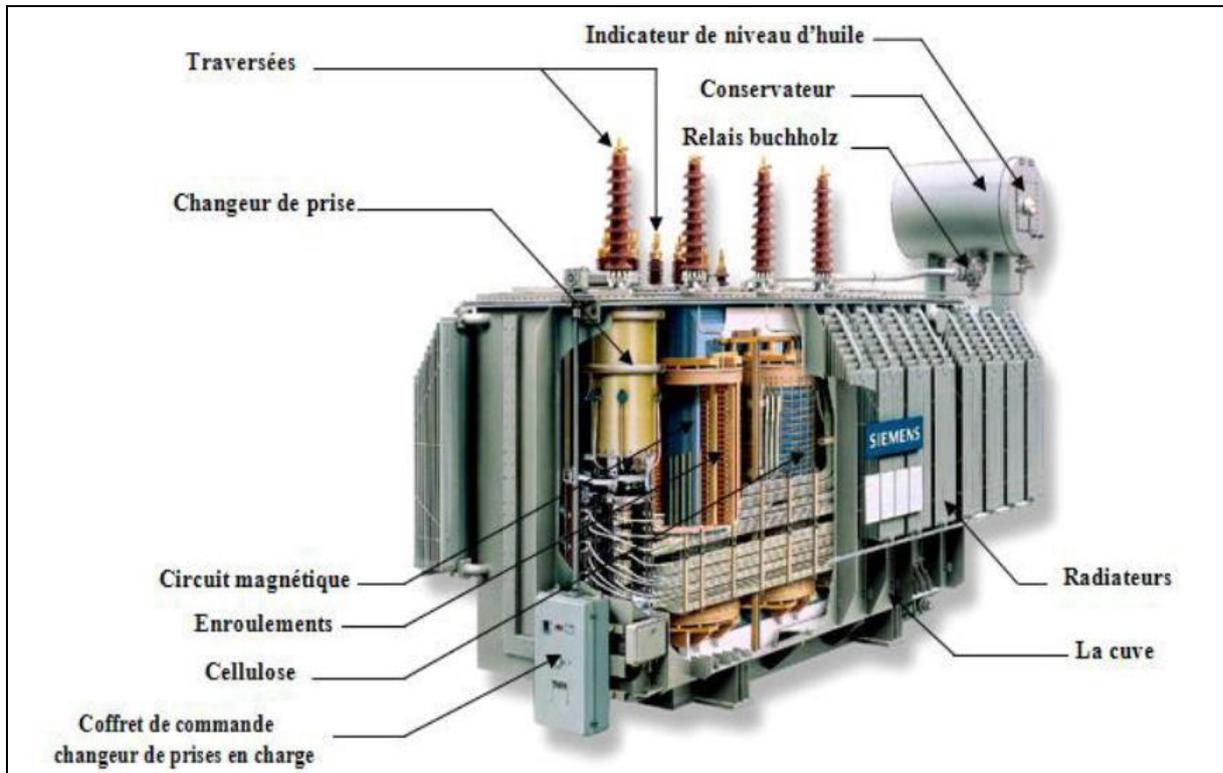


Figure I. 6 : Vue intérieure d'un transformateur, type colonne.

I.4 Classification

On peut classifier les transformateurs de puissance selon plusieurs des aspects. Ces aspects sont indépendants les uns des autres [4] :

- La puissance :

- Transformateurs de distribution : jusqu'à 2,5 MVA en triphasé ou 0,833 MVA 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.

- Le nombre de phases : monophasé ou triphasé

- Le milieu réfrigérant et le mode de refroidissement : air ou huile, naturel ou forcé

- Le rapport de transformation : élévateur ou abaisseur
- La forme du circuit magnétique : colonne ou galette (cuirassé)
- Type de respiration : hermétique ou respiration libre

I.5 Principe de fonctionnement

Un transformateur comprend essentiellement deux circuits électriques montés sur un circuit magnétique, l'un des circuits électriques dit enroulement primaire comporte N_1 spires étant raccordé à une source de tension alternatif U_1 , le courant I_1 qui traverse cet enroulement donne naissance à un flux ϕ_m dans le circuit magnétique. Ce flux induit une force électromotrice dans le deuxième enroulement dit « enroulement secondaire » de N_2 spires aux bornes duquel apparaît une tension U_2 [3].

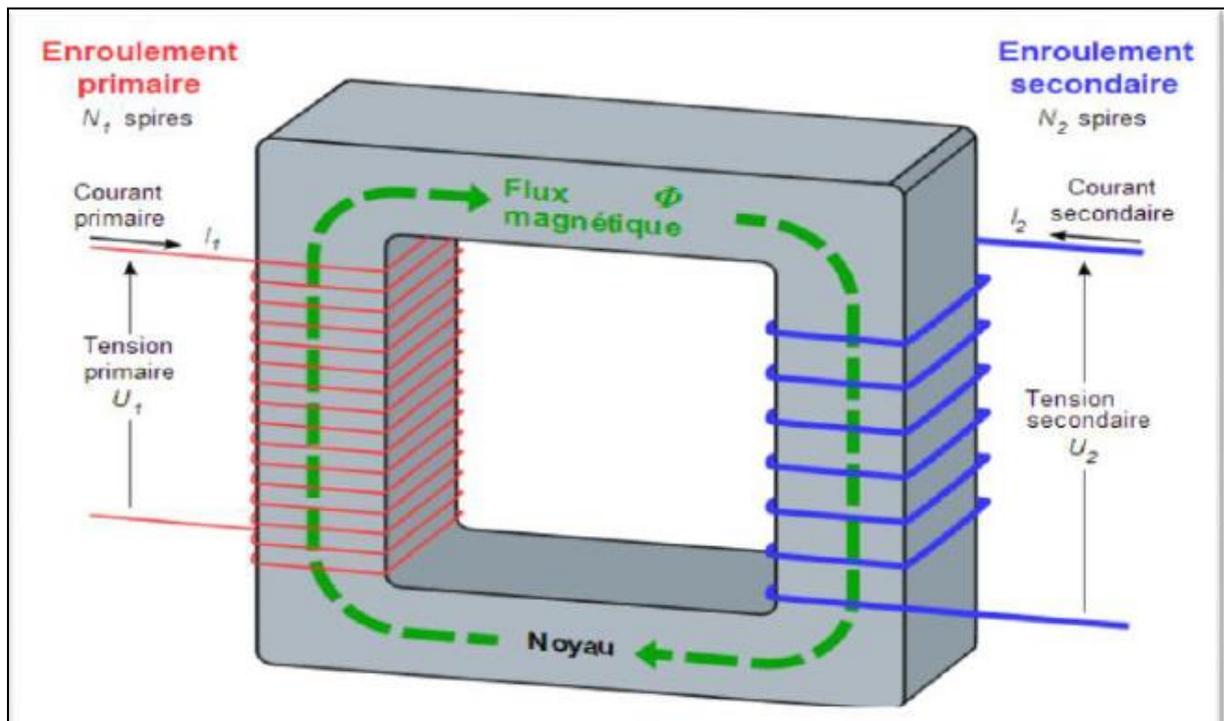


Figure I. 7 : Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance.

I.5.1 Schéma électrique équivalent

Schéma électrique monophasé de transformateur réel représenté ci dessous.

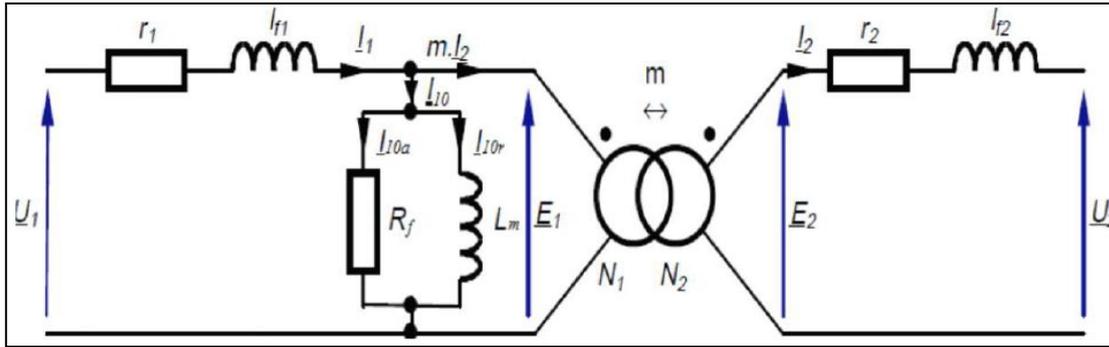


Figure I. 8 : Schéma électrique monophasé.

I.5.2 Essais sur les transformateurs

A partir de ces essais on peut déterminer les paramètres du circuit équivalent des transformateurs représentés dans la figure (I.8). Il s'agit des essais suivants [1].

I.5.2.1 Essais à vide

L'essai à vide consiste à appliquer la tension nominale en gardant le secondaire à vide ($I_2=0$). La mesure du courant, de la puissance et de la tension dans cet essai permet à déterminer les paramètres du circuit magnétique et les pertes fer. Les montages de mesure utilisés sont résumés dans le tableau (I.1).

Tableau I. 1 : Essai à vide.

	Cas monophasé	Cas triphasé
Circuit électrique		
Facteur de puissance	$\cos(\varphi) = \frac{P_0}{V_0 I_0}$	$\cos(\varphi) = \frac{P_0}{\sqrt{3} V_0 I_0}$
Résistance Shunt	$\frac{1}{R_f} = \frac{I_0}{V_0} \cos(\varphi)$	$\frac{1}{R_f} = \frac{I_0 - phase}{V_0 - phase} \cos(\varphi)$

Réactance shunt	$\frac{1}{X_m} = \frac{I_0}{V_0} \sin(\varphi)$	$\frac{1}{R_f} = \frac{I_0 - \text{phase}}{V_0 - \text{phase}} \sin(\varphi)$

I.5.2.2 Essai en court-circuit

L'essai en court-circuit permet de déterminer les paramètres électriques des enroulements et les pertes joule (pertes cuivre), consiste à appliquer la tension réduite (valeur minimale) au primaire en gardant le secondaire en court-circuit. Puis on augmente la tension primaire jusqu'à ce que le courant secondaire atteigne sa valeur nominale. On mesure le courant et la puissance de court-circuit. Les montages de mesure utilisés sont résumés dans le tableau (I.2).

Tableau I. 2 : Essai en court-circuit

	Cas monophasé	Cas triphasé
Circuit électrique		
Facteur de puissance	$\cos(\varphi) = \frac{P_{cc}}{V_{cc} I_{cc}}$	$\cos(\varphi) = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} V_{cc} I_{cc}}$
L'impédance équivalente	$Z_{eq} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \cos(\varphi)$	$Z_{eq} = \frac{I_{cc} - \text{phase}}{V_{cc} - \text{phase}} \cos(\varphi)$ $R_{eq} = \frac{P_{cc}}{3I_{cc}^2}$
Réactance série	$X_{eq} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \sin(\varphi)$	$X_{eq} = \sqrt{(Z_{eq}^2 - R_{eq}^2)}$

Les paramètres équivalent série peuvent être calculés en les ramenant au côté primaire ou secondaire.

I.5.3 Bilan de puissance

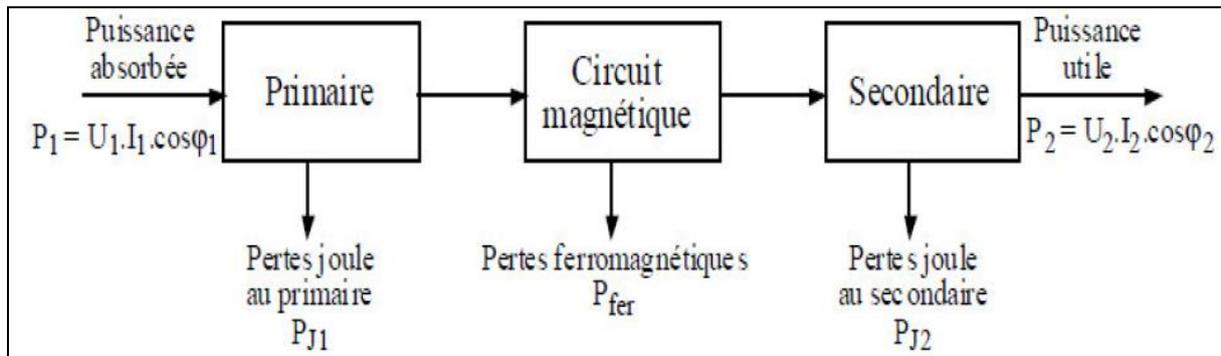


Figure I. 9: Schéma de bilan de puissance d'un transformateur.

Bilan de puissance égale :

$$P_1 = P_{J1} + P_{fer} + P_{J2} + P_2 \quad (I.1)$$

I.5.4 Rendement

Le rendement de transformateur par définition égale le rapport de la puissance fournie par le secondaire sur la puissance absorbée au primaire.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\text{puissance fournie par le secondaire}}{\text{puissance au primaire}} \quad (I.2)$$

I.6 Isolation dans les transformateurs de puissance

Le bon fonctionnement des transformateurs de puissance, repose en grande partie sur leurs isolations électriques. Ces derniers contiennent deux types d'isolants majoritaires :

- Un isolant liquide : huile.
- Un isolant solide : Papier et carton.

I.6.1 Isolation liquide

a. Huiles minérales

Les huiles minérales sont utilisées pour l'isolation des équipements électriques depuis la fin du 19ème siècle. Ces huiles sont très sollicitées dans les installations électriques, et dans les transformateurs de puissances pour leurs bonnes propriétés diélectriques et transfert de

chaleur, leur bonne compatibilité avec les isolants cellulose et leur faible coût (ces transformateurs peuvent contenir entre 40000 et 80000 litres d'huile) .Mis à part les transformateurs de distribution soumis à des contraintes de fonctionnement particulières, les transformateurs de puissance sont généralement remplis d'huile minérale. L'huile joue non seulement un rôle d'isolation électrique mais aussi de liquide de refroidissement. Les principales qualités exigées pour ces huiles sont donc :

- Une faible viscosité et un bas point d'écoulement pour assurer sa circulation.
- Un point d'éclair (ou point d'inflammabilité) élevé. Ces huiles possèdent un point éclair bas, entre 140 et 1500 C.
- Une bonne stabilité chimique essentiellement vis-à-vis des phénomènes d'oxydation et de décomposition.
- Une rigidité diélectrique élevée.

b. Huiles synthétiques

Les huiles synthétiques sont apparues durant la seconde guerre mondiale ; elles ont une durée de vie supérieure aux huiles minérales. Ces huiles sont utilisées chaque fois que des propriétés particulières sont recherchées. C'est le cas lorsqu'il s'agit d'améliorer la résistance au feu des transformateurs se trouvant à proximité de lieux sensibles tels que les aéroports et les hôpitaux (transformateurs de distribution et traction). Ces liquides de synthèse sont tous obtenus à partir des différents procédés de la pétrochimie. Il en existe trois types principaux destinés aux transformateurs :

- Les huiles Ester de pentaérythritol (Ester synthétique ou ester organique).
- Les huiles silicones.
- Les hydrocarbures chlorés (halogénés) tels que les PCB

c. Huiles végétales ou Ester naturel

Le chapitre deux est consacré aux huiles végétales.

I.6.2 Isolation solide

Elle est constituée des papiers et des cartons. Les papiers et les cartons sont des matériaux isolants possédant des caractéristiques diélectriques excellentes ; ces isolants

assurent plusieurs fonctions. Ils sont utilisés pour maintenir mécaniquement les bobinages et pour matérialiser les canaux de circulation du liquide de refroidissement. Afin d'augmenter leur rigidité diélectrique et réduire le risque de décharges partielles ; les papiers et les cartons sont imprégnés par le diélectrique liquide (huile).

I.7 Utilisation de transformateur de puissance

Les transformateurs de puissance sont des appareils très employés dans les réseaux électriques et les applications industriels [4].

- La sortie des centrales électriques,
- Transport d'énergie électrique,
- Distribution d'énergie électrique,
- les applications industrielles (transformateur de four et sous-station ferroviaires).

Un transformateur peut assurer deux fonctions :

- Elever ou abaisser une tension alternative monophasée ou triphasée,
- Assurer l'isolation entre deux réseaux électriques (isolation galvanique entre deux réseaux)

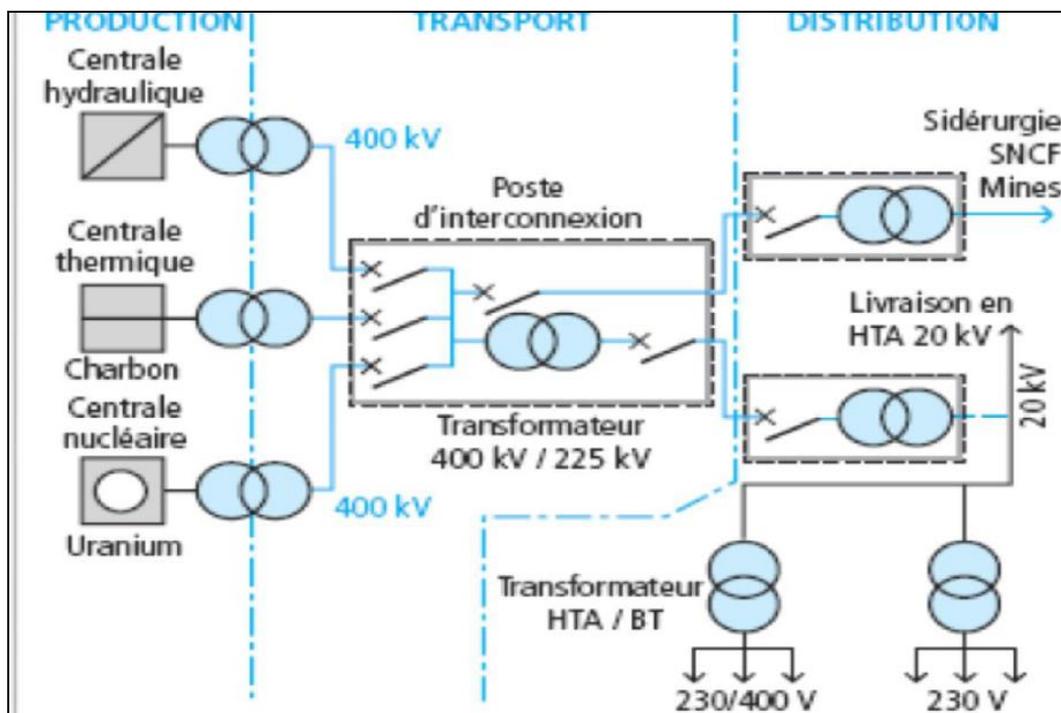


Figure I. 10 : Emplacement d'un transformateur dans le réseau électrique [4].

I.8 Techniques de diagnostic

L'utilisation des techniques de diagnostic, à une grande importance car elle permet d'évaluer l'état des composantes du transformateur et de programmer des activités préventives ou rectificatives, de manière à faciliter les programmes des travaux de maintenance et réduire l'indisponibilité [3].

I.8.1 Mesures électriques

Les mesures électriques effectuées sur les transformateurs sont utilisés comme outil de diagnostic de défaut [2], ces mesures sont :

a. Mesure de rapport de transformation

Il consiste à mesurer les rapports de transformation dans les différentes prises du régleur et les comparer avec les valeurs de conception pour valider les connexions intérieures. Des déviations indiquent des court-circuits entre spires, un circuit ouvert, des problèmes de connexion ou un défaut dans le régleur. Les mesures en monophasé peuvent être préférables pour la recherche de défauts, permettent ainsi de localiser précisément la phase en défauts, si existante.

b. Mesure de courant à vide

Le courant d'excitation d'un transformateur est le courant consommé lorsque l'un des enroulements est alimenté à une tension alors que le second est ouvert. Ce courant total à vide traverse une composante de magnétisation et une composante de perte [3].

L'essai du courant d'excitation permet d'évaluer la partie active du transformateur :

- Problème associé au noyau (des tôles coupées, des joints défectueux).
- Problème associé au bobines (des spires en court-circuité ou en circuit ouvert).

c. Mesure de la résistance d'enroulement

La résistance de chaque enroulement est mesurée en courant continu, si l'écart de la valeur mesurée de la résistance des enroulements est supérieur à 5% de la valeur de résistance l'enroulement à la sortie d'usine cela indique la présence d'un défaut de type coupure, au court-circuit entre spire ou un point chaud [3].

d. Mesure de la réactance de fuite

La mesure de la réactance de fuite ou impédance de court-circuit permet par comparaison à la valeur de mesures lors des essais en usine du transformateur de détecter des changements très importants (inférieur 5%) qui devraient nous amener à des investigations plus profondes (circuit ouvert ou des court-circuits entre spires, ou entre enroulements et cuve) [3].

e. Analyse de la réponse en fréquence

L'analyse de la réponse en fréquence d'un enroulement donné, alimenté par une tension à fréquence variable de quelques Hz à quelques MHz, donne une signature fréquentielle unique d'un enroulement par rapport à son environnement mécanique et électrique [3].

I.8.2 Mesures diélectriques

Les isolants des équipements sont soumis à un vieillissement donnant lieu à une perte progressive de leurs caractéristiques diélectriques. La perte des caractéristiques diélectriques peuvent être la cause des défauts dans le transformateur [2].

L'objectif de ces mesures est de déceler d'éventuelles dégradations dans l'isolement du transformateur afin de pouvoir intervenir avant la survenue d'un incident due à une avarie.

a. Mesure facteur de dissipation et la capacité

le but de ces mesures est d'étudier l'état d'isolation (vieillessement de l'huile, l'augmentation de la tenue en eau) des transformateurs de puissance et leurs traversées sont effectuées entre les enroulements et entre les enroulements et la cuve les bornes sont mises en court-circuit et la tension d'essai est appliquée à l'un des enroulement pendant que le courant à travers l'isolation est mesuré sur l'enroulement opposé ou sur la cuve, sur les traversées la tension est appliquée au conducteur principal pendant que l'on mesure le courant sur la prise de mesure [2].

b. Résistivité

Elle est sensible aux contaminants et aux produits de décomposition provenant du vieillissement de l'équipement. La résistance mesurée en continu peut apporter de précieuses informations sur d'éventuelle présence de porteurs de charges, conséquence d'une dégradation de décharges partielles. De manière générale, les résistivités dépendent de la température, de l'humidité, du champ appliqué et du temps d'application de la tension.

c. Mesures des décharges partielles (DP)

Les phénomènes de décharges électriques partielles (DP), tels que définis par la norme IEC 60270, sont des décharges disruptives localisées d'une petite partie d'un système d'isolement électrique solide ou liquide sous effet d'une forte contrainte de tension. Si une DP ne conduit pas immédiatement à la mise hors service d'un appareil, elle est toutefois préjudiciable dans la mesure où elle conduit à une dégradation des matériaux (en particulier solides) sous l'action de diverses contraintes (thermique, chimique...). Les DP peuvent être déclenchées par des vides, des fissures ou des inclusions dans un diélectrique solide, aux interfaces dans les diélectriques solides ou liquides par des bulles dans les diélectriques liquides ou à la limite entre différents matériaux isolants.

f. Rigidité diélectrique

La rigidité de l'huile dépend de la concentration, de la taille, de la forme et du type de particule ainsi que du degré d'humidité dans l'huile. Elle représente la valeur maximum du champ électrique que l'huile supporter avant le déclenchement d'un arc électrique (donc d'un court-circuit). On utilise aussi l'expression champ disruptif qui est synonyme mais plus fréquemment utilisée pour qualifier la tenue d'une installation, alors que le terme rigidité diélectrique est plus utilisé pour qualifier un matériau. La valeur maximale de la tension électrique appliquée est appelée *tension de claquage*. *Dans ce travail, Nous allons simuler la cellule de claquage (sert à mesurer la tension de claquage des huiles isolantes). Cette cellule est utilisée par la norme ASTM.*

I.8.3 Techniques physico-chimiques

Les analyses physico-chimiques ont pour but de déterminer la tenue diélectrique de l'huile et son état d'oxydation, nous allons citer quelques techniques des plus utilisées dans les domaines d'électrotechnique.

a. Mesure de la teneur en eau

Plusieurs méthodes de mesure directe de la teneur en eau ont été élaborées. On a utilisé un capteur capacitif à couche mince pour mesurer l'humidité dans l'huile. Il y a eu aussi un intérêt considérable pour les techniques de la spectroscopie infrarouge proche (NIR). Gupta a mentionné que la technique NIR est capable de détecter même des faibles variations de la teneur en eau dans le papier isolant

b. Analyse des gaz dissous

Le gaz chromatographe (GC) est largement utilisé pour l'analyse des gaz dissous dans l'huile isolante (ASTM D3612). En service, le transformateur peut produire les gaz suivants :

- Gaz d'hydrocarbure et d'hydrogène : méthane (CH₄), éthane (C₂H₆), éthylène(C₂H₄), acétylène (C₂H₂), et hydrogène (H₂);
- Oxydes du carbone : monoxyde du carbone (CO) et dioxyde du carbone(CO₂).

L'apparition d'un défaut conduit à la dégradation de l'isolation dans le transformateur ; le défaut induit des composés gazeux de faible poids moléculaire solubles dans l'huile. La tendance des données de l'analyse des gaz dissous permet de savoir le taux de génération des gaz et permettent d'obtenir des renseignements sur la nature de la contrainte, son intensité et le type de matériaux affectés.

Il existe plusieurs méthodes d'interprétation de ces analyses de gaz dissous, les plus utilisés sont :

- Key Gas Method, David Pugh 1974;
- Duval's Triangle, Michel Duval 1974 ;
- Rogers Ratios, R. R. Rogers 1975 ;
- Dörnenburg Ratios, E. Dörnenburg 1967/1970;
- IEEE C57.104, Limits, rates and TDCG, 1978/1991;
- IEC 60599 Ratios, Limits and gassing rates, 1999.

c. Nombre total d'acides (TAN)

Permet de détecter la présence de composés acides produits par l'oxydation de l'huile. La détermination de l'acidité à une grande importance, elle permet de suivre l'altération de l'huile, de donner une idée claire sur son degré d'oxydation et de décider du moment où elle doit être mise hors service. Elle est due à la présence de produits hydrocarbures acides tels que les carboxyliques et hydroxyliques dont la formation est favorisée sous l'effet de la température, de la pression et de l'oxygène. La procédure de préparation et de mesure est expliquée dans l'ASTM D664.

d. La tension interfaciale (IFT)

La mesure de la tension interfaciale IFT pour évaluer de l'état de l'isolation.

e. Méthodes d'analyse spectrale

Nous regroupons les méthodes de spectrophotométrie, basées sur l'étude de l'interaction entre le rayonnement (énergie et la matière), telles que la spectrométrie d'absorption infrarouge (IR), la spectrométrie d'absorption dans l'ultraviolet et le visible (UV-Visible), les méthodes de spectroscopie ionique comme la spectrométrie de masse (MS) et les méthodes nucléaire (RMN).

- **La spectrophotométrie infrarouge** : Elle permet d'identifier la nature des liaisons chimiques intermoléculaires. En effet, les bandes d'absorption infrarouge (LR) (vibration et rotation) sont caractéristiques des différents groupes fonctionnels absorbants à une longueur d'onde donnée.

Présentement, il y a eu un intérêt considérable à l'étude de la spectroscopie infrarouge à Transformée de Fourier (ou FTIR pour *Fourier Transformed InfraRed Spectroscopy*) pour la caractérisation de l'état de dégradation du papier cellulose.

- **Spectrophotométrie UV-Visible** : Cette technique est utilisée pour la caractérisation des huiles de transformateurs.

- **Résonance magnétique nucléaire (RMN)**: La RMN donne des informations précises sur la structure, la conformation et la configuration électronique ainsi que sur la dynamique de réorientation des molécules. La plus commune des applications de la RMN est l'identification de la structure des composés organiques.

- **Spectrométrie de masse (S.M)** : L'application la plus connue de la spectrométrie de masse (S.M.) à l'analyse des huiles minérales est la méthode ASTM D 2425. Cette méthode permet d'estimer la composition moyenne en hydrocarbures des divers distillats (204 à 343°C).

- **Degré de polymérisation (DPV)** : Dans l'industrie électrique, la détermination du degré de polymérisation moyen (DPV) de la cellulose se fait souvent par une méthode viscosimétrique après dissolution de la cellulose dans la cupriéthylènediamine. Le principe de la méthode est décrit dans la norme D4243 d'ASTM. Le degré de polymérisation pour le papier cellulose correspond au le nombre des monomères anhydro p- glucose, dans une molécule de cellulose.

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté de manière générale les transformateurs de puissance, en commençant par les types et les composants des transformateurs ensuite nous avons expliqué le principe de fonctionnement de ces machines ainsi que leurs applications. Les méthodes de diagnostic sont aussi présentées dans ce chapitre, certaines techniques sont déjà utilisées sur le terrain par les entreprises, La mesure de la tension de claquage c'est une des méthodes de diagnostic des transformateurs ; cette méthode donne plus d'informations sur la qualité de l'huile. Notre principal objectif est le calcul la tension de claquage de l'huile végétale à l'aide du logiciel Comsol.

Chapitre II : Les huiles végétales

II.1. Introduction

Les liquides isolants sont utilisés dans divers équipements électrotechniques tels les transformateurs (puissance, distribution), les condensateurs, les câbles, les disjoncteurs, etc... Les caractéristiques d'un isolant liquide dépendent du type d'application à laquelle on le destine, aussi la connaissance la plus complète possible des propriétés de tels matériaux s'avère être une exigence dans leur choix de leur destination. Les principales propriétés relatives des liquides en électrotechnique concernent :

- Leurs propriétés électriques et diélectriques (permittivité, résistivité, rigidité diélectrique, etc...);
- Leur comportement durant le service caractérisé par leur vieillissement (stabilité vis-à-vis des contraintes thermiques, chimiques ou autres);
- Leurs propriétés physico-chimiques et thermodynamiques (viscosité, capacité thermique, point éclair, etc.);
- Le comportement du produit vis-à-vis du feu peut s'avérer un paramètre important dans certains cas ;
- Les comportements toxicologiques (biodégradabilité, toxicité, etc.) revêtent, depuis quelques années une importance de plus en plus grande.

II.2. Liquides isolants

II.2.1. Rôle des huiles isolantes dans un transformateur

Les huiles isolantes sont utilisées en électrotechnique comme imprégnant d'isolations cellulosiques ou comme produit de remplissage de matériels électriques très divers. Leur rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer la tenue diélectrique de l'isolation, la rigidité diélectrique des liquides étant nettement supérieure à celle des gaz. Cependant, dans beaucoup d'applications, elles servent à la fois à améliorer les propriétés diélectriques et à évacuer la chaleur générée dans les bobinages.

Les transformateurs remplis d'huile ont été développés depuis plus d'un siècle. Cette technologie est toujours très utilisée dans les transformateurs de puissance contrairement aux transformateurs de distribution, qui eux peuvent être "secs". Aussi, différentes raisons expliquent cette préférence [5] :

- Par rapport à l'air, les liquides refroidissent et isolent beaucoup mieux le transformateur. Ainsi, les transformateurs immergés sont plus compacts que les transformateurs secs de même puissance.

- L'air permet d'obtenir des performances diélectriques équivalentes aux liquides, mais à des coûts beaucoup plus élevés.

- Les isolants solides utilisés seuls, présentent des risques énormes aux décharges partielles (inclusions gazeuses) pour les niveaux de tension des transformateurs de puissance.

- Les analyses d'huile (teneur en eau, analyse de gaz,...) permettent de diagnostiquer l'état du transformateur à moindre coût.

- Les transformateurs immergés sont moins bruyants que ceux de type secs et provoquent ainsi moins de nuisance sonore.

Dans un transformateur, les huiles isolantes assurent plusieurs fonctions :

II.2.1.1. Fonction d'isolation

Dans la partie active d'un transformateur, l'isolation entre les éléments portés à des potentiels électriques différents est assurée :

- Soit par un diélectrique liquide, exemple des pièces métalliques telles les pièces de connexions.

- Soit par une couche solide (papier ou carton) imprégnée de diélectrique liquide, c'est le cas par exemple de l'isolation entre deux conducteurs voisins d'un même enroulement.

- Soit par une isolation mixte : combinaison de films de diélectrique liquide et de barrières d'isolants solides.

Les principales propriétés qui permettent de juger de l'aptitude d'une huile à remplir sa fonction isolante sont la rigidité diélectrique, le facteur de dissipation ou facteur de perte

($\tan \delta$), la permittivité diélectrique et la résistivité. Ces caractéristiques sont essentielles pour le dimensionnement d'un transformateur [6].

II.2.1.2.Fonction transfert de chaleur

Bien que les transformateurs électriques présentent un excellent rendement (99 à 99.9%), ils n'échappent pas à la perte d'énergie qui accompagne toute conversion. L'énergie perdue se dissipe sous forme de chaleur. L'évacuation de la chaleur vers l'extérieur nécessite

une connaissance de l'élévation maximale des températures des différents éléments du transformateur afin d'assurer un équilibre entre la vitesse de production et d'évacuation de la chaleur. La chaleur est évacuée par la circulation naturelle ou forcée de l'huile. Un dispositif de refroidissement bien dimensionné permette d'éviter la formation de points chauds grâce à une circulation importante et bien régulée de l'huile. Le refroidissement se fait par convection et par conduction thermique. Les principales caractéristiques qui permettent de juger de l'aptitude d'une huile à évacuer la chaleur sont la viscosité, la conductivité thermique et la chaleur spécifique.

II.2.1.3. Autres fonctions

Les huiles peuvent être aussi utilisées pour leur pouvoir extincteur d'arcs électriques (dans les chambres de coupure des commutateurs en charge et de certains disjoncteurs), en raison de leur pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement (sélecteurs de prises, pompes immergées) et dans certains cas pour améliorer la résistance au feu, comme c'est le cas dans les transformateurs de distribution proche de la population. Enfin, elles servent à ralentir l'oxydation directe de l'isolation cellulosique

II.3. Huiles isolantes

Les huiles isolantes sont classées selon leurs origines. On distingue trois types: les **huiles végétales** (produits naturels), les **huiles minérales** (à base de produits pétroliers raffinés) et les **liquides de synthèse**. Cette classification est liée à leur ordre d'apparition chronologique dans les applications électrotechniques. Dans ce chapitre nous intéressons aux huiles végétales

II.3.1. Huiles végétales

Une huile végétale est une matière extraite à partir des graines et des fruits des plantes oléagineuses insoluble dans l'eau à température ambiante.

Les huiles végétales peuvent être classées en 3 grandes catégories :

✓ **Huiles végétales comestibles**

Ces huiles sont des denrées alimentaires qui se composent essentiellement de glycérides d'acides gras exclusivement d'origine végétale. Elles peuvent contenir en faible quantité d'autres lipides comme les phosphatides, des constituants insaponifiables et les acides gras libres naturellement présents dans la graisse ou l'huile.

✓ Huiles vierges

Ces huiles sont obtenues sans modification de leur nature, avec des procédés mécaniques, par exemple expulsion ou pression, et d'un traitement thermique. Elles peuvent être purifiées uniquement par lavage à l'eau, décantation, filtrage et centrifugation.

✓ Huiles pressées à froid

Ces huiles sont obtenues, sans modification de leur nature, par des procédés mécaniques, par exemple expulsion ou pression et sans utilisation de procédés thermiques. Elles peuvent être purifiées uniquement par lavage à l'eau, décantation, filtrage et centrifugation.

II.3.1.1. Composition chimique des huiles végétales

Les huiles végétales ont été les premières huiles isolantes utilisées pour l'appareillage électrique ; la première des applications fût l'imprégnation des condensateurs avec l'huile de ricin. Elles sont essentiellement constituées de triglycérides, c'est à dire un triester sachant que la formule d'un ester est $R-COO-R'$. Les huiles végétales portent aussi le nom d'esters naturels ou d'huiles végétales (par opposition aux esters synthétiques ou organiques) car elles sont synthétisées naturellement par tout organisme vivant et peuvent provenir de différentes semences telles que le tournesol, le colza, le soya....

Les huiles esters végétales sont obtenues par estérification d'un tri-alcool simple, avec trois acides gras. Ces acides sont mono carboxyliques (de formule $R-COO-H$), à chaîne linéaire non branchée comprenant un nombre pair d'atomes de carbone. Ils peuvent être saturés ou insaturés et parfois hydroxylés. Les triglycérides sont obtenus par trituration (broyage et pression) des graines. La réaction d'estérification d'une huile végétale est la suivante (Figure II.1), Un des grands atouts de ces huiles est leur excellente biodégradabilité qui malheureusement en contrepartie leur confère une grande sensibilité à l'oxydation [7]

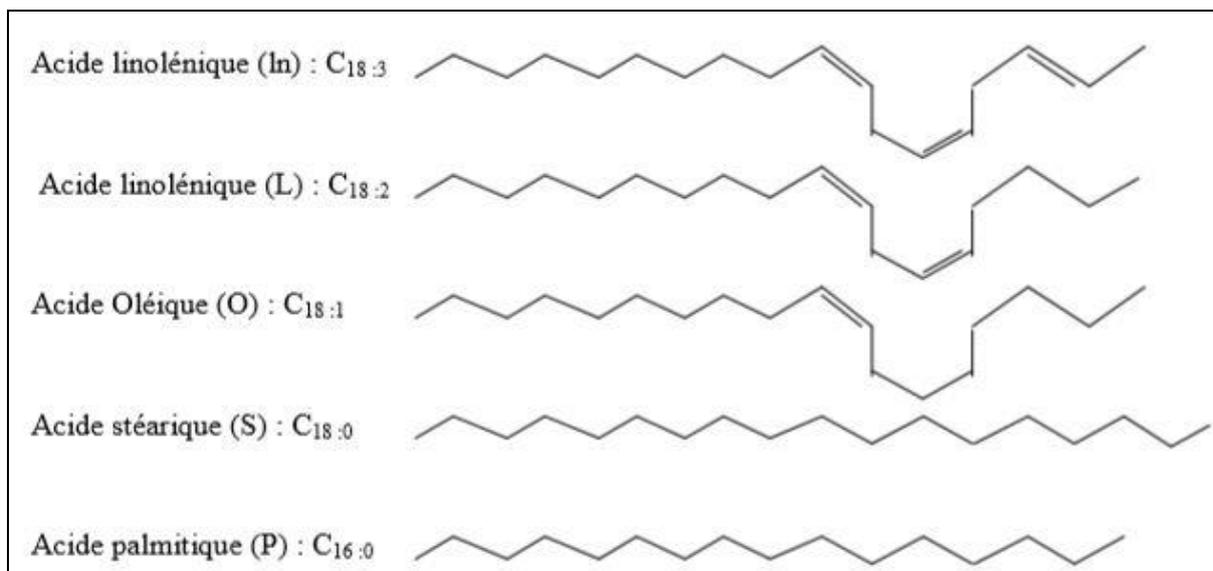


Figure II. 2 : Les acides gras majoritairement présents dans les huiles végétales

Dans les acides gras présentes dans huiles végétales et à température ambiante, les double liaisons adoptent la configuration Z (cis) [8]. La nomenclature officielle voudrait que l'on appelle les isomères cis/trans : « isomères Z/E ». Cependant, dans le cas des acides gras insaturés, la confusion n'est pas possible du fait de l'absence de ramification et d'hétéroatomes. Un isomère cis est toujours Z et un isomère trans est toujours E les auteurs continuant d'employer généralement la notation cis/trans

II.4. Rôles et intérêt des huiles végétales

II.4.1. Rôles physiologiques

Sources de lipides pour l'organisme, les huiles végétales jouent un rôle primordial dans l'organisme. Ils participent au renouvellement des membranes cellulaires et interviennent dans le fonctionnement de plusieurs systèmes physiologiques (cardiovasculaire, immunitaire, agrégation plaquettaire, rénal...).

Les huiles végétales sont également conductrices de plusieurs vitamines dans le corps humain, notamment de vitamine E qui est recommandée pour ses vertus antioxydantes. Elle neutralise les radicaux libres et prévient de ce fait le vieillissement des cellules (derme, globules rouges, vaisseaux sanguins, ...).

II.4.2. Rôles nutritionnel

En 2010, l'AFSSA (Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments) devenue l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du

travail) a réévalué l'apport lipidique à 35% à 40% des Apports Nutritionnels Conseillés (ANC).

Les huiles végétales, quelle que soit leur provenance, ont une valeur énergétique de 9 kcal/gr soit 37,6 kj. Elles ont un réel intérêt pour le corps humain. Les graisses présentés dans les huiles, notamment les mono insaturées et les polyinsaturées, apportent les omégas (3, 6,9) et les vitamines (A, D, E) utiles au bon fonctionnement de l'organisme.

Les huiles végétales ne sont surtout pas à proscrire dans les régimes alimentaires. Elles permettent en effet, de contrebalancer les graisses dites saturées, cachées dans notre alimentation (lait, beurre, viande, fromage...). Consommées en excès, celles-ci engendrent en effet, des déséquilibres physiologiques (mauvais cholestérol, artères bouchées, vieillissement prématuré des cellules...).

II.4.3. Rôles Isolants

Pour des raisons économiques (épuiement des ressources en pétrole, augmentation progressive de son prix) et aussi écologiques (biodégradabilité), de nombreuses recherches tentent de trouver des huiles végétales de substitution. Ce type d'huile présente une viscosité plus élevée que les huiles minérales et notamment un point d'écoulement assez haut (aux alentours de -20°C), ce qui limite le transfert de chaleur et restreint leur usage aux pays où le climat n'est pas trop froid. Enfin, les huiles végétales neuves ont des propriétés électriques voisines de celles des huiles minérales, bien que leur résistivité soit moins élevée.

Le groupe EDF (Électricité de France) a mis en service en 2008, douze transformateurs isolés à l'huile de colza, dans la région Poitou-Charentes.

II.5. Avantages et inconvénients des huiles végétales

II.5.1. Avantages

- Une classification «biodégradabilité facile» selon la norme OCDE 301.B. Ils se caractérisent par une biodégradabilité supérieure à 97% après seulement 21 jours d'exposition à l'air, et une non-toxicité, qui en font des produits à faible empreinte carbone, non dangereux pour l'environnement et la santé des vivants.

- Pour les esters naturels classés K (point de feu > 300°C), une simplification des dispositions contre les risques d'incendie (norme NF C 17-300), évitant l'installation de transformateurs secs dans de nombreux cas. Dans tous les cas où la classe K n'est pas indispensable et où la substitution par rapport à une huile minérale est essentiellement dictée par des conditions environnementales, nous préconisons l'utilisation d'un ester végétal à

faible viscosité. Les températures ambiantes d'utilisation du transformateur (de -25 à +40°C) permettent alors une utilisation en extérieur sans aucune réserve, et le dimensionnement de l'appareil reste conventionnel.

- Une augmentation significative de la durée de vie du transformateur, grâce à une grande stabilité thermique et une aptitude à «assécher» les isolants celluloseux durant l'exploitation du transformateur.

- De très bonnes propriétés diélectriques contribuant à la fiabilité de l'appareil.

- Des encombrements, masses et caractéristiques qui restent inchangés.

- Résistance supérieure à la carbonisation et à la formation de dépôt, 40 fois plus que l'huile minérale. Pas de sulfure corrosif.

- Produit éprouvé en laboratoire et sur le terrain depuis plus de 10 ans

- Facilement recyclable avec valeur résiduelle

- Durée de vie des papiers de 5 à 8 fois supérieure où la température de fonctionnement plus haute

- Tenue aux surcharges renforcées

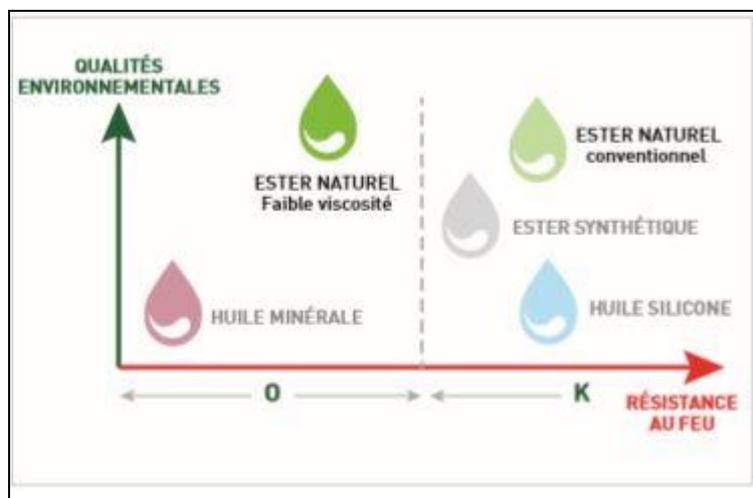


Figure II. 3 : Comportement d'une huile végétale.

II.5.2. Inconvénients

- la stabilité physico-chimique : les huiles végétales sont généralement moins stables chimiquement (oxydation) et plus sensibles aux rayonnements ultraviolets que les huiles minérales (raison pour laquelle on met les huiles alimentaires dans des bouteilles opaques).

- Les huiles végétales passent pour être plus chères que les huiles minérales : à voir à l'avenir, selon l'évolution des prix du pétrole.

- les huiles végétales se solidifient vers 15°C. Une entreprise québécoise (Oléotek) a développé une huile végétale liquide jusqu'à -75°C

II.6. Propriétés des huiles végétales isolantes

Les caractéristiques et les propriétés d'une huile végétale isolante peuvent être classées en plusieurs catégories. Les huiles isolantes pour transformateurs, quel que soit leur type, doivent toujours répondre à plusieurs critères électriques et physiques pour assurer l'isolation électrique et le transfert de chaleur.

II.6.1. Propriétés électriques

Les propriétés électriques des liquides dépendent de leur formulation (composition, constitution moléculaire,...etc.) et de leurs conditions d'utilisation ou conditionnement. Il faut éliminer de tout ce qui ne constitue pas le liquide lui-même : résidus de synthèse, particules ,gaz, molécules d'eau .Ces impuretés peuvent être plus ou moins éliminées par des opérations de traitement qui comprennent des phases de déshydratation et de dégazage sous vide et à des températures bien déterminées , ainsi que des opérations de filtrage de l'ordre du micromètre. La permittivité relative, la résistivité, le facteur de pertes $\tan \delta$ et la rigidité diélectrique sont les caractéristiques électriques principales d'une huile isolante. Outre la structure du liquide et son conditionnement ses propriétés dépendent de la tension appliquée, de la fréquence et de la température.

II.6.1.1. Permittivité relative

La constante diélectrique ou constante électrique, également nommée permittivité du vide ou encore permittivité diélectrique du vide, est une constante physique. Elle est notée par ϵ_0 .

Soit un condensateur plan à vide (ou à air) :

Sa capacité est

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{e} \quad (\text{II.1})$$

Où

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m est la permittivité absolue du vide (ou de l'air). Si le même condensateur est rempli par un isolant, sa capacité devient

$$C = \varepsilon_r C_0 = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{S}{e} \quad (\text{II.2})$$

La permittivité relative est définie par le rapport :

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (\text{II.3})$$

La permittivité absolue est :

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (\text{II.4})$$

Pour l'air, les gaz et le vide :

$$\varepsilon_r = 1. \text{ Donc, } \varepsilon = \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m.} \quad (\text{II.5})$$

Pour tous les autres isolants : $\varepsilon_r > 1$.

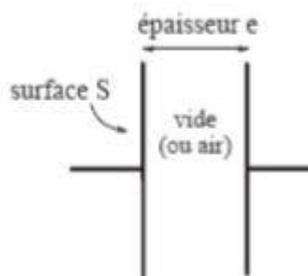


Figure II. 4 : Schéma d'un condensateur,

La permittivité est une caractéristique intrinsèque car elle dépend essentiellement de la structure chimique du produit. Elle caractérise la polarité de la molécule.

La permittivité décroît avec l'augmentation de la température et de la fréquence. La contrainte électrique la plus élevée est toujours supportée par le milieu dont la permittivité est plus faible. En général, pour les liquides isolants utilisés dans l'industrie et notamment les huiles végétales, la constante diélectrique est comprise entre 2 et 5.

II.6.1.2. Résistivité / Conductivité

Pour être un isolant électrique, l'huile doit conduire le moins possible le courant électrique lorsqu'une tension lui est appliquée. Sa conductivité σ doit donc être la plus faible possible, ou à l'inverse sa résistivité ρ ($\Omega \text{ m}$) doit être la plus forte possible ($\rho=1/\sigma$)

La conductivité d'un liquide augmente donc quand la température augmente. Les données disponibles dans la littérature ne dépassent pas 80°C pour les huiles végétales. En 2008, Brock et al, définirent les conductivités thermiques ainsi que la diffusivité thermique pour l'huile de tournesol et de soja de 20°C à 70°C . Balderas Lopez et al. mesurèrent en 2013 la diffusivité thermique de liquide par photo-acoustique et en estimèrent la conductivité thermique d'huiles végétales à température ambiante. En 2009, Turgut et al, définirent les conductivités thermiques de 25°C à 80°C pour les huiles de tournesol, de maïs et d'olive par la méthode du fil chaud. La méthode photo-acoustique permet d'estimer une conductivité thermique d'huile de tournesol de $0,17 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \pm 0,02$ et pour l'huile de soja de $0,15 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \pm 0,03$ à température ambiante. Brock et al. indiquent une variation de la conductivité thermique de l'huile de tournesol de $0,165 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \pm 0,010$ pour 21°C à $0,155 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \pm 0,018$ pour $68,7^\circ\text{C}$. L'huile de soja, quant à elle, possède une gamme allant de $0,180 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \pm 0,012$ pour 21°C et $0,160 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \pm 0,009$ pour $69,5^\circ\text{C}$.

II.6.1.3. Facteur de pertes diélectriques ($\tan \delta$)

C'est un facteur exprimant les pertes d'énergie dissipées dans le liquide diélectrique lorsqu'il est soumis à un champ électrique. Ces pertes sont dues aux courants de fuite qui traversent le diélectrique. Le facteur de dissipation diélectrique est une valeur adimensionnelle et directement liée à la résistivité et à la permittivité en tension alternative. La présentation des pertes diélectriques par un schéma équivalent (condensateur C et résistance R en parallèle) permet d'avoir :

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

Pour un isolant parfait, c'est-à-dire ($\sigma = 0$), la différence de phase ϕ entre la tension appliquée et le courant qui en résulte est : $\phi = \pi/2$.

Le facteur de dissipation se définit comme la tangente de l'angle de pertes, c'est-à-dire l'angle pour lequel la différence de phase entre la tension appliquée et le courant qui en résulte dévie de $\pi/2$ lorsque le diélectrique du condensateur se compose exclusivement du liquide isolant considéré comme parfait. En effet, en situation réelle, ($\phi + \delta = \pi/2$)

Où δ est appelé l'angle de perte (δ est le complémentaire de l'angle de déphasage entre le courant et la tension). Plus est élevé plus les pertes diélectriques sont élevées.

La figure II.5 est une représentation schématique de l'angle de perte :

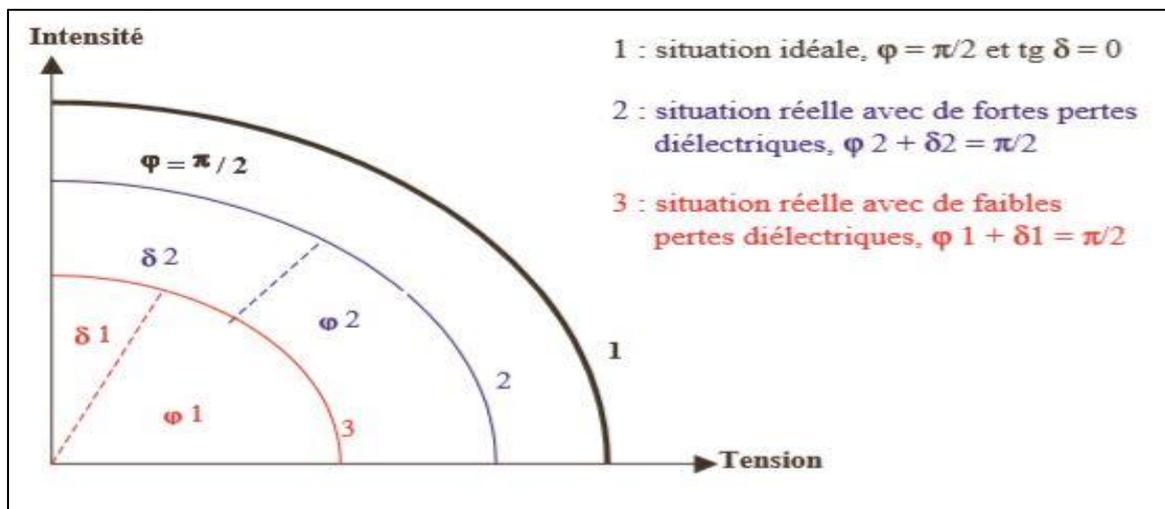


Figure II. 5 : Représentation schématique de l'angle de pertes [9].

Le facteur de pertes diélectriques est plus élevé que celui de l'huile minérale mais cette différence est réduite dans des huiles vieilles. Le facteur de dissipation diélectrique avait augmenté d'un facteur d'environ 100 pour une huile végétale selon Borsi et al.

II.6.2. Propriétés physico-chimiques

II.6.2.1. Densité

La densité des huiles isolantes est le rapport de deux poids d'un même volume d'huile et d'eau. Déterminée dans des conditions spécifiques de température, sa valeur est inférieure à celle de l'eau et dans les régions froides elle doit être la plus faible possible pour éviter la formation de glace à la surface. [10]. Généralement, la densité relative de la plupart des huiles, qu'elles soient minérales ou végétales, se situe entre 0.840 et 0.960. La densité des huiles végétales est donnée par le tableau II.1 suivant correspond à la densité relative à l'eau à une température de 20° C, à l'exception de la densité des huiles de palme et de coco qui sont prises respectivement à 50° C et 40° C.

Tableau II. 1 : la densité relative des huiles végétales

Type d'huile	Densité relative
Huile de tournesol	0.918 - 0.923

Huile de soja	0.919 - 0.925
Huile de cacahuète (arachide)	0.912 - 0.920
Huile d'olive	0.913 - 0.916
Huile de palme	0.891 - 0.899
Huile de coco	0.908 - 0.921
Huile de maïs	0.917 - 0.925
Huile de colza	0.910 - 0.920
Huile de lin	0.926 - 0.930
Huile de coton	0.918 - 0.926
Huile de carthame	0.922 - 0.927

Si l'on souhaite connaître la densité absolue en kg/m^3 , par exemple, nous avons seulement besoin de savoir quelle est la densité de l'eau à 20° C, celle-ci étant de l'ordre de 998,30 kg/m^3 . Pour obtenir la densité absolue de l'huile en kg/m^3 , il suffit simplement de multiplier la densité relative de l'huile par la densité de l'eau.

II.6.2.2. Point d'écoulement

C'est la température à laquelle l'huile ne coule plus. Elle est de l'ordre de 3°C pour la jatropha dans la littérature. Il donne une idée sur la capacité de circulation de l'huile à froid.

Le point d'écoulement est déterminée selon la norme ISO 6321: 2002 pour toutes les huiles ; ou AOCS Cc 3b-92 (02) pour toutes les huiles sauf les huiles de palme ; AOCS Cc 3-25 (97) pour les huiles de palme uniquement.

II.6.2.3. Point d'éclair et de feu

Le point d'éclair est la température à laquelle les substances volatiles sont produites à un rythme qui leur permet d'être enflammées au contact d'une source de chaleur : flamme, étincelle. Le point de fumée peut être déterminé selon la norme BS 684-1.8:1976. Le point d'éclair est donné par le tableau II.2.

Tableau II. 2 : Le point d'éclair de quelques huiles végétales

Type d'huile	Point d'eclair (° C)
Huile de tournesol raffiné	107
Huile de palme concrète	240
Huile de cacahuète (arachide)	232
Huile de soja raffiné	232

II.6.2.4. Viscosité

La viscosité est une mesure de résistance à l'écoulement d'un fluide ; exprimée en mm^2/s . Elle a une grande influence sur l'efficacité de l'échange thermique. Plus la viscosité est basse, mieux est la circulation d'huile et l'évacuation de chaleur plus efficace. La viscosité est donnée par le tableau II.3.

Tableau II. 3 : La viscosité de quelques huiles végétales.

Type d'huile	Viscosité (mm^2/s)
Huile de tournesol raffiné	66
Huile d'olive	84
Huile de cacahuète (arachide)	84
Huile de soja raffiné	57-76

II.6.2.5. Teneur en eau

Les propriétés électriques des huiles isolantes sont affectées par leur teneur en eau. L'eau peut se trouver dans l'huile du transformateur sous trois formes. Dans la pratique, l'eau se dissout dans l'huile, comme il peut être fixé à certaines molécules d'huile par des liaisons chimiques faibles, surtout pour l'huile la plus dégradée ou encore sous forme libre ou gouttelettes lorsque l'humidité dans l'huile dépasse la valeur de saturation. La solubilité de l'eau qui représente la teneur à saturation dans l'huile, exprimée en ppm ou mg/kg,

L'huile végétale présente une teneur en eau beaucoup plus importante que l'huile minérale. Le tableau II.4 présente la teneur d'eau de l'huile RS50 en fonction de la température. RS50 une huile végétale modifiée a été développée par EDF à partir d'une huile de colza

Tableau II. 4 : Teneur en eau de l'huile RS50

Température ($^{\circ}\text{C}$)	Limite de saturation (ppm)	
	Huile minérale	RS50
20	43	760
40	107	1326
60	216	1904

II.6.2.6. Tension interfaciale

C'est la force nécessaire pour rompre le mince film qui sert d'interface entre l'huile et l'eau. Sa mesure est très délicate, mais elle peut, en association avec le facteur de dissipation diélectrique, donner un signal d'avertissement précoce de début de dégradation d'une huile.

II.7. Conclusion

Les huiles végétales, aussi appelées huiles ester naturel, sont une alternative biodégradable aux huiles minérales. Ce chapitre inclut de manière générale la définition des huiles végétales, leurs rôles et intérêts dans le domaine industriel, leurs avantages et inconvénients. Les points suivants dans le chapitre donnent les propriétés électriques, diélectriques et physico-chimiques des huiles végétales.

Chapitre III : COMSOL Multiphysics

III.1. Introduction

La simulation numérique est devenue un élément indispensable dans les domaines des sciences et de l'ingénierie. Elle permet de comprendre et de modéliser le fonctionnement des systèmes réels.

Aujourd'hui une large gamme d'outils numériques est disponible. Elle repose sur la mise en œuvre des modèles théoriques utilisant différents outils mathématiques dont la technique des éléments finis. La simulation numérique permet d'étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution.

Il est très intéressant d'avoir un environnement de simulation qui inclut la possibilité d'ajouter différents phénomènes physiques au modèle étudié. C'est dans cette philosophie que Comsol Multiphysics a été développé. C'est un logiciel de calcul numérique par éléments finis modulaire permettant de modéliser une grande variété de phénomènes physiques caractérisant un problème réel. Il sera également un outil de conception grâce à son aptitude à gérer les géométries 3D complexes.

Différents modules physiques existent sous Comsol, parmi lesquels on trouve la mécanique des fluides, le transfert thermique, l'électricité, l'électromagnétisme, la chimie, la mécanique des structures... Il est possible de combiner plusieurs phénomènes physiques lors d'une même simulation numérique : c'est un des points forts de ce logiciel.

III.2. Définition

C'est un logiciel conçu par l'entreprise «Comsol » qui est fondée en 1986. Elle se spécialise dans le domaine de développement de logiciels de support technique et de formation spécialisée et de conseil, développé au Royal Institute of Technology (Suède).

Le logiciel est utilisé par plusieurs grandes entreprises à travers le monde. Vous pouvez modéliser et simuler tout système basé sur la physique en utilisant un logiciel de COMSOL. [11]

Le logiciel COMSOL Multiphysics, anciennement appelé FEMLAB, est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis.

Développé initialement comme une TOOLBOX de MATLAB, il dispose aujourd'hui de son propre environnement graphique permettant à la fois le dessin des géométries et l'affichage de résultats en post-traitement. [12]

COMSOL Multiphysics est un outil très employé dans des secteurs divers de recherche, car il facilite amplement les étapes de modélisation et de simulation, soit : la définition de la géométrie, des propriétés physiques des matériaux présents et des conditions aux frontières, le maillage, la résolution et l'affichage des résultats.

Par ailleurs, le logiciel ne demande pas de connaissances approfondies dans les dynamiques ou les analyses numériques.

En effet, toutes les équations nécessaires à la résolution sont déjà prédéfinies, il suffit alors de préciser dans quel domaine (électromagnétisme, transfert de chaleur, acoustique...) et dans quel régime (stationnaire, temporel...) le modèle doit être construit selon ce choix, la modélisation est disponible en 1D, 2D, 2D axisymétrique ou encore en 3D. [13].

III.3. Prise en main du logiciel

En commençant par la création de la géométrie du modèle à concevoir. Après avoir dessiné notre modèle on doit rajouter les caractéristiques de la matière à chacune des formes. Les conditions aux limites et les paramètres du modèle sont rajouté [11].

- La définition globale des paramètres et des variables liées au modèle.
- La définition de sa géométrie.
- La prise en compte des différents phénomènes physiques qui peuvent exister dans le problème considéré.
- La résolution du problème à l'aide d'un des différents solveurs.
- La visualisation des résultats.

III.3.1. Étapes de résolution dans COMSOL Multiphysics

Lors du lancement de COMSOL, l'assistant Modèle (Model Wizard) permet de définir toutes les étapes de la modélisation brièvement évoquées ci-dessus. Ces étapes sont les suivantes :

1. Exécutez l'Assistant Modèle ce qui implique de choisir le système de coordonnées pour le modèle, la physique pertinente au problème, et le type d'études que l'on souhaite effectuer (stationnaire ou en fonction du temps).

Nous allons commencer par le choix du modèle (Figure III.1). Lancez donc le module électrostatique (es) dans le navigateur de modèle Figure (III.3). Nous allons ici nous limiter à une étude à 3D (Figure III.2).

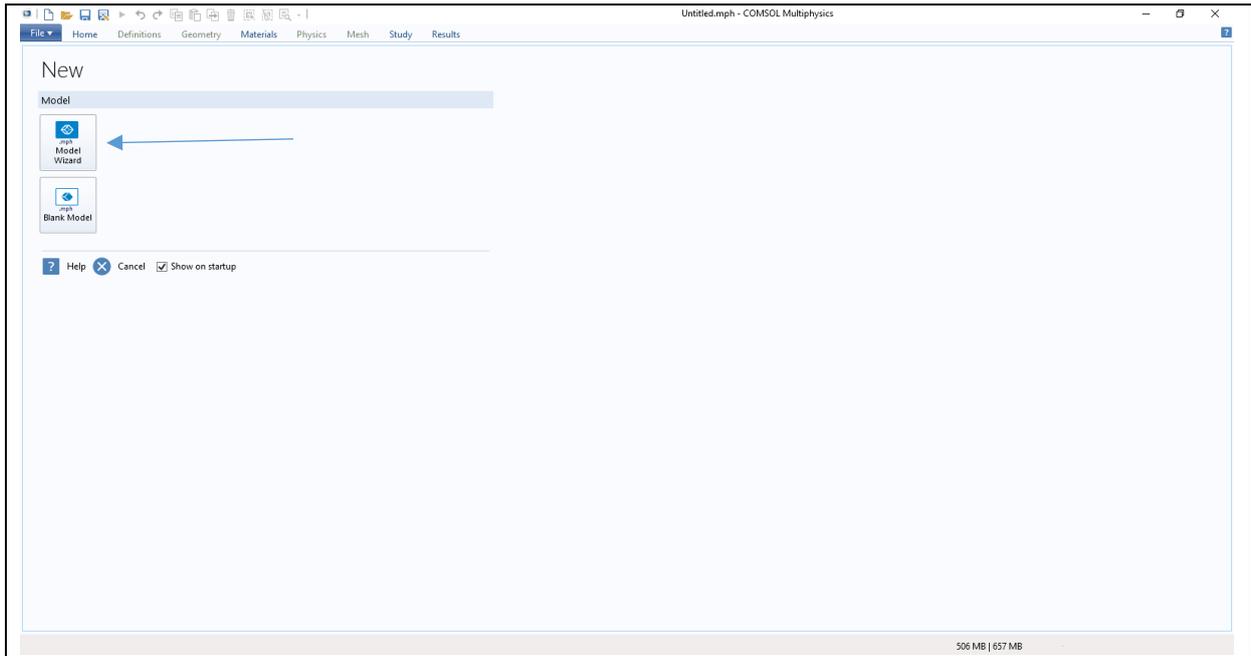


Figure III. 1 : choix du modèle

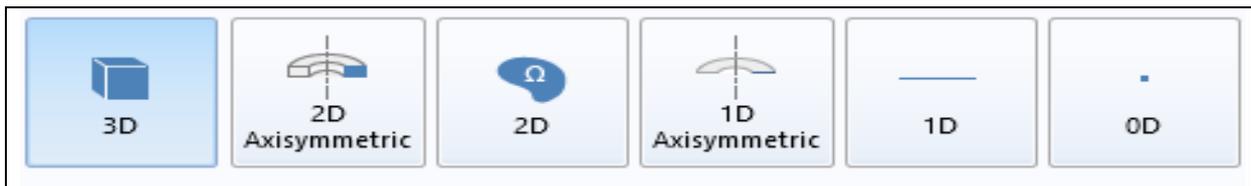


Figure III. 2 : choix la dimension d'étude (3d, 2d, 1d)

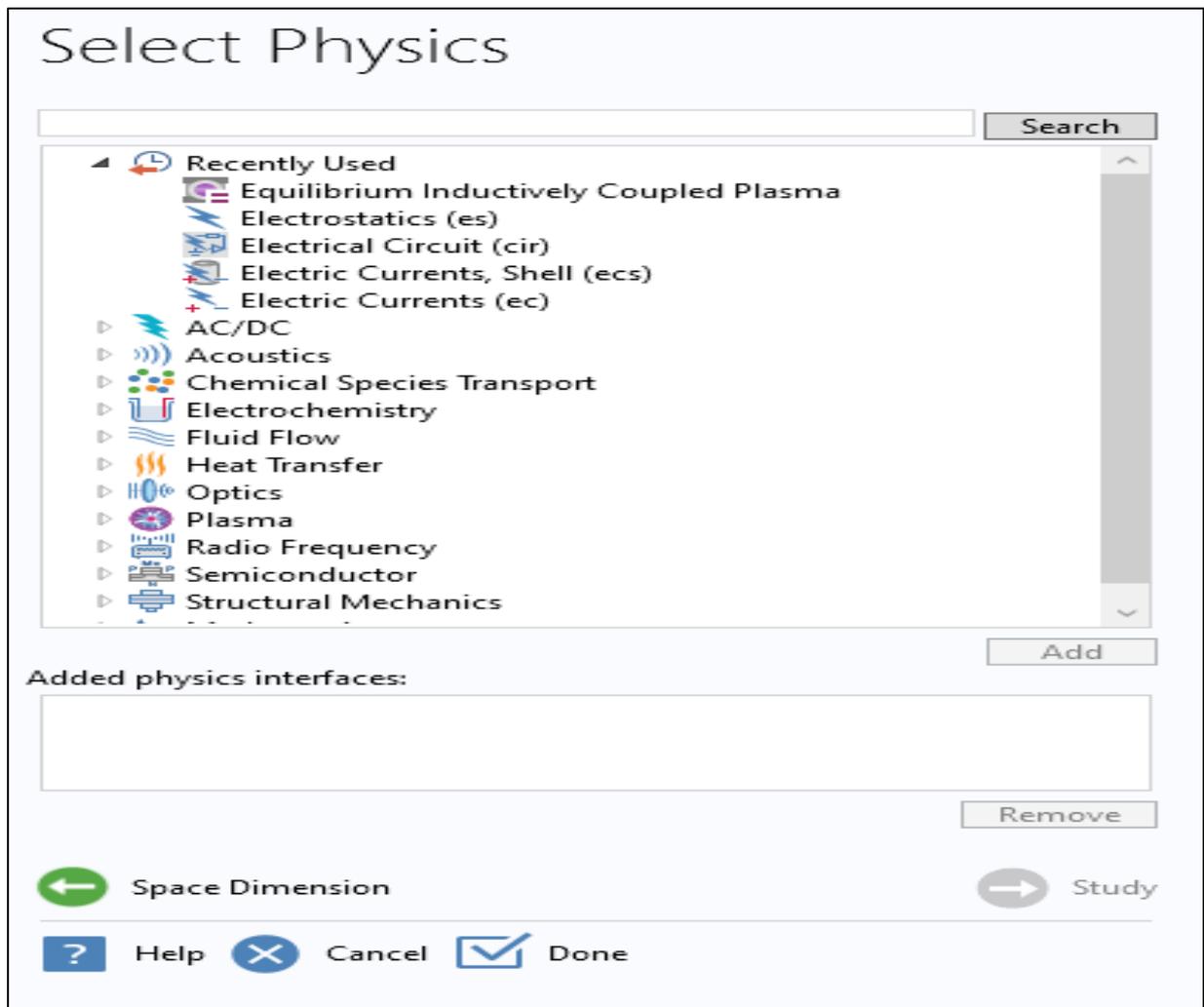


Figure III. 3 : choix du type de physique a étudié

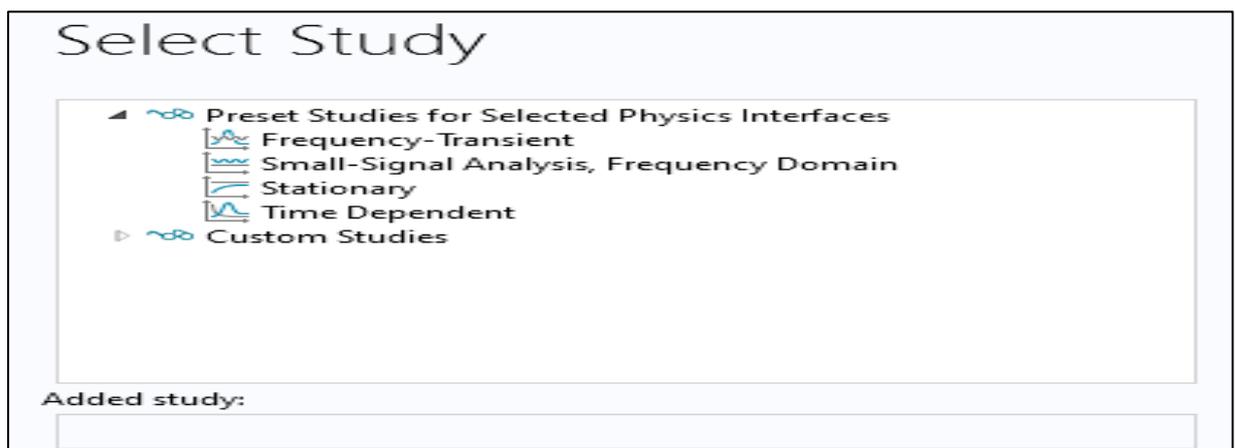
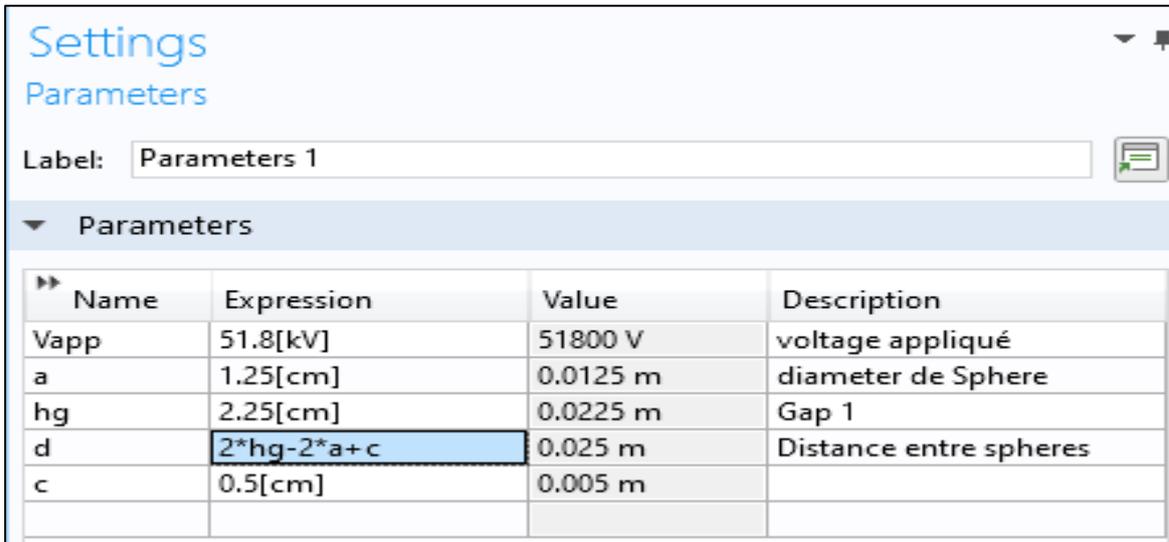


Figure III. 4 : choix du type d'études (stationnaire ou en fonction du temps)

2. Définir les paramètres, les équations et les variables pertinentes pour le modèle (dans le répertoire Définitions Globales).

Le but ici est de définir les paramètres physiques qui définissent le domaine : le constant diélectrique, la distance, la conductivité, etc. Les paramètres sont évidemment liés à notre modèle physique étudié (Figure III.5).



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 III. 5 : Définitions des paramètres globaux.

3. Définir la géométrie du modèle (Geometry). La première chose à faire une fois le programme ouvert est de dessiner la géométrie de notre système (cellule de claquage).
4. Sélectionnez le ou les matériaux adéquats du modèle dans le répertoire (Materials).
5. Choisir les conditions initiales et aux limites de votre modèle pour chaque physique utilisée.
6. Choisir la taille des éléments à utiliser pour le maillage ainsi que les différents types de maillage qui existent.
7. Régler les paramètres du solveur et lancer les calculs dans le répertoire études (Study).
8. Maillage des domaines : Un maillage est un ensemble de nœuds et d'éléments un nœud est un point géométrique supportant une ou plusieurs inconnues, un élément est un ensemble de nœuds associés à un domaine géométriquement simple
La définition de chaque élément par les nœuds le composant est assujetti à des règles précises assurant sa validité (par exemple, en dimension 2, parcours des nœuds dans le sens trigonométrique direct) [17]

- **Nœuds et éléments**

Une description non-sophistiquée de la MEF pourrait être définie sous la forme suivante : la structure à analyser est divisée en plusieurs éléments (petites pièces comme celles qui forment un puzzle). Ces éléments sont ensuite reconnectés par l'intermédiaire des nœuds (figure III.6). Ces nœuds sont « des punaises » ou « des points de colle » qui maintiennent les éléments dans un ensemble unitaire.

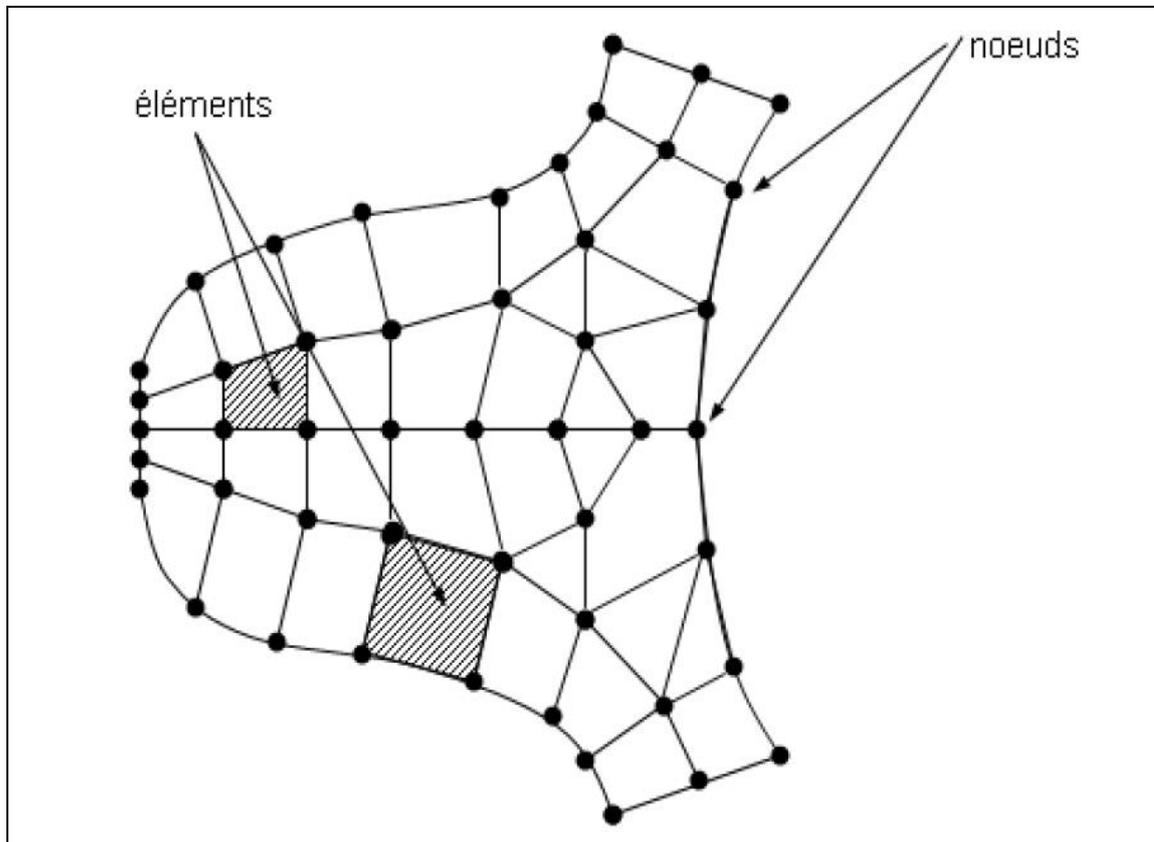


Figure III. 6 : Discrétisation d'une structure en nœuds et éléments (dent d'une roue dentée)

Le maillage des domaines est automatique. Il est possible de le raffiner globalement ou de manière localisée. [15]

9. Afficher les résultats souhaités de la manière la plus significative dans le répertoire résultat (Result).

III.3.2. Résolution du problème

Lorsque le problème est complètement défini, il ne reste plus qu'à le résoudre. Il est possible d'accéder à des menus pour modifier la résolution.

De même, lors de la résolution d'un problème multi- physique, il est possible de ne résoudre que pour une certaine partie des variables. [15]

III.3.3. Analyse des résultats

Lorsque le programme a convergé vers une solution, il bascule automatiquement vers la fenêtre de post traitement, qui permet d'analyser les résultats.

Il est possible de les visualiser sous forme de remplissage de couleur, de lignes de courant, de champ de flèches, etc...[16]

III.4. Potentialités et performances de COMSOL Multiphysics

Les potentialités de Comsol Multiphysics sont nombreuses et cela dépend du nombre d'application qui permet de résoudre grâce à son environnement complet pour le calcul scientifique. Il est capable de coupler et de résoudre des équations dans différents domaines tels que la mécanique des fluides et le transfert thermique, l'électromagnétisme, la dynamique des fluides et la chimie, MEMS et Mécanique des Structures.

Il offre également plusieurs solveurs de très haut niveau de performance capable de traiter des problèmes avec des temps de résolution optimaux. Ceci et d'autres caractéristiques font de COMSOL un environnement inégalé de modélisation pour la conception industrielle, la recherche et développement et l'enseignement.

COMSOL a été utilisé dans cette mémoire pour modéliser et simuler numériquement d'une cellule de claquage. Cette modélisation a pour but l'influence de plusieurs paramètres tels que la conductivité, la permittivité... sur la tension du claquage des huiles végétales, et de comparer les résultats des modélisations avec le résultat de simulation de cellule de huile minérale.

III.5. Avantages de conception avec COMSOL Multiphysics :

Le principal but de la création de COMSOL Multiphysics est d'avoir un logiciel où les scientifiques et les ingénieurs peuvent formuler, à l'aide de l'interface utilisateur, n'importe quel système d'équations aux dérivées partielles (EDP) sur la base des lois de la physique et surtout de se baser sur les zones les plus communes dans la physique et en génie.

Cette interface est basée sur un interpréteur d'équation qui formule une discrétisation par éléments finis, "à la volée", par le système entièrement couplé.

Des interfaces de modélisation prédéfinies pour les différents domaines de la physique appliquée, y compris des couplages multi physiques.

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

Les équations complètes sont également disponibles dans l'interface utilisateur pour une manipulation. [11]

Il a été retenu pour les raisons suivantes :

- Il est spécialisé dans la résolution de problèmes électromagnétiques.
- Il permet de prendre en compte la présence de plusieurs diélectriques
- Il permet de modéliser une surface conductrice de faible épaisseur (couche de pollution).
- Il permet de travailler en régime statique ou quasi-statique (50 Hz).
- Enfin, il permet une modélisation rapide du problème. [14]

III.6. Modélisation d'une cellule de claquage

La modélisation et la simulation d'une cellule de claquage peuvent se résumer en quatre étapes successives suivantes :

- La première étape consiste à définir la géométrie entière de modèle d'une cellule de claquage par l'intermédiaire d'une interface graphique de conception.
- Dans la deuxième étape on définit les conditions aux limites qui se traduisent par le potentiel imposé sur chaque électrode et déterminer les frontières de l'isolation électrique c'est-à-dire les frontières où le champ électrique peut être considéré comme nul.
- La troisième étape est la résolution du problème par l'application de l'étude (breakdown electrical).
- La dernière étape est : l'affichage des résultats obtenus parmi lesquels les équipotentielles, la norme du champ électrique et ses composantes normales et tangentielles, etc. [15]

III.7. Conclusion

La détermination du potentiel électrique de tout système de haute tension, est un problème de calcul complexe. Pour remédier à ce problème le logiciel de COMSOL Multiphysics peut servir d'une manière puissante et interactive à les résoudre.

Dans chapitre quatre ; nous allons présenter les résultats de simulation de la tension du claquage des huiles végétales. Nous allons aussi comparer ces résultats avec les résultats de la simulation de tension du claquage d'une huile minérale.

Chapitre IV : Modélisation de la cellule de claquage

IV.1 Introduction

La modélisation est une étape importante dans toute simulation numérique. En particulier, elle permet, en définissant et en étudiant les caractéristiques géométriques et physiques du problème étudié, de proposer un modèle simplifié qui soit le plus proche de la réalité.

L'objectif principal de cette simulation est de calculer la distribution du potentiel (la tension de claquage) et du champ électrique entre deux électrodes immergés dans l'huile.

L'influence de plusieurs paramètres tels que la permittivité, la densité etc.... sur la tension de claquage des huiles végétales seront aussi étudié dans cette simulation.

En réalité ; il est très difficile de mesurer expérimentalement de façon précise la distribution du potentiel et surtout du champ électrique dans les liquides isolants, l'utilisation d'une méthode numérique par l'intermédiaire d'un logiciel s'est avérée être une des meilleures solutions. À cet effet, la méthode des éléments finis est la mieux adaptée au problème posé.

IV.2 Procédures de simulation d'une cellule de claquage sous COMSOL MULTIPHYSICS 5.5

Dans notre simulation, nous avons choisi le COMSOL MULTIPHYSIC 5.5 pour simuler la cellule de claquage (figure IV.1), le COMSOL MULTIPHYSIC 5.5 a diverses fonctionnalités Figure IV.2.

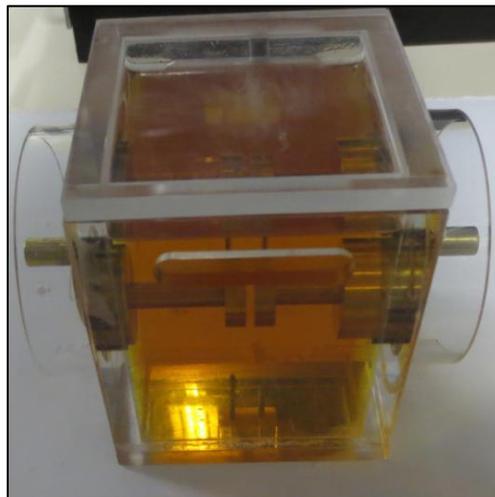


Figure IV. 1 : Cellule et les électrodes.

La cellule d'essai est construite en PMMA (poly méthacrylate de méthyle) connu sous le nom de Plexiglas de forme cubique (longueur égale à 7,5 cm, hauteur égale à 10 cm,

largeur égale à 7,2 cm) rempli de 500 ml d'huile. Il est possible de fermer la cellule avec une couverture scellée pour éviter l'entrée de l'humidité pendant l'essai. À l'intérieur de la cellule se trouve deux électrodes disque. La distance est maintenue constante entre ces deux disques et égales à 2,5 cm.

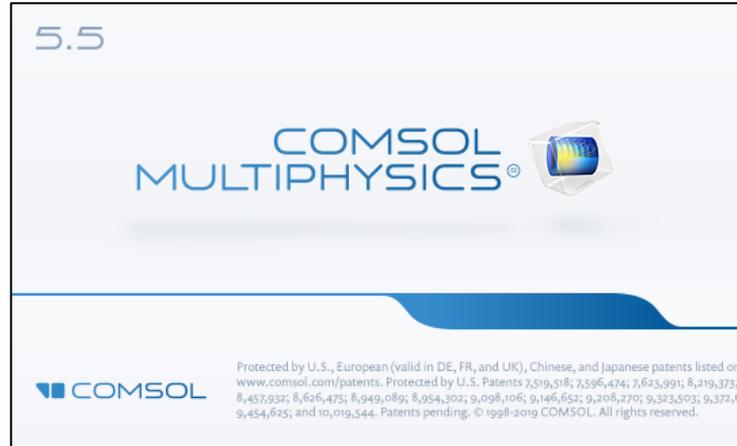


Figure IV. 2 : L'interface de COMSOL MULTIPHYSICS 5.5.

IV.2.1 Procédure de simulation

Les étapes essentielles à suivre pour une conception d'une structure sur COMSOL MULTIPHYSICS 5.5 sont :

- Sélectionner la dimension d'espace ;
- Sélectionner la physique ;
- Sélectionner l'étude ;
- Définir les paramètres ;
- Définir la géométrie ;
- Sélectionner les matériaux ;
- Maillage ;
- Lancer la simulation ;
- Traiter et analyser les résultats.

IV.2.1.1 Lancement du logiciel

Pour lancer le logiciel on clique sur l'icône de COMSOL MULTIPHYSICS, la fenêtre du logiciel s'ouvre, Figure IV.3.

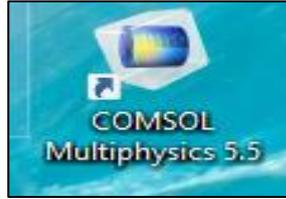


Figure IV. 3 : L'icône de COMSOL MULTIPHYSICS 5.5.

IV.2.1.2 Sélection de la dimension d'espace

Il existe plusieurs dimensions d'espace, nous choisissons une dimension 3d pour notre étude Figure IV.4.

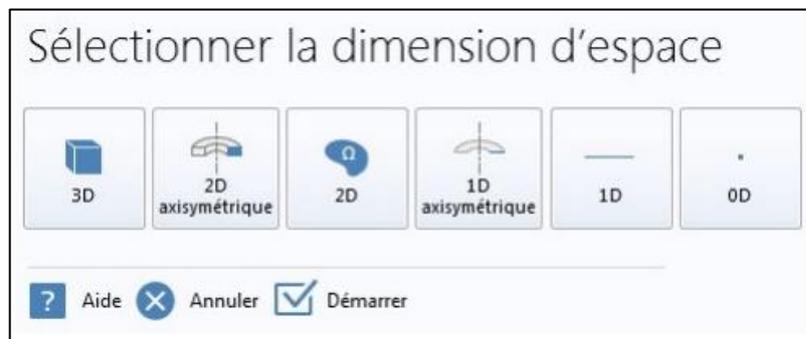


Figure IV. 4 : Les différentes dimensions de simulation.

IV.2.1.3 Choix de la physique

Après la sélection de la dimension d'espace, on procède au choix de la physique à utiliser selon la simulation qu'on va faire, la figure IV.5 montre les différentes physiques existantes dans le logiciel.

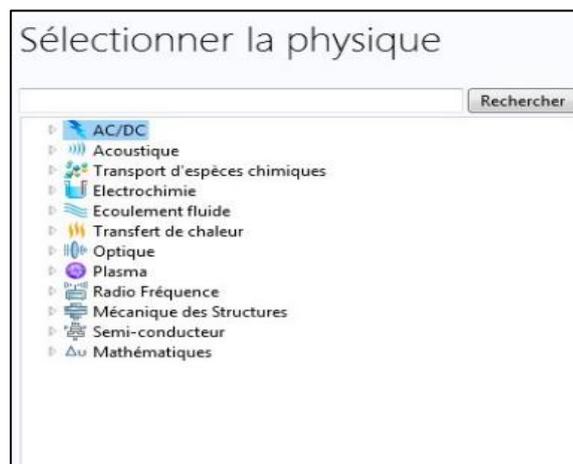


Figure IV. 5 : Le choix de la physique à utiliser.

Dans notre étude nous allons choisir la physique Electrostatique AC/DC > **champs et courants électriques > électrostatique (es)**.

Et la physique Détection de claquage **Plasma > Détection de claquage (ebd)**.

IV.2.1.4 Sélectionner l'étude

La rubrique d'étude nous permet de sélectionner ou bien de définir un domaine d'étude approprié à la physique utilisé, Figure IV.6. Nous allons choisir deux études : stationnaire et temporel.

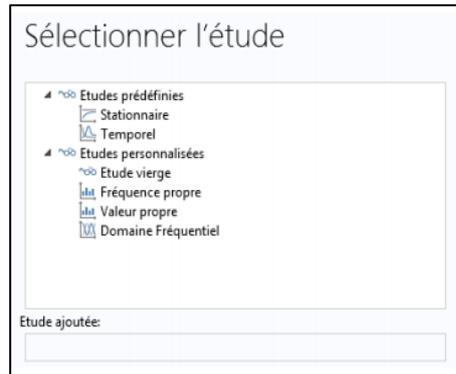


Figure IV. 6 : Le choix de l'étude.

IV.2.1.5 Définitions globales

Une fois le domaine physique et le domaine d'étude ont été choisis, on commence à définir les paramètres globaux de la cellule.

1. Dans la fenêtre constructrice de modèle, sous Définitions globales, on clique sur Paramètres1
2. Dans la fenêtre Paramètres 1, on recherche la section Paramètres.
3. Dans le tableau, on saisit les paramètres indiqués par le tableau IV.1

Tableau IV. 1 : définition des paramètres global.

Nom	Expression	Valeur	Description
Vapp	90[kV]	90000 V	voltage appliqué
a	1.25[cm]	0.0125 m	diamètres des sphères
hg	2.25[cm]	0.0225 m	Gap 1
d	2*hg - 2*a + c	0.025 m	Distance entre les sphères
c	0.5[cm]	0.005 m	.005 m
ct	0.180 [W/(m*K)]	0.18 W/(m·K)	la conductivité thermique
dn	0.919[g/cm^3]	0.919 g/cm ³	la densité
vd	5.7e-2[Pa*s]	0.057 Pa·s	viscosité dynamique
cp	1.926[kJ/(kg*K)]	1926 J/(kg·K)	capacité thermique

Nom	Expression	Valeur	Description
ex	$74[1/C]$	$74 \text{ 1}/(\text{s}\cdot\text{A})$	expansion

IV.2.1.6 Définir la géométrie

Maintenant on commence à dessiner la géométrie de notre cellule de claquage. La figure IV.7 montre l'interface de travail qui nous permet d'obtenir la géométrie de la cellule.

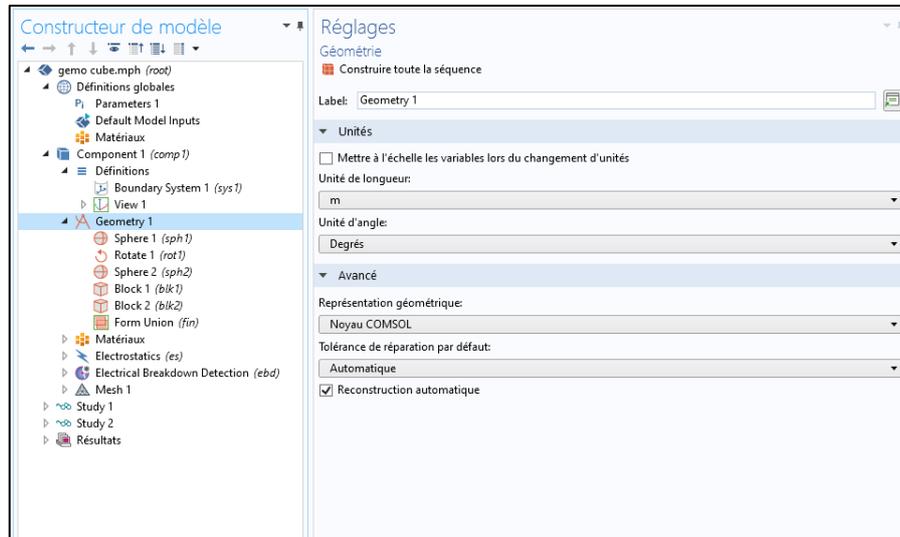


Figure IV. 7 : Création d'une géométrie cellule.

a. Sphère 1 (sph1)

1. Dans la fenêtre constructeur modèle, développez le nœud Composant 1 (comp1)> Géométrie
2. Cliquez avec le bouton droit sur Géométrie 1 et choisissez Sphère.
3. Dans la fenêtre Paramètres de Sphère, recherchez la section Taille.
4. Dans le champ de texte Rayon, saisissez a.
5. Localisez la section Angle de rotation. Dans le champ de texte Rotation, saisissez 45.

b. Rotation 1 (rot1)

1. Dans la barre d'outils Géométrie, cliquez sur Transformations et choisissez Rotation.
2. Sélectionnez l'objet sph1 uniquement.
3. Dans la fenêtre Paramètres de Rotation, recherchez la section Rotation.
4. Dans la liste Type d'axe, choisissez Cartésien.
5. Dans le champ de texte y, saisissez 1.
6. Dans le champ de texte z, saisissez 0.
7. Dans le champ de texte Angle, saisissez 45.
8. Cliquez sur construire tous les objets.

c. Sphère 2 (sph2)

1. Dans la barre d'outils Géométrie, cliquez sur Sphère.
2. Dans la fenêtre Paramètres de Sphère, recherchez la section Taille.
3. Dans le champ de texte Rayon, saisissez a.
4. Localisez la section Position. Dans le champ de texte x, saisissez $2 * hg$.

d. Bloc 1 (blk1)

1. Dans la barre d'outils Géométrie, cliquez sur Bloc.
2. Dans la fenêtre Paramètres du bloc, recherchez la section Taille et forme.
3. Dans le champ de texte Largeur, saisissez 20 [cm].
4. Dans le champ de texte Profondeur, saisissez 20 [cm].
5. Dans le champ de texte Hauteur, saisissez 20 [cm].
6. Localisez la section Position. Dans le champ de texte x, saisissez -8 [cm].
7. Dans le champ de texte y, saisissez -10 [cm].
8. Dans le champ de texte z, saisissez -10 [cm].
9. Cliquez sur Construire tous les objets.

e. Bloc 2 (blk2)

1. Dans la barre d'outils Géométrie, cliquez sur Bloc.
2. Dans la fenêtre Paramètres du bloc, recherchez la section Taille et forme.
3. Dans le champ de texte Largeur, saisissez 24 [cm].
4. Dans le champ de texte Profondeur, saisissez 24 [cm].
5. Dans le champ de texte Hauteur, saisissez 24 [cm].
6. Localisez la section Position. Dans le champ de texte x, saisissez -10 [cm].
7. Dans le champ de texte y, saisissez -12 [cm].
8. Dans le champ de texte z, saisissez -12 [cm].
9. Cliquez sur Construire tous les objets.

La figure IV.8 montre les deux sphères de distance 2.5 cm représente l'anode et la cathode immergé dans le premier cube qui présente notre l'huile et le 2^{eme} cube présente le plexiglas (poly méthacrylate de méthyle).

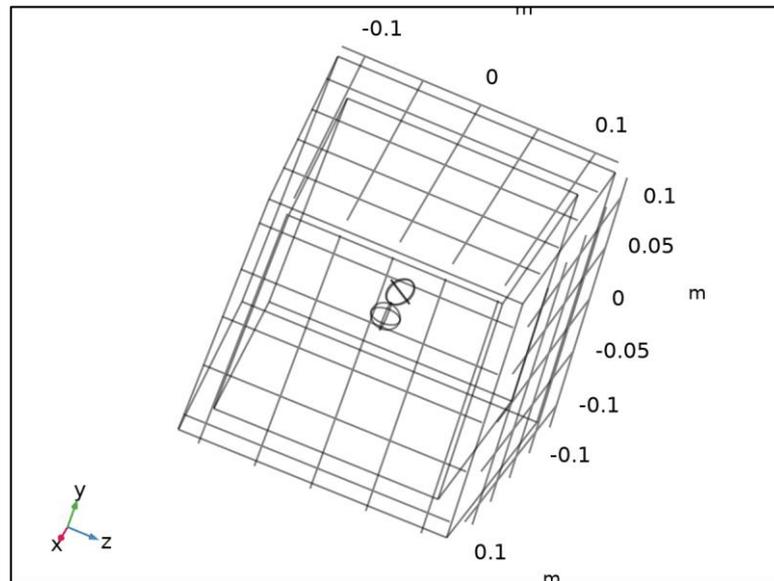


Figure IV. 8 : la géométrie de cellule de claquage.

IV.2.1.7 Choix des matériaux

La rubrique de choix des matériaux comporte une large gamme de matériaux qui sont disponible sur le logiciel, et du même, ce logiciel nous offre une possibilité de créer un matériau en lui associant toutes les caractéristiques disponible dans les études théoriques Figure IV.9.

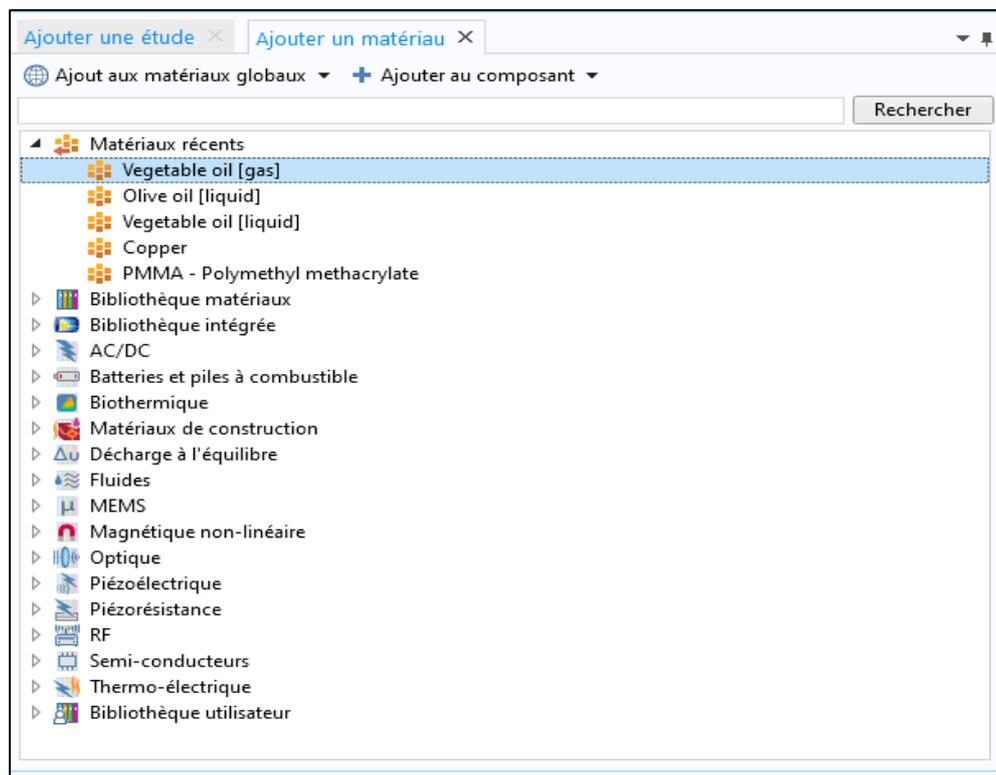


Figure IV. 9 : Figure choix des matériaux.

On choisit le cuivre (Copper) pour les sphères, l'huile végétale (vegetable oil [liquid]) pour le cube un et Pmma – polymethyl methacrylate pour le cube deux.

Après la définition des domaines par les matériaux associés ; le domaine représente la partie bleu comme il est indiqué sur la figure IV-10. Les paramètres de cuivre et pmma sont standards par contre on remplace les paramètres de l'huile végétale par les paramètres de l'huile de soja. Dans la fenêtre réglage du matériau, recherchez la section contenu du matériau huile végétale (vegetable oil) après on introduit les paramètres de l'huile de soja, ces valeurs sont indiquées sur le tableau IV.2

Tableau IV. 2 : les paramètres d'huile de soja.

Description	Valeur
Conductivité thermique	ct
Coefficient de dilatation thermique	ex
Capacité thermique à pression constante	Cp
Masse volumique	dn
Viscosité dynamique	vd
Permittivité relative	2.83

Les valeurs (ct cp dn ex ... etc.) Représentent la valeur de conductivité thermique, la densité...etc. Nous avons défini ces paramètres dans la première étape.

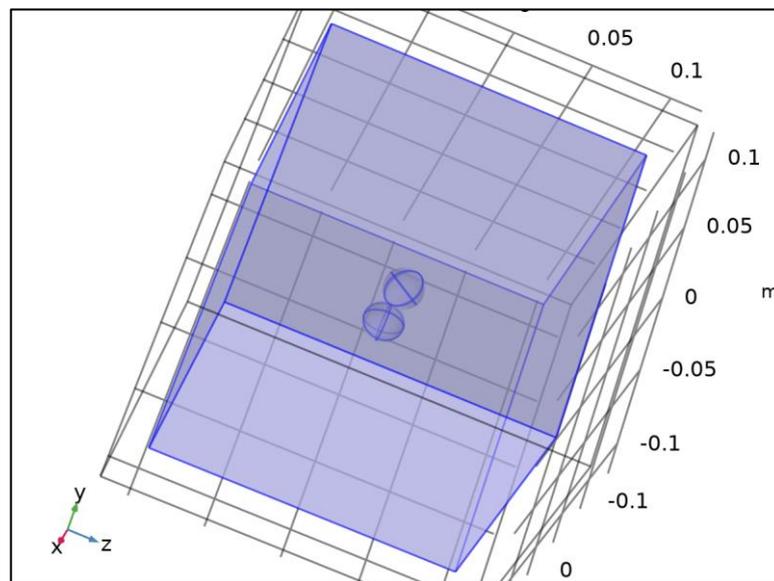


Figure IV. 10 : Domaine deux en huile végétale soja.

IV.2.1.8 Electrostatique

a. Potentiel électrique

1. Dans la barre d'outils Physique, cliquez sur frontière et choisissez Potentiel électrique.

2. Cliquez sur le bouton Zone de sélection dans la barre d'outils Graphiques.
3. Sélectionnez frontières 6--13 uniquement Figure IV.11.
4. Dans la fenêtre Paramètres du potentiel électrique, recherchez la section Potentiel électrique.
5. Dans le champ de texte V_0 , on introduit la V_{app} , V_{app} c'est la tension appliquée que nous avons défini.

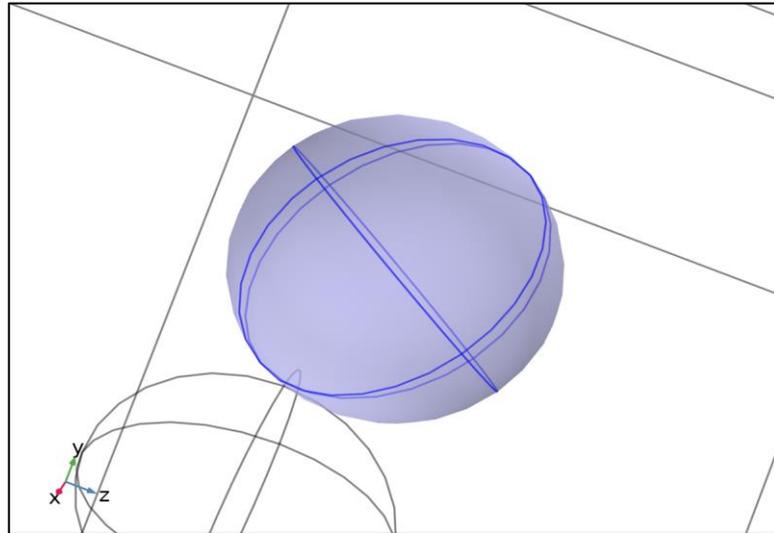


Figure IV. 11 : Frontières 6-13(potentiel électrique).

b. Mass

1. Dans la fenêtre constructeur de modèle, sous Composant 1 (comp1), cliquez avec le bouton droit sur Electrostatique (s) et choisissez mass.
2. Cliquez sur le bouton Zone de sélection dans la barre d'outils Graphiques.
3. Sélectionnez frontières 14-21 uniquement (Figure IV.12).

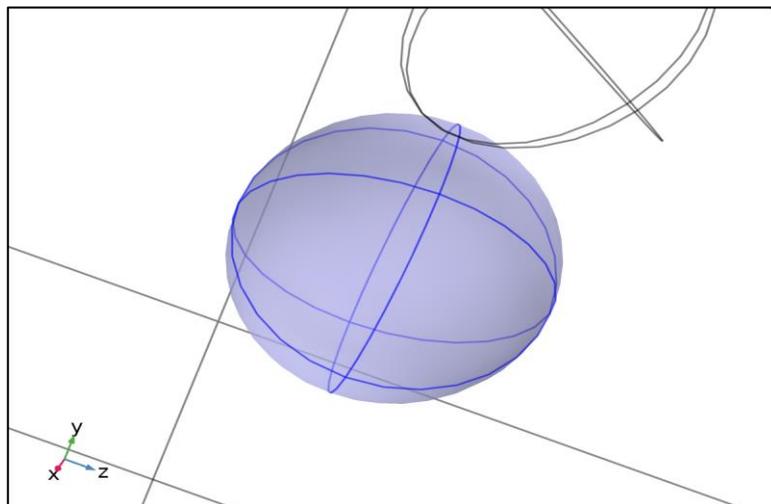


Figure IV. 12 : Frontières 14--21(mass).

c. Détection de claquage (edb)

- **Cathode**

1. Cliquez avec le bouton droit sur Composant 1 (comp1)> Détection de claquage (edb) et choisissez Cathode.
2. Sélectionnez frontière 13 uniquement (figure IV.13).

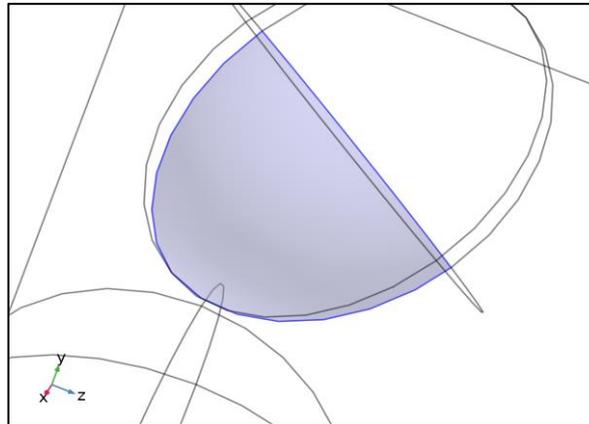


Figure IV. 13 : Frontière 13 (Cathode).

- **Compteur de particules 1**

1. Dans la barre d'outils Physique, cliquez sur frontières et choisissez Compteur de particules.
2. Sélectionnez frontières 14–17 uniquement (Figure IV.14).

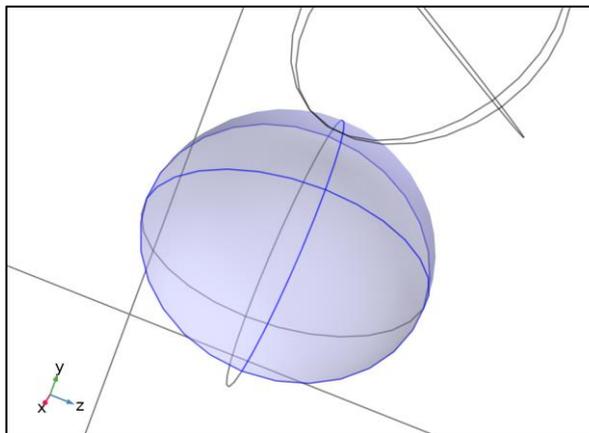


Figure IV. 14 : Les frontières 14–17(Compteur de particules).

- **Détection de claquage 1**

1. Dans la fenêtre constructeur de modèle, cliquez sur Détection de claquage 1.
2. Dans la fenêtre Paramètres pour la détection de claquage, recherchez le champ électrique section.

3. Dans la liste E, choisissez Champ électrique (es / ccn1).

IV.2.1.9 Maillage

Le maillage correspond à la discrétisation spatiale de la géométrie en volumes élémentaires appelés mailles. Le maillage est réalisé automatiquement par le logiciel. On peut utiliser les tailles prédéfinies extra grossier ; grossier ; normal ; fine ou extra fine...etc. le tableau IV-3 et la figure IV-15 représentent les informations et les statistique du maillage de notre géométrie.

Tableau IV. 3 : Statistiques de maillage

Description	Valeur
Qualité minimale des éléments	0.2
Qualité moyenne des éléments	0.6577
Tétraèdre	428867
Triangle	32932
Elément d'arêtes	1056
Elément ponctuel	28

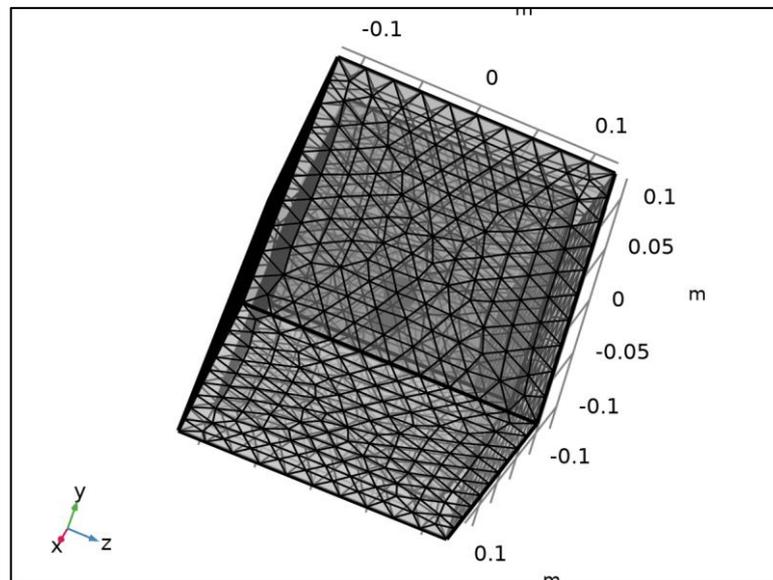


Figure IV. 15 : Maillage des domaines.

On peut changer les frontières au niveau de la géométrie, la taille d'éléments maximale et minimale, le facteur de courbure...etc, Tableau IV-3.

IV.2.1.9.1 Taille 1 (size1)

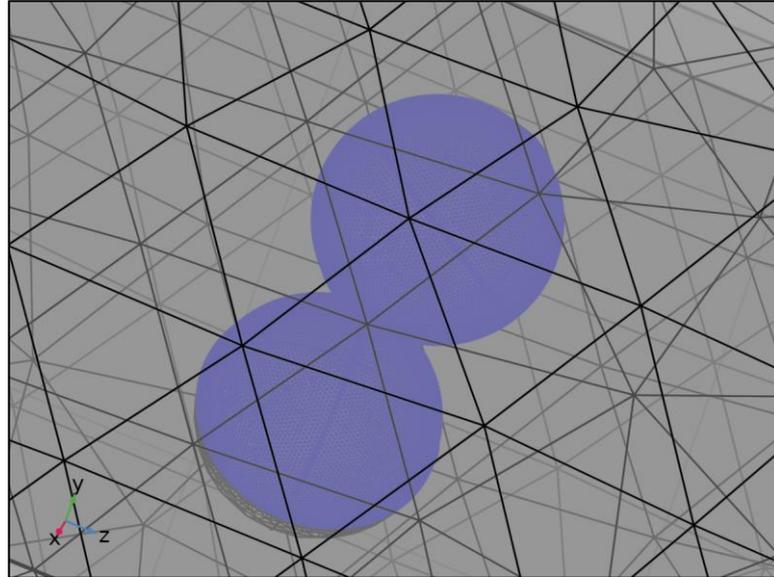


Figure IV. 16 : maillage en triangle libre des frontières 11–22

La figure IV-16 montre le maillage en triangle libre dans les frontières 11–22 ; ces les frontières des électrodes et le tableau IV-4 montre les tailles des éléments et divers paramètres que nous avons introduit dans ce maillage.

Tableau IV. 4 : REGLAGE DES PARAMETRES DE MAILLAGE

Description	Valeur
Taille d'élément maximale	5E-4
Taille d'élément minimale	0.0036
Taille d'élément minimale	Désactivé
Facteur de courbure	0.6
Facteur de courbure	Désactivé
Résolution des régions minces	0.5
Résolution des régions minces	Désactivé
Taux de croissance maximum des éléments	1.5
Taux de croissance maximum des éléments	Désactivé
Adapter la taille des éléments	Personnalisé

IV.2.1.9.2 Quadruple libre 1 (ftet1)

La figure IV-7 montre le maillage en Quadruple libre de tout le reste.

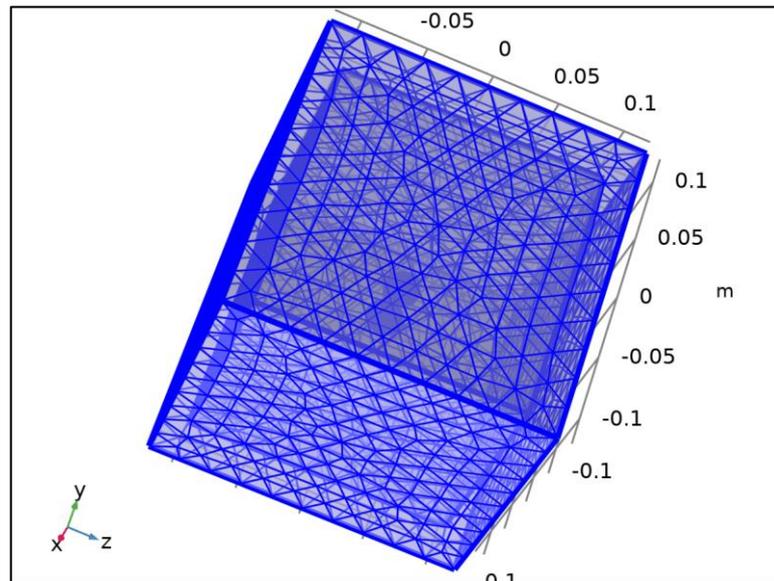


Figure IV. 17 : maillage en quadruple libre.

IV.3 Lancement de la simulation et analyse des résultats

Une fois que l'étape du maillage est achevée, on lance la simulation paramètres avec les conditions initiale dans le tableau IV-1

Le lancement de la simulation se fait une fois que toutes les étapes citées au part avant sont réalisées. Le logiciel compile toutes les données, et nous donne à la fin tous les résultats obtenu lors de la simulation.

IV.4 Résultat et discussions

IV.4.1 Le champ électrique

Le champ électrique de l'étude électrostatique est illustré à la figure IV-18. Comme prévu, le champ électrique est le plus fort à la distance minimale entre les deux sphères. Tous les électrons de graine exposés à ce champ électrique ont le potentiel de gagner suffisamment d'énergie pour ioniser le huile de fond, déclenchant éventuellement une boucle de rétroaction positive par laquelle un électron un claquage peut se produire.

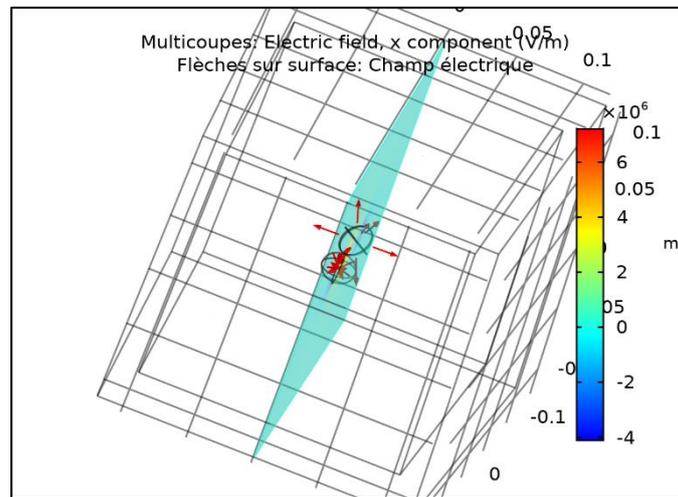


Figure IV. 18 : Multicoupe : Champ électrique, x component (V/m)

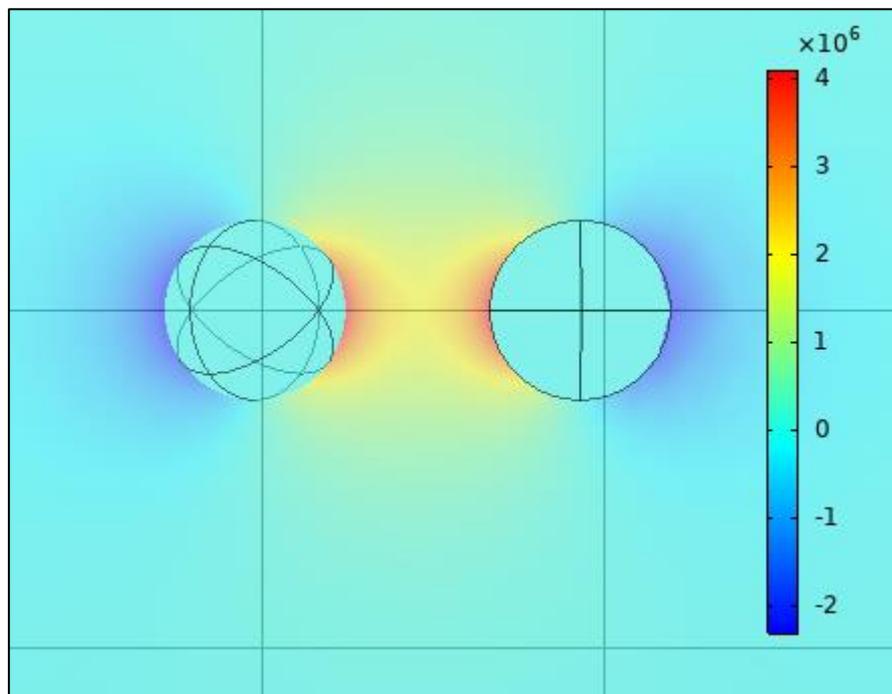


Figure IV. 19 : Champ électrique entre les sphères

IV.4.2 L'indicateur de claquage

L'indicateur de claquage de cette configuration est illustré à la figure IV-20 ci-dessous. Quand l'indicateur est zéro, aucune décharge ne se produira, lorsque l'indicateur est un, un (courant limité) Une décharge Townsend peut se produire. Comme c'est actuellement limité, ce n'est pas nécessairement un problème dans le système électrique. Cependant, lorsque l'indicateur est à deux, comme le montre le petit point rouge sur la sphère gauche (à la distance minimale entre les deux sphères), streamer peut former qui n'est pas

limitée en courant, ce qui peut potentiellement être catastrophique pour un système. Comme prévu, la région de formation des streamer est un très petit point, ce qui signifie que le début ne fait que se produire. Ceci est attendu, car la tension appliquée est juste à la valeur (90 kV) là où cela devrait être le cas.

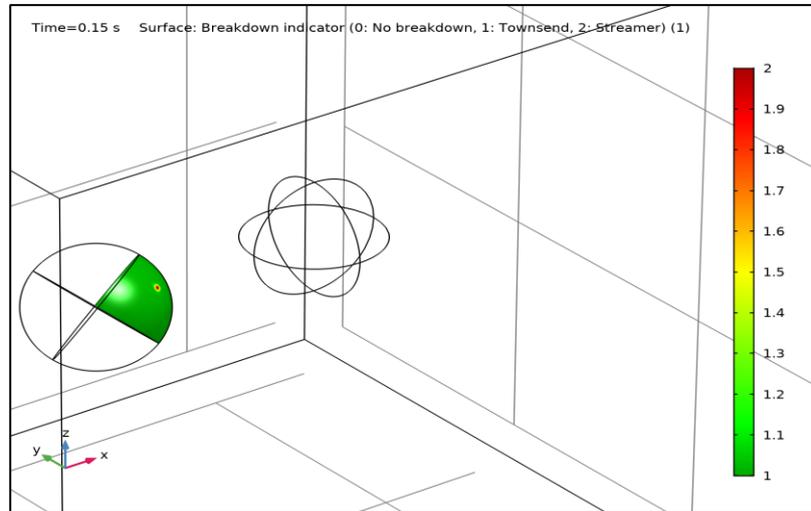


Figure IV. 20 : Indicateur de claquage sur la surface de la cathode.

IV.4.3 Trajectoires de particules

Trajectoires de particules chargées de la cathode vers l'anode est illustré à la figure IV-21 ci-dessous :

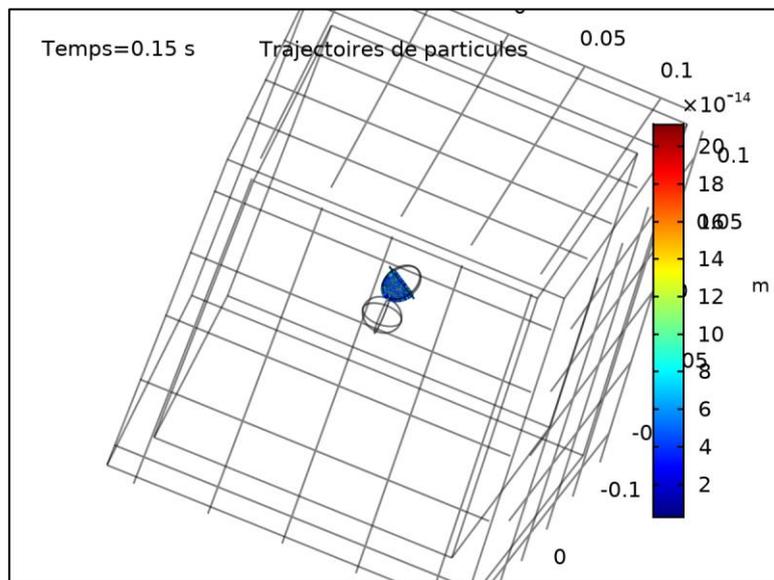


Figure IV. 21 : Trajectoires de particules

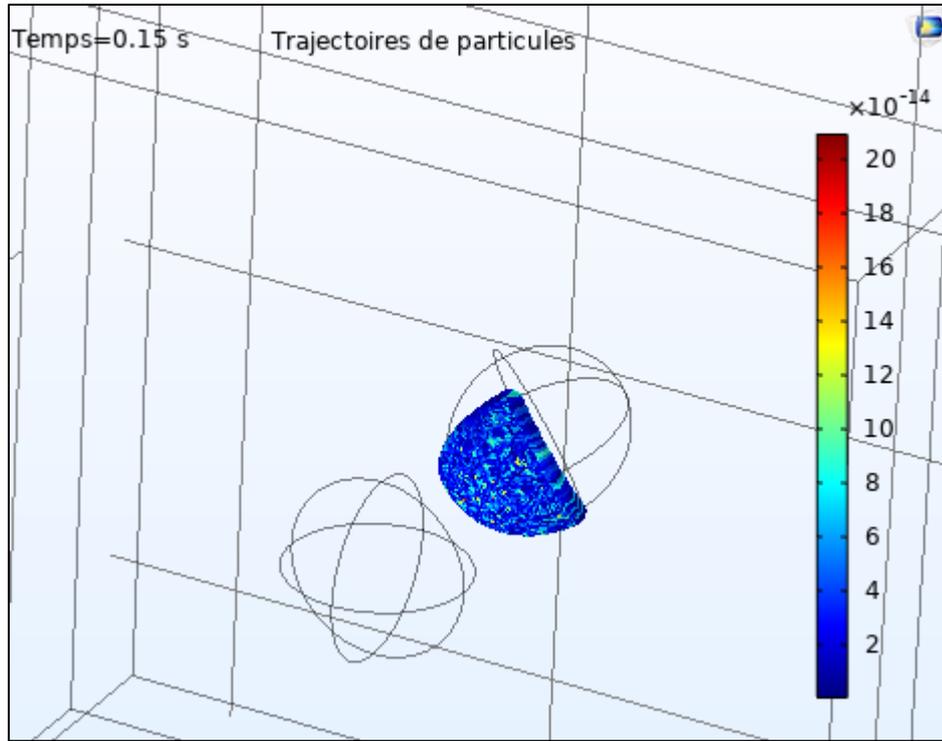


Figure IV. 22: Trajectoires de particules agrandies

IV.4.4 Tension de claquage

La simulation de champs électriques dans trois configurations différentes est observée à l'aide du logiciel COMSOL multi-physique. Dans électrostatiques, les équations de Maxwell et l'équation constitutive réduisent à la forme suivante :

$$\nabla * E = 0 \quad (IV-1)$$

$$\nabla * D = \rho \quad (IV-2)$$

$$D = \varepsilon E \quad (IV-3)$$

Où E est l'intensité du champ électrique, D est le déplacement électrique, ρ est la densité de charge d'espace, ε est le constant diélectrique du matériau. Sur la base de l'équation. (II-1), l'intensité du champ électrique est introduite par le gradient négatif du potentiel scalaire électrique V en forme suivante :

$$E = -\nabla * V \quad (IV-4)$$

Équations en utilisant du (IV-2) et (IV-3) à (IV-1), l'équation de Poisson scalaire est obtenue sous forme suivante

$$-\nabla * (\varepsilon \nabla V) = -\nabla * (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V) = \rho \quad (IV-5)$$

où, ϵ_0 est la permittivité de l'espace libre, $\epsilon_r = \epsilon_r(E, x, y, z)$ est la permittivité relative et ρ est la densité de charge d'espace. E si la permittivité est constante comme dans le diélectrique isotrope,

$$\Delta V = -\rho\epsilon \tag{IV-6}$$

Dans cette étude, la solution du problème est obtenue à partir d'une solution de l'équation de Laplace en coordonnées rectangulaires.

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \tag{II-7}$$

V= Tension de claquage sur l'électrode supérieure,

V=0 Volt (sol) sur l'électrode inférieure,

$\frac{\partial V}{\partial n} = 0$ sur toutes les autres limites extérieures et sur l'axe de symétrie.

IV.4.4.1 Tension de claquage de l'huile de soja :

La figure IV-23 montre le potentiel électrique entre les sphères on remarque que la valeur maximal de la tension 53827V en 0.1197 m c'était le point qui présent la distance plus minimale entre les deux sphères, cette tension présente la valeur de la tension du claquage de l'huile de soja Représenté par la figure IV.24 ci-dessous, et la figure IV.25 représente le champ électrique entre les sphères de la valeur maximal a $3.65 \cdot 10^6$ v/m.

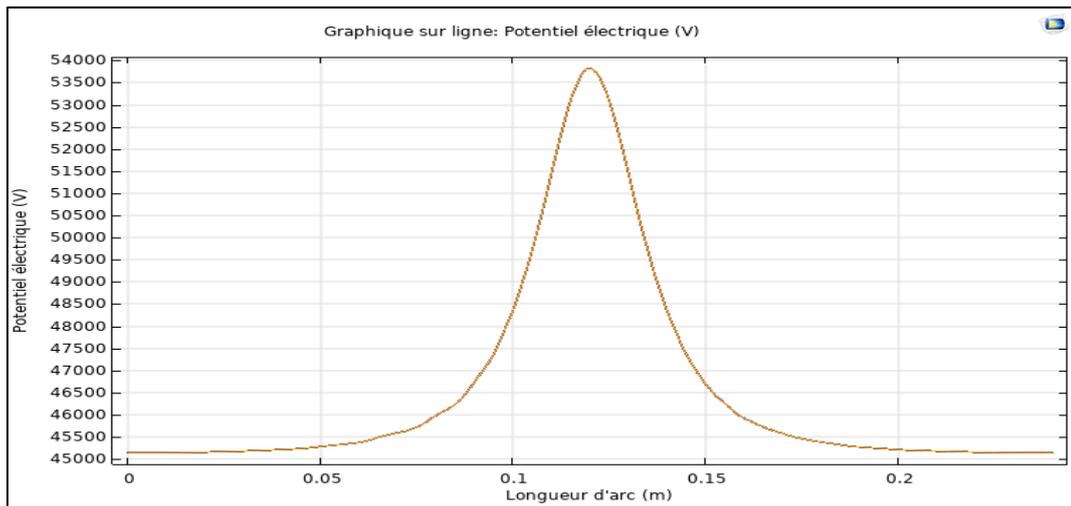


Figure IV. 23 : Potentiel électrique entre les sphères.

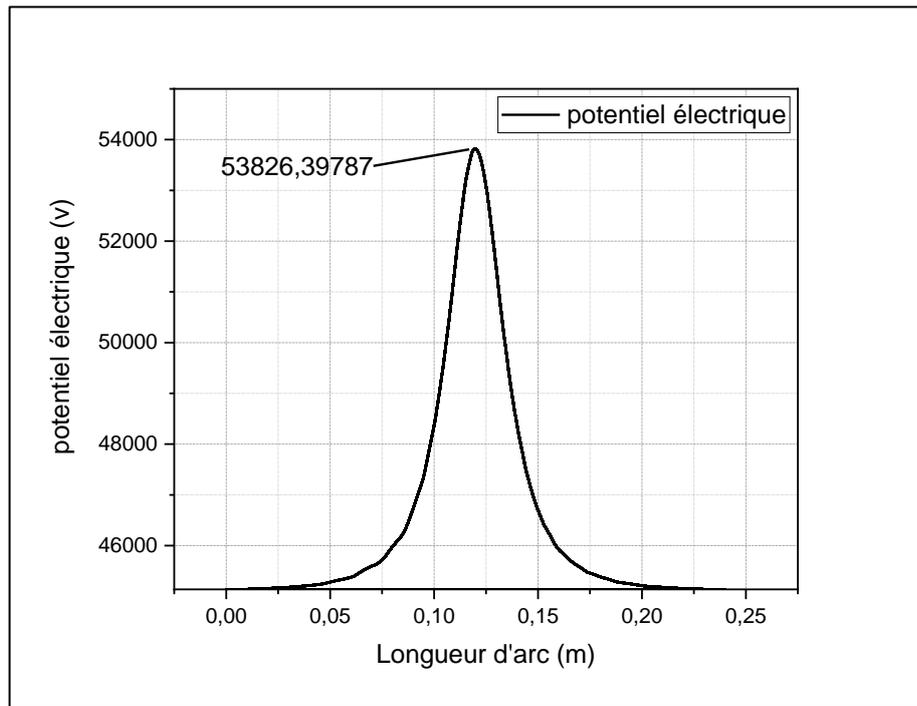


Figure IV. 24 : Potentiel électrique agrandi entre les sphères.

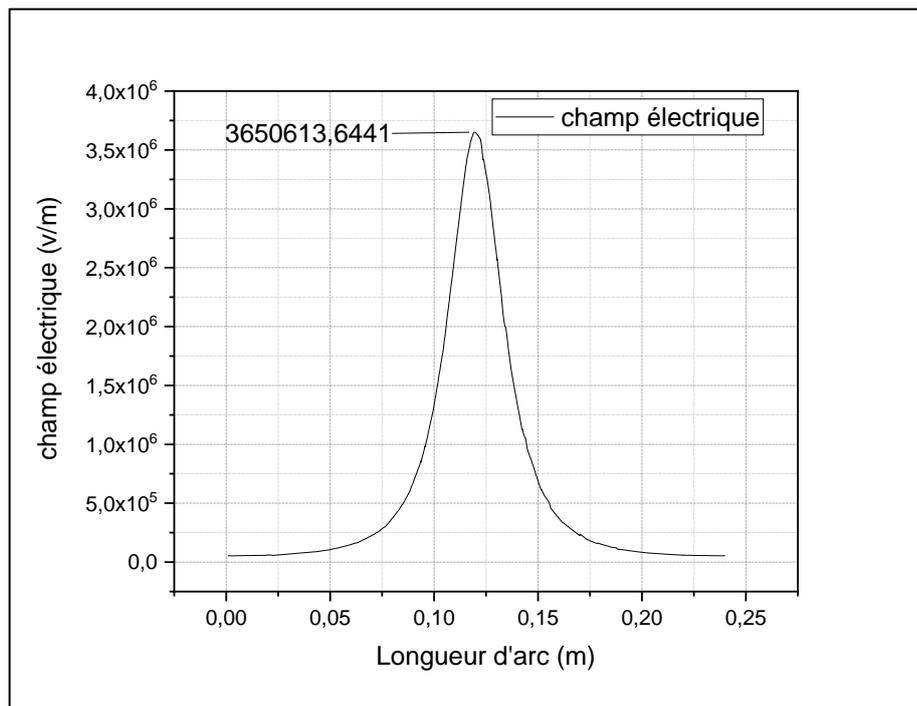


Figure IV. 25 : Champ électrique (v/m) entre les sphères.

IV.5 Influence de la permittivité sur la tension de claquage

La permittivité diélectrique ou la constante diélectrique est également notée k dans le domaine des circuits intégrés et des semi-conducteurs. Les matériaux dits *low-k* sont des diélectriques à faible permittivité. Ils sont utilisés comme isolants entre les interconnexions métalliques pour diminuer le couplage entre celles-ci. La valeur de permittivité relative des

huile végétale comprise entre 2 et 5, dans la simulation précédente nous avons pris la valeur de 2.83 pour la permittivité relative, cette valeur produit une tension du claquage de 53827V on va démunir cette valeur et analysé le résultat pour connaitre l'influence de la permittivité relative de l'huile sur sa tension de claquage pour obtenir l'huile optimal.

IV.5.1 Variation de la permittivité relative

IV.5.1.1 Permittivité relative 2.5

Dans ce cas, la valeur de la permittivité égale 2.5 comme il est indiqué sur le tableau IV-5 ci-dessous.

Tableau IV. 5 : Condition initiale d'huile soja (Valeur de permittivité 2.5)

Description	Valeur
Conductivité thermique	ct
Coefficient de dilatation thermique	ex
Capacité thermique à pression constante	Cp
Masse volumique	dn
Viscosité dynamique	vd
Permittivité relative	2.5

Le résultat obtenu est présenté sur la figure IV-26 ci-dessous, la tension du claquage atteinte est 58012V.

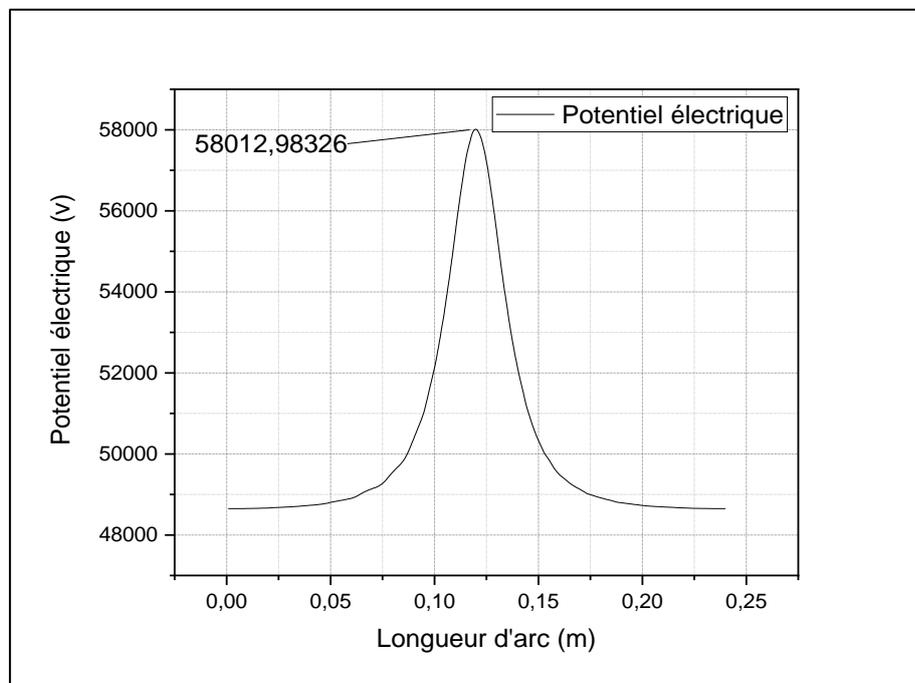


Figure IV. 26 : Potentiel électrique entre les sphères.

IV.5.1.2 Permittivité relative 2

Dans ce cas la valeur de la permittivité égale 2 comme il est indiqué sur le tableau IV-6 ci-dessous

Tableau IV. 6 : Condition initiale d'huile soja (Valeur de permittivité 2)

Description	Valeur
Conductivité thermique	ct
Coefficient de dilatation thermique	ex
Capacité thermique à pression constante	Cp
Masse volumique	dn
Viscosité dynamique	vd
Permittivité relative	2

La figure IV-27 montre que la variation de la tension de claquage en fonction de la permittivité, la valeur atteinte est 65788V donc la tension du claquage est affecté par de la permittivité.

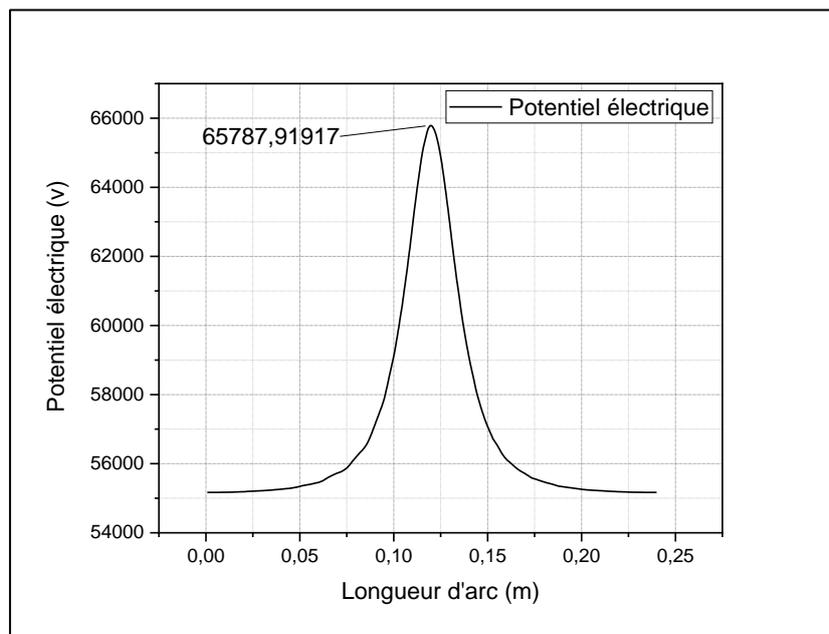


Figure IV. 27 : Potentiel électrique entre les sphères.

IV.5.2 Variation de tension de claquage

La relation entre la tension de claquage et la permittivité relative et une relation inverse montrée dans la figure IV.8, la tension de claquage diminue lorsque la permittivité augmente, A partir de ces résultats obtenus, la permittivité relative doit être plus faible possible.

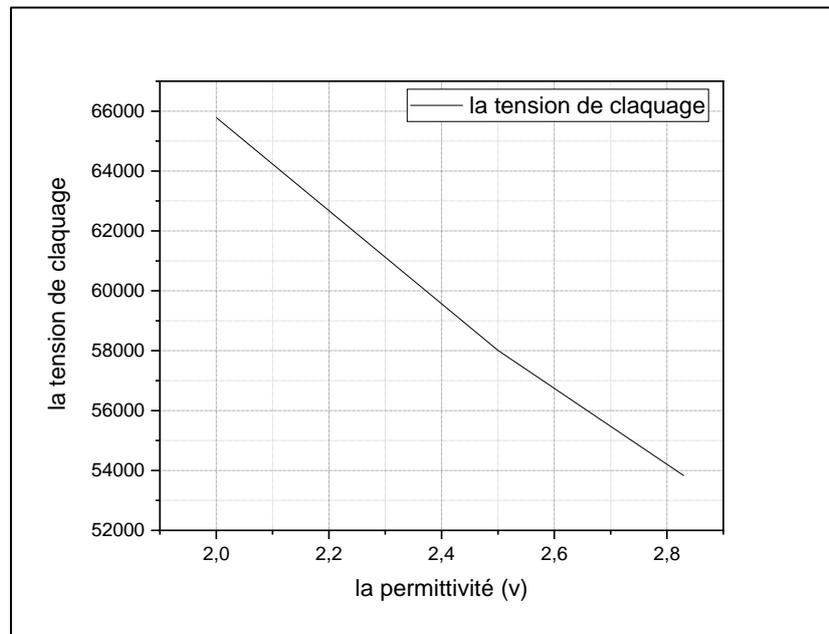


Figure IV. 28 : Influence de la permittivité sur la tension de claquage.

IV.6 Influence de la conductivité sur la tension de claquage

La conductivité σ d'un liquide est due à la présence de charges libres positives et négatives (en général des ions) en quantités égales. Sous l'effet d'un champ électrique, ces ions se déplacent provoquant ainsi un courant de conduction ($j=\sigma E$, j est la densité de courant et E le champ électrique). Dans cette partie, on varie la valeur conductivité thermique.

IV.6.1 Variation de la conductivité thermique

IV.6.1.1 Conductivité thermique 0.2

Dans ce cas, la valeur de la conductivité thermique égale 0.2 [W/(m*K)] sur le tableau IV.7

Tableau IV. 7 : condition initiale d'huile soja (Valeur de conductivité 0.2)

Nom	Expression	Valeur	Description
Vapp	90[kV]	90000 V	voltage appliqué
a	1.25[cm]	0.0125 m	diamètres des sphères
hg	2.25[cm]	0.0225 m	Gap 1
d	$2*hg - 2*a + c$	0.025 m	Distance entre les sphères
c	0.5[cm]	0.005 m	.005 m
ct	0.2 [W/(m*K)]	0.2 W/(m·K)	la conductivité thermique
dn	0.919[g/cm ³]	0.919 g/cm ³	la densité
vd	5.7e-2[Pa*s]	0.057 Pa·s	viscosité dynamique
cp	1.926[kJ/(kg*K)]	1926 J/(kg·K)	capacité thermique
ex	74[1/C]	74 1/(s·A)	expansion

La figure IV.29 représente la variation de tension de claquage, cette valeur atteint 52630V, la tension a diminuée.

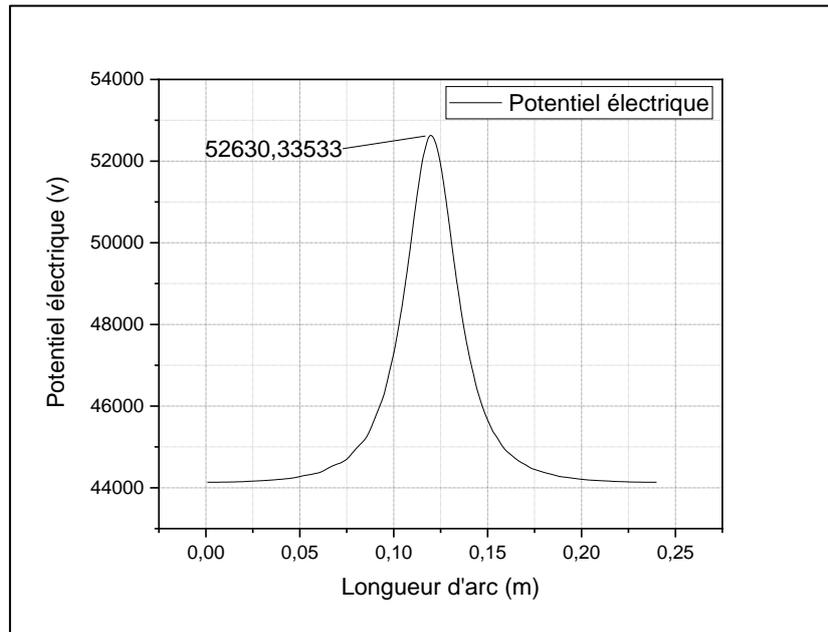


Figure IV. 29 : Potentiel électrique entre les sphères.

IV.6.1.2 Conductivité thermique 0.1 [W/(m*K)]

Dans ce cas la valeur de la conductivité thermique égale 0.1 [W/(m*K)] comme il est indiqué le tableau IV.8

Tableau IV. 8 : Condition initiale d'huile soja (Valeur de conductivité 0.1)

Nom	Expression	Valeur	Description
Vapp	90[kV]	90000 V	voltage appliqué
a	1.25[cm]	0.0125 m	diamètres des sphères
hg	2.25[cm]	0.0225 m	Gap 1
d	2*hg - 2*a + c	0.025 m	Distance entre les sphères
c	0.5[cm]	0.005 m	.005 m
ct	0.1 [W/(m*K)]	0.1 W/(m·K)	la conductivité thermique
dn	0.919[g/cm ³]	0.919 g/cm ³	la densité
vd	5.7e-2[Pa*s]	0.057 Pa·s	viscosité dynamique
cp	1.926[kJ/(kg*K)]	1926 J/(kg·K)	capacité thermique
ex	74[1/C]	74 1/(s·A)	expansion

La figure IV.30 représente la variation de tension de claquage, cette valeur atteint 58611V, la tension a augmentée.

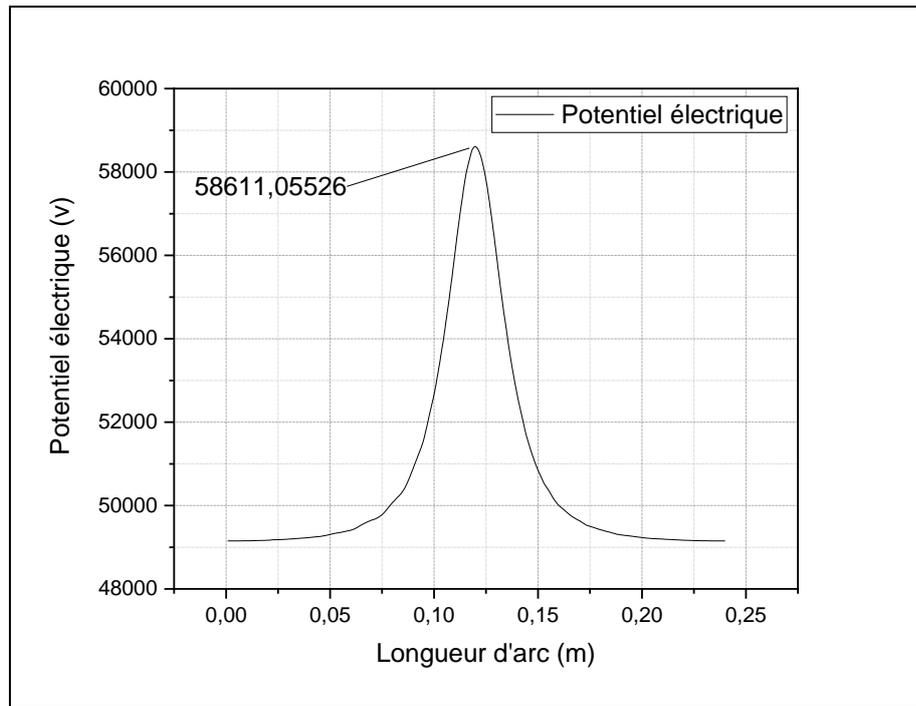


Figure IV. 30: Potentiel électrique entre les sphères.

IV.6.2 Variation de tension de claquage

La conductivité d’huile végétale influe beaucoup sur la tension de claquage, relation inverse avec la tension du claquage et la résistivité d’huile, un matériau dite isolant lorsque se résistivité est élevé, c’est à dire la conductivité de ce matériaux et faible.

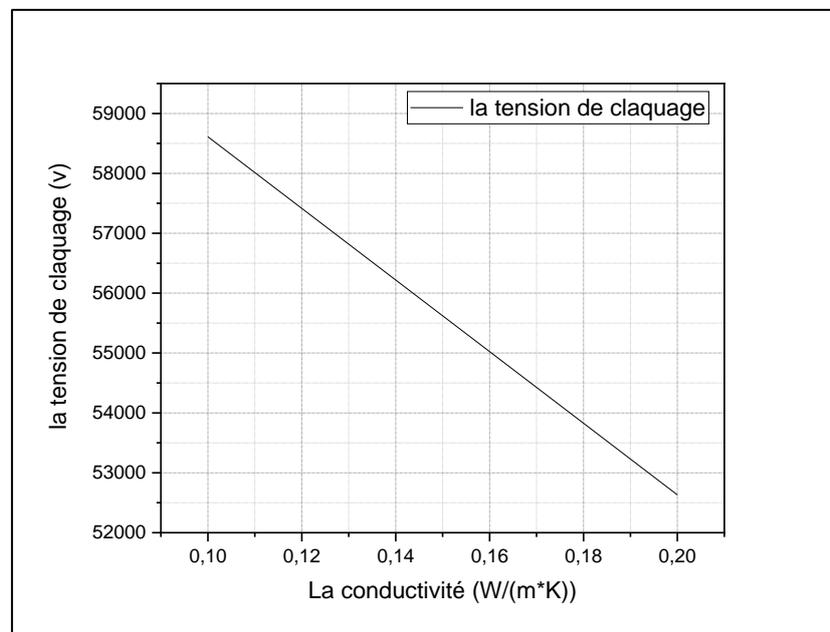


Figure IV. 31 : Influence de la conductivité sur la tension de claquage.

IV.7 Influence de la densité sur la tension de claquage

Les huiles végétales peu denses et possèdent donc une capacité thermique faible : ils absorbent très peu la chaleur. Ils possèdent également une faible conductivité : ils ne se laissent pas traverser par la chaleur. Ils sont en cela d'excellents isolants thermiques. La densité relative de la plupart des huiles comprise entre 0.840 et 0.960.

IV.7.1 Variation de la densité

IV.7.1.1 Densité relative 0.88 [g/cm³]

Dans ce cas, la valeur de la densité relative égale 0.88 [g/cm³] comme il est indiqué sur le tableau IV.9.

Tableau IV. 9 : Condition initiale d'huile soja (Valeur de la densité 0.88)

Nom	Expression	Valeur	Description
Vapp	90[kV]	90000 V	voltage appliqué
a	1.25[cm]	0.0125 m	diamètres des sphères
hg	2.25[cm]	0.0225 m	Gap 1
d	2*hg - 2*a + c	0.025 m	Distance entre les sphères
c	0.5[cm]	0.005 m	.005 m
ct	0.180 [W/(m*K)]	0.18 W/(m·K)	la conductivité thermique
dn	0.88 [g/cm ³]	0.88 g/cm ³	la densité
vd	5.7e-2[Pa*s]	0.057 Pa·s	viscosité dynamique
cp	1.926[kJ/(kg*K)]	1926 J/(kg·K)	capacité thermique
ex	74[1/C]	74 1/(s·A)	expansion

La figure IV.32 représente la variation de tension de claquage, cette valeur atteint 55620V.

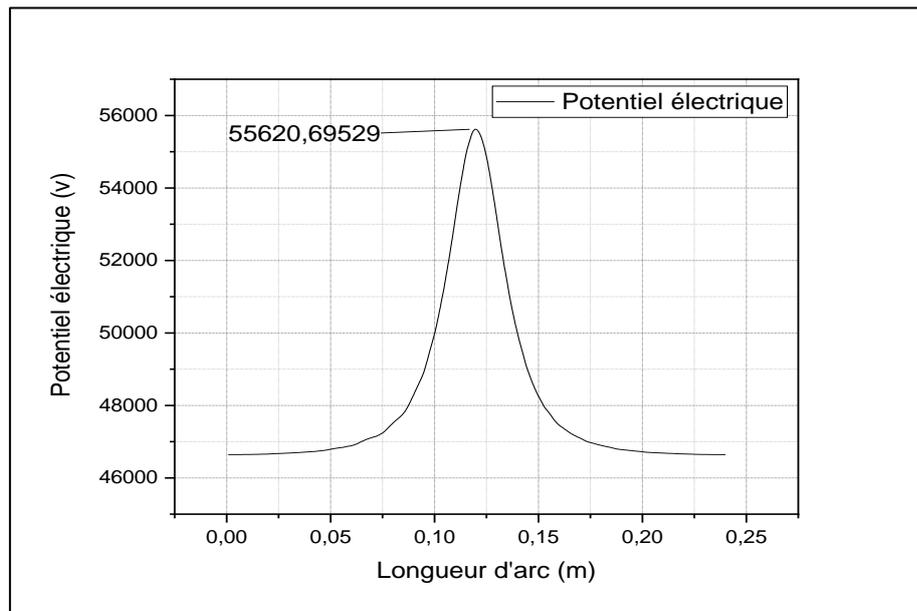


Figure IV. 32 : Potentiel électrique entre les sphères.

IV.7.1.2 Densité relative 0.85 [g/cm³]

Dans ce cas, la valeur de la densité relative égale 0.85 [g/cm³] comme il est indiqué sur le tableau IV.10

Tableau IV. 10 : Condition initiale d’huile soja (Valeur de la densité .85)

Nom	Expression	Valeur	Description
Vapp	90[kV]	90000 V	voltage appliqué
a	1.25[cm]	0.0125 m	diamètres des sphères
hg	2.25[cm]	0.0225 m	Gap 1
d	2*hg - 2*a + c	0.025 m	Distance entre les sphères
c	0.5[cm]	0.005 m	.005 m
ct	0.180 [W/(m*K)]	0.18 W/(m·K)	la conductivité thermique
dn	0.85 [g/cm ³]	0.85 g/cm ³	la densité
vd	5.7e-2[Pa*s]	0.057 Pa·s	viscosité dynamique
cp	1.926[kJ/(kg*K)]	1926 J/(kg·K)	capacité thermique
ex	74[1/C]	74 1/(s·A)	expansion

La figure IV.33 représente la variation de tension de claquage, cette valeur atteint 57295V.

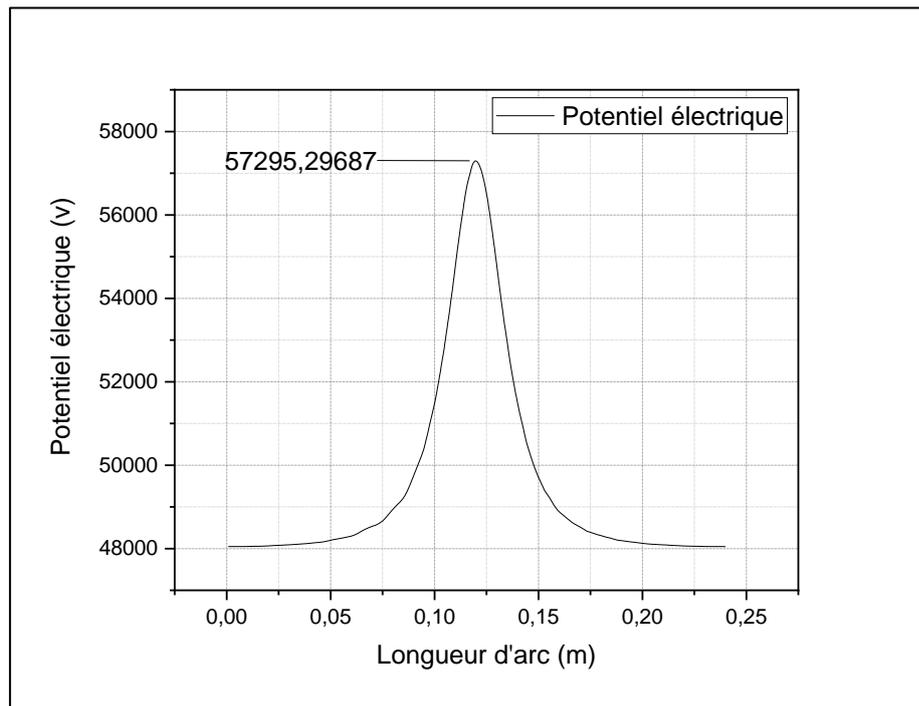


Figure IV. 33 : Potentiel électrique entre les sphères.

IV.7.2 Variation de tension de claquage

Les matériaux peu denses présentent une isolation élevée que les matériaux denses, ils possèdent également une forte résistivité puisque ils absorbent très peu la chaleur. La densité

réduire la tension de claquage on présente une relation inverse avec la tension de claquage, un matériau dite isolant sa densité est plus faible.

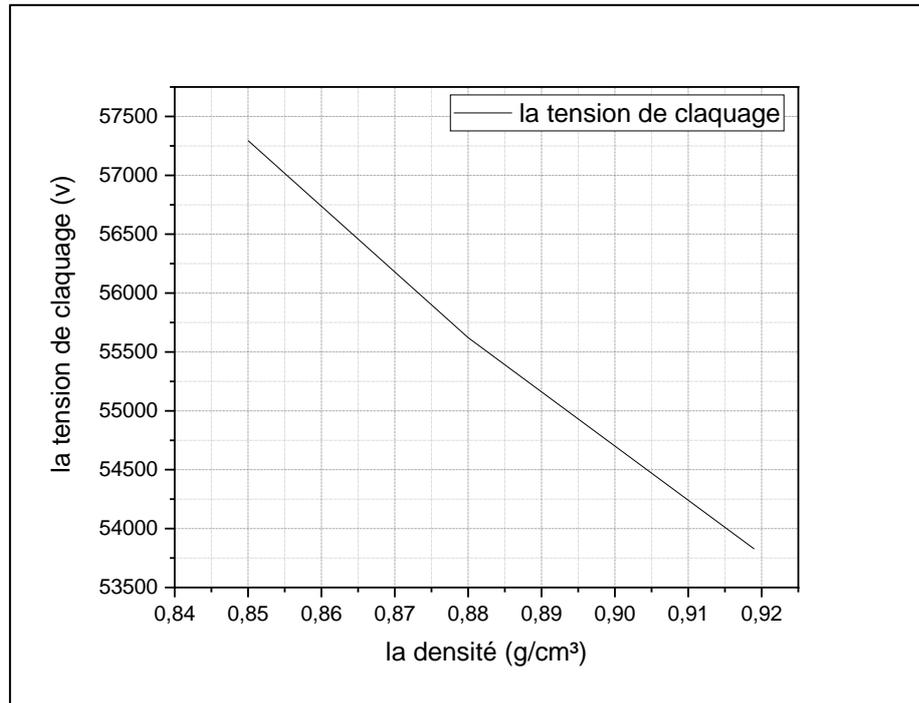


Figure IV. 34 : Influence de la densité sur la tension de claquage.

IV.8 Influence de la viscosité sur la tension de claquage

La viscosité est un paramètre physicochimique représentant la résistance à l'écoulement de l'huile sous certaines conditions spécifiques. La viscosité de l'huile (utilisée comme caloporteur dans l'appareillage de puissance), influence par conséquent le taux de transfert de chaleur et par le fait même l'augmentation de température de l'équipement immergé d'huile. La viscosité de l'huile influence également sur la vitesse des parties (contacts) mobiles dans les changeurs de prises et circuits de disjoncteurs. Les huiles à viscosité élevée sont les moins désirables, plus spécifiquement dans des conditions climatiques froides.

IV.8.1 Variation de la viscosité dynamique

IV.8.1.1 Viscosité dynamique 4.7e-2[Pa*s]

Dans ce cas, la valeur de la Viscosité dynamique égale 4.7e-2[Pa*s] comme il est indiqué sur le tableau IV.11

Tableau IV. 11 : Condition initiale de l'huile de soja (Valeur de la viscosité 4.7e-2).

Nom	Expression	Valeur	Description
Vapp	90[kV]	90000 V	voltage appliqué
a	1.25[cm]	0.0125 m	diamètres des sphères
hg	2.25[cm]	0.0225 m	Gap 1

Nom	Expression	Valeur	Description
d	$2*hg - 2*a + c$	0.025 m	Distance entre les sphères
c	0.5[cm]	0.005 m	.005 m
ct	0.180 [W/(m*K)]	0.18 W/(m·K)	la conductivité thermique
dn	0.919[g/cm ³]	0.919 g/cm ³	la densité
vd	4.7e-2 [Pa*s]	0.047 Pa·s	viscosité dynamique
cp	1.926[kJ/(kg*K)]	1926 J/(kg·K)	capacité thermique
ex	74[1/C]	74 1/(s·A)	expansion

La figure IV.35 représente la variation de tension de claquage, cette valeur atteint 55321V.

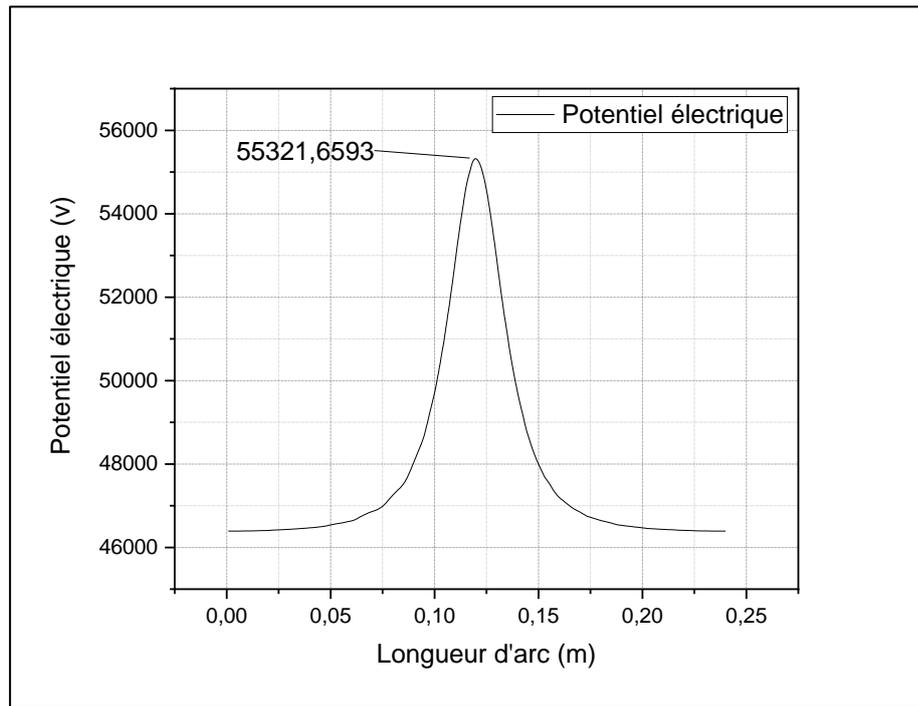


Figure IV. 35 : Potentiel électrique entre les sphères.

IV.8.1.2 Viscosité dynamique 3.7e-2[Pa*s]

Dans ce cas on introduit la valeur de la densité relative 3.7e-2[Pa*s] dans le tableau IV.12

Tableau IV. 12 : Condition initiale d'huile soja (Valeur de la viscosité 3.7e-2)

Nom	Expression	Valeur	Description
Vapp	90[kV]	90000 V	voltage appliqué
a	1.25[cm]	0.0125 m	diamètres des sphères
hg	2.25[cm]	0.0225 m	Gap 1
d	$2*hg - 2*a + c$	0.025 m	Distance entre les sphères
c	0.5[cm]	0.005 m	.005 m
ct	0.180 [W/(m*K)]	0.18 W/(m·K)	la conductivité thermique
dn	0.919[g/cm ³]	0.919 g/cm ³	la densité
vd	3.7e-2 [Pa*s]	0.037 Pa·s	viscosité dynamique

Nom	Expression	Valeur	Description
cp	1.926[kJ/(kg*K)]	1926 J/(kg·K)	capacité thermique
ex	74[1/C]	74 1/(s·A)	expansion

La figure IV.36 représente la variation de tension de claquage, cette valeur atteint 56816V.

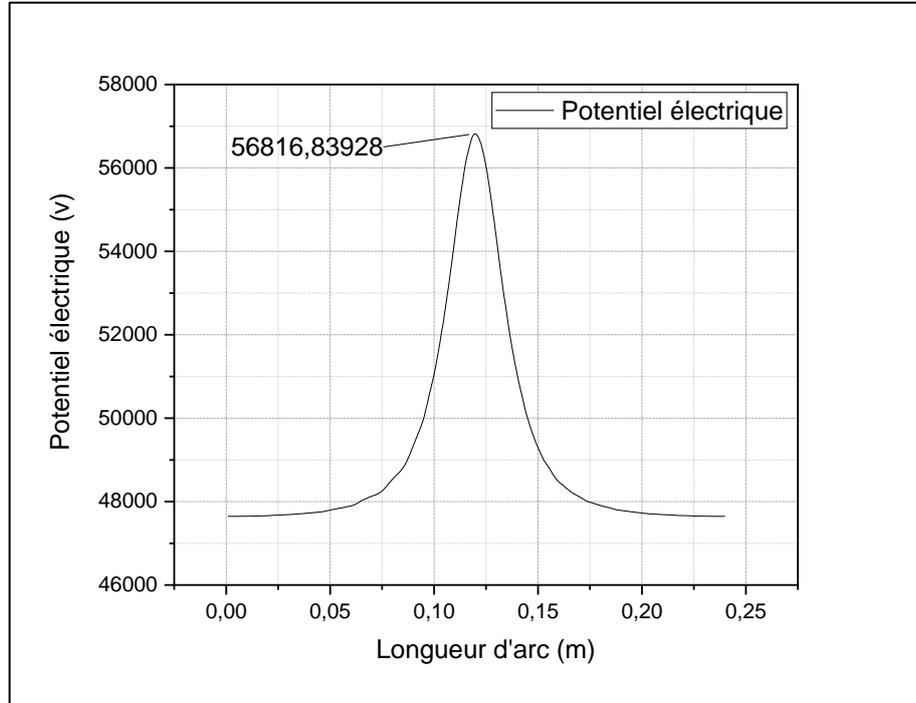


Figure IV. 36 : Potentiel électrique entre les sphères.

IV.8.2 Variation de tension de claquage

L'augmentation de la résistance à l'écoulement d'une huile isolant dégrade sa tension de claquage, à partir des résultats obtenues ; l'isolation de matériau augmente lorsque la valeur de la viscosité plus faible possible c'est à dire un matériau a une viscosité élevée est un matériau moins désirable pour l'isolation.

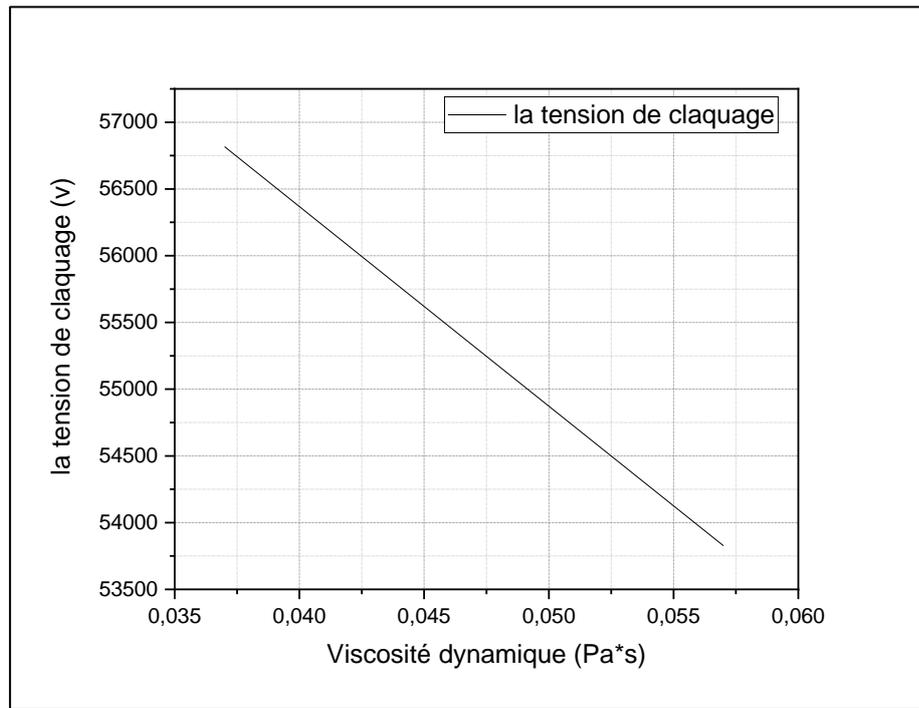


Figure IV. 37 : Influence de la conductivité sur la tension de claquage.

IV.9 Tension de claquage de l'huile minérale

Dans cette partie, on va étudier la variation de la tension de claquage d'une huile minérale les propriétés physicochimique sont présentée sur le tableau IV-13, on compare ces résultats avec celle de l'huile végétale.

Tableau IV. 13 : Condition initiale d'une huile minérale

Nom	Expression	Valeur	Description
Vapp	90[kV]	90000 V	voltage appliqué
a	1.25[cm]	0.0125 m	diamètres des sphères
hg	2.25[cm]	0.0225 m	Gap 1
d	2*hg - 2*a + c	0.025 m	Distance entre les sphères
c	0.5[cm]	0.005 m	.005 m
ct	0.137 [W/(m*K)]	0.137 W/(m·K)	la conductivité thermique
dn	0.88[g/cm^3]	880 kg/m ³	la densité
vd	7.7e-2[Pa*s]	0.07 Pa·s	viscosité dynamique
cp	0.926[kJ/(kg*K)]	926 J/(kg·K)	capacité thermique
ex	74[1/C]	74 1/(s·A)	expansion
pr	2	2	permittivité

La figure IV.38 représente la variation de tension de claquage, cette valeur atteint 71764V.

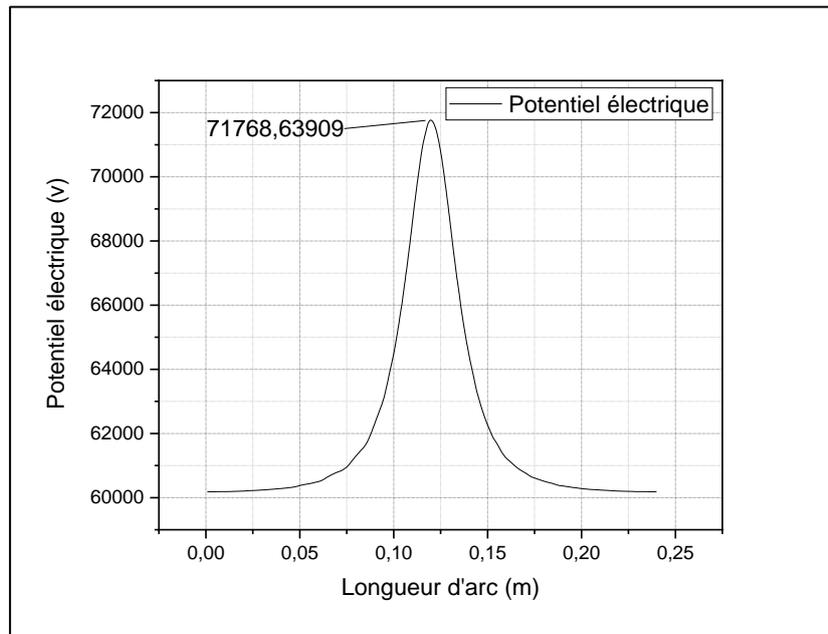


Figure IV. 38 : Potentiel électrique entre les sphères.

La figure IV-39 montre que la tension du claquage (TDC) de l'huile minérale est supérieure à la tension de claquage de l'huile végétale, une huile minérale présente une bonne isolation parce qu'elle contient une faible permittivité, plus de résistivité ...etc.

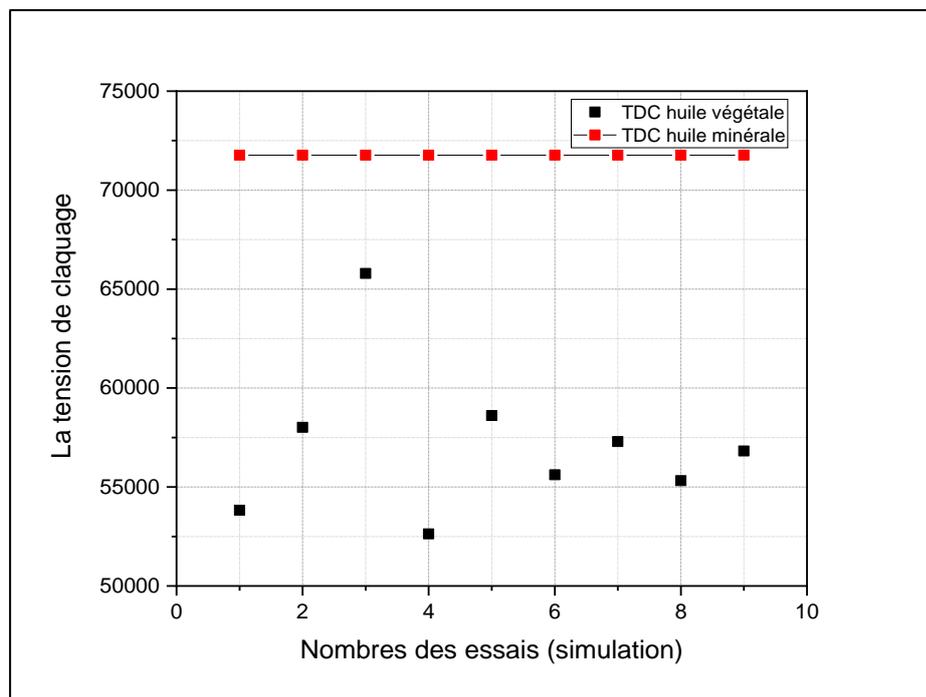


Figure IV. 39 : Comparaison entre l'huile végétale et l'huile minérale.

IV.10 Conclusion

Les propriétés physicochimiques telles que la permittivité, la conductivité, la densité et la viscosité doit être la plus faible possible pour les huiles végétales.

La tension de claquage de l'huile minérale est importante, elle est élevée que la tension de claquage de l'huile végétale, cette différence est dû aux propriétés de l'huile minérale. Pour un choix d'une huile végétale ; il faut choisir une huile qui possède des propriétés physique- chimiques faible ou bien réduire ses propriété par un mélange des huiles.

Conclusion générale

Les centrales électriques étant souvent éloignées des centres de consommation, le rôle du transformateur, élément essentiel d'un réseau électrique, est d'acheminer l'énergie électrique de son point de production jusqu'à son point de consommation. Les pannes associées aux transformateurs peuvent être classées en deux catégories :

- Internes : la dégradation du système isolant (huile papier), point chaud, décharges partielles, défaut mécanique, le vieillissement chimique ou thermique
- Externes : surtensions, surintensités, présence de polluants externes (poussières),....

Pour obtenir des informations sur l'état des équipements et d'adopter les solutions les plus adéquates qui garantissent leurs bons fonctionnements, plusieurs techniques analytiques et méthodes physico-chimiques ont été développés par l'ASTM, la CEI, ISO, etc.

Dans cette étude, nous avons modélisé la cellule de claquage en utilisant COMSOL MULTIPHYSICS 5.5. Cette cellule sert à mesurer la tension de claquage des huiles isolantes ; c'est une des méthodes de diagnostic des transformateurs de puissance. La tension de claquage est un paramètre très influencé par la présence de particules en suspension et par les conditions atmosphériques, notamment l'humidité et la température.

La cellule utilisée est en PMMA (poly méthacrylate de méthyle) connu sous le nom de Plexiglas de forme cubique (longueur égale à 7,5 cm, hauteur égale à 10 cm, largeur égale à 7,2 cm) rempli d'huile.

Les huiles utilisées dans cette étude sont des huiles végétales. Les huiles végétales sont proposées comme alternatives des huiles minérales.

L'objectif principal de cette modélisation est de calculer la distribution du potentiel (la tension de claquage) et du champ électrique entre deux électrodes immergés dans l'huile.

L'influence de plusieurs paramètres tels que la permittivité, la densité etc.... sur la de tension de claquage des huiles végétales seront aussi étudié dans cette simulation.

Les résultats obtenus dans cette étude sont :

- La tension de claquage des huiles végétales est plus faible que la tension de claquage des huiles minérales
- La tension de claquage est influencée par les propriétés physicochimiques des huiles.

L'analyse de l'huile est un outil indispensable et reste une méthode efficace pour le diagnostic des transformateurs en service et l'évaluation du degré de vieillissement.

Recommandations :

- Une étude expérimentale est nécessaire pour confirmer ces résultats.
- Etudes des mélanges à basse végétale – Recherche d'une huile optimale pour améliorer les propriétés des huiles végétales.

Bibliographie

- [1] T. V. Oommen, C. C. Claiborne, and J. T. Mullen, « Biodegradable electrical insulation fluids », IEEE Conference on Electrical Insulation and Electrical Manufacturing Coil Winding, Rosemont, Illinois, USA, pp. 465 – 468, Sep. 1997.
- [2] C. P. McShane, « Natural and synthetic ester dielectric fluids: their relative environmental, fire safety, and electrical performance », IEEE Conference on Industrial and Commercial Power Systems Technical, Sparks, Nevada, USA, 1999.
- [3] Saliha Boudraa, « Analyse des gaz dissous les huiles des transformateurs en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle », Mémoire de magister, département d'électrotechnique, université de Batna.2005
- [4] Document réf. Transformateur : odt, version du 26 janv. 2010.
- [5] N. Berger, “Liquides isolants en électrotechnique : Présentation générale”, Techniques de l'ingénieur, D 2470.
- [6] A. Beroual, “Notes de cours de Master – Matériaux pour le génie électrique”, École Centrale de Lyon, 2007.
- [7] D. Cherry, “Insulating Fluids: An Overview of Dielectric Fluids Used in Transformers”, Principal Consulting Scientist for Dielectric Fluids, October 29, 2009.
- [8] C.W. Fountain, J. Jennings, C.K. McKie, P. Oakman, M.L. Fetterolf, *Ibid.*, 74, 224227 (1997).
- [9] Christophe Perrier "étude des huiles et des mélanges à base d'huile minérale-recherche d'un mélange optimal" école doctorale de l'électronique et de l'électrotechnique de Lyon, avril 2007
- [10] Revue NYNAS, " Guide des huiles isolantes "
- [11] Mariem Ben Hamouda, « étude, conception et modélisation de la diffusion de la chaleur dans les tissus biologiques », mémoire présenté à l'université du québec à trois-rivières, mars 2015.

- [12] Seyf Eddine Hamdi, « Modélisation d'une machine asynchrone par logiciel COMSOL – Multiphysics », Mémoire de Fin d'Etudes, Université Mohamed Khider Biskra, Département de Génie Electrique, 2018.
- [13] Khelfaoui. A, Bouberma. O, « modélisation par méthode des éléments finis des phénomènes de conduction surfacique sur l'isolateur pollues », Mémoire de master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, Département de Génie Electrique, 2014.
- [14] H. Benguesmia, N. M'ziou, A. Boubakeur, «simulation of the potential and electric field distribution on high voltage insulator using the finite element method », *diagnostyka*, 2018, vol. 19, no. 2.
- [15] Hamza Slamet Amina, «Contribution à l'étude du modèle développé d'un isolateur Pollué », Mémoire de Magister en électrotechnique, université d'Oran, 2013.
- [16] fiche technique/Québec, traitement thermique de verre, version 2.1.
- [17] 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.