

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de Technologie
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
Filière : Génie électrique
Spécialité : Réseaux électriques et la technique de la haute
tension
Thème

Etude de l'isolation dans les grands espaces d'huile

Présenté Par :

- 1) MEGHERBI WAFIA.
- 2) BELABBES ASMA.

Devant les jurys composés de :

Mlle. Touhami Aicha	MAA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Mr. ZELMAT Samir	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Mr. Berrached Djelloul	MAA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur

Année universitaire 2016/2017

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma très chère et douce mère Souad, et mon très cher père Mohamed qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, son patience, l'encouragement et tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils.

Comme je dédie aussi ce travail à mon grand-père et ma grand-mère pour Leurs appels à moi pendant la prière qui sont l'essence de ma réussite dans tout au long de mes études.

À mon cher frère ilase Qui m'a donné le soutien moral.

À mon encadrant Mr Zelmat Samir.

À tous les professeurs qui m'ont enseigné.

À toute ma grande famille.

À mes chers amis : Rahil, zoulikha, Souad et Asma.

À tous ceux qui me sont chers sans citer les noms.

Megherbi wafaa

Dédicace

Je dédie ce mémoire

A celui qui a toujours garni mes chemins avec force et lumière

Mon très cher père.

A la plus belle perle du monde Ma mère.

A mes sœurs

Karima, Amina.

A mon frère Rachid, et Mohammed, Azzedine, aymen.

A tous mes amies, kaltoum, Imane, Sarah et A mon binôme wafaa,

Mon homme

A tous mes collègues et mes amis partout

A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science

Et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien

Et la prospérité de l'humanité.

Belabbes Asma

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions le Dieu, tout puissant clément et miséricordieux, notre créateur de nos avoir donné les forces, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste.

*Nous tenons, avant tout, à exprimer nos profondes gratitude à notre encadrant monsieur **ZELMAT SAMIR** qui a proposé le thème de ce mémoire, Qu'il trouve ici mon respect et ma gratitude pour ses conseils, ses encouragements, à travers leur connaissance et son expérience dans le domaine, pendant le début à la fin de ce travail.*

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury :

*Melle **TOUHAMI AICHA** pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury de cette mémoire.*

*On tient également à remercier Mr **BERRACHED DJELLOUL** examinateur pour l'intérêt qu'il a porté au travail effectué.*

*Nous adressons nos vifs remerciements à tous les enseignants de l'université **BELHADJ BOUCHAIB D'AIN-TEMOUCHENT** qui ont contribués à nos formations durant toutes nos études.*

Enfin nous remercions nos familles et nos amis pour leur soutien moral et leurs aides, ainsi que tous ce qui nous avaient soutenu et aidé tout au long de ce travail.

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1 : Vue d'Un transformateur de puissance dans un poste électrique.....	2
Figure I.2 : Schéma de principe d'un transformateur monophasé	3
Figure I.3 : Position des transformateurs sur le réseau d'énergie électrique.....	3
Figure I.4 : vue d'un transformateur à colonne et cuirassés.....	4
Figure I.5 : transformateur à colonne.	5
Figure I.6 : transformateur cuirassé.....	5
Figure I.7 :Isolation électrique papier	8
Figure I.8 :Isolation électrique carton	8
Figure I.9 : Structure générale d'une huile végétale.	11
Figure II.1 : Champ uniforme (plan/plan)	13
Figure II.2 : Champ divergent (pointe/plan).....	14
Figure II.3 : Variation du champ électrique « E_{pd} » en fonction de la distance pour différentes Configurations (courbes Weidman).....	15
Figure II. 4 : I) : Configuration géométrique du model. II) Répartition uniforme des lignes.....	17
Figure II.5 : Champ électrique uniforme dans l'huile.	17
Figure II.6 : Comparaison entre la valeur moyenne et la valeur admissible du champ.....	18
Figure II.7 : Subdivision du volume d'huile en trois canaux à l'aide des barrières carton.	19
Figure II.8 : Marges positives dans les trois canaux d'huile.....	21
Figure II.9 : Modification de l'emplacement des barrières carton.....	21
Figure II.10 : Optimisation des marges de sécurité sur les trois canaux d'huile.....	22
Figure III.1 : présentation de l'exemple étudiant.	23
Figure III.2 : Vue générale sur notre travail (coupe 2D).	24
Figure III. 3 : Fenêtre principale du logiciel COMSOL 3.5a MULTIPHYSICS.	25
Figure III.4 : Les différents éléments de l'interface utilisateur de COMSOL 3.5a.....	26
Figure III.5 : les accessoire de la barre d'outil de l'interfaces de COMSOL 3.5a.	26
Figure III.6 : Géométrie du modèle en 2D pour le cas1 (ϕ 80mm).	28
Figure III.7 : Géométrie de notre modèle en 2D pour cas2 (ϕ 20mm).	28
Figure III.8 : Fenêtre de modèle physique (sous domaine, limite) pour cas1.	29
Figure III.9 : Fenêtre de modèle physique (sous domaine, limite) pour cas2.	30
Figure III.10 : Vue sur le maillage global avec un zoom de la partie encadrée cas1.	30
Figure III.11 : Vue sur le maillage global avec un zoom de la partie encadrée cas2.	31
Figure IV.1 : Répartition des lignes équipotentielles pour les deux cas étudiés (cas1 et 2).	32

Figure IV.2: Dégradé du champ électrique pour dans les deux cas (cas 1 et cas 2).	33
Figure IV.3: Chemins utilisés pour le calcul des contraintes électriques dans l'huile.	33
Figure IV.4: Variation du champ électrique dans l'huile en allant du câble HT vers le tube.	34
Figure IV.5: Courbe du champ électrique réel et de sa moyenne cumulée.	36
Figure IV.6: Comparaison entre la courbe Weidmann avec le champ moyen cumulé.	36
Figure IV.7: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le cas 1	37
Figure IV.8: Courbe du champ électrique réel et de sa moyenne cumulée - Cas 2.	38
Figure IV.9: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le cas 2.	38
Figure IV.10: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le Cas 1 $\phi 80\text{mm}$ – $U = 215\text{kV}$.	39
Figure IV.11: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le Cas 2 $\phi 20\text{mm}$ – $U = 215\text{kV}$.	40
Figure IV.12: Variation de la marge de sécurité en fonction de la distance dans l'huile	40

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau II.1: Coefficients “A” des courbes Weidmanne.....	16
Tableau II.2: représenté les données de la division du premier canal.	19
Tableau II.3: représenté les données de la division du deuxième canal.	20
Tableau II.4: représenté les données de la division du troisième canal.....	20
Tableau IV.1 : Résultats d’analyse avec la méthode simplifiée.....	39

Introduction
générale

Introduction générale :

Un transformateur de puissance est un important dispositif ou partie d'un réseau, tant du point de vue de sa fonction que de son prix élevé. De ce fait, sa disponibilité est très importante pour éviter des pertes de production dues à des pannes. Pour cela, leur fabrication nécessite des quantités importantes de papier et d'huile isolante. Ces quantités sont proportionnelles à la puissance assignée d'un transformateur et à sa tension de service.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés sur la méthode d'analyse des contraintes électrique dans les grandes distances d'huile diélectrique dans une configuration d'un champ électrique non uniforme.

Nous avons également étudié les effets de la variation de champ électrique en fonction de changement de diamètre, tout ça se fait dans le but de valider un bon système d'isolation et de mettre en évidence la méthode de calcul du champ électrique utilisée dans les larges distances.

À cet effet notre étude est composée de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre on présente des rappels sur le principe de fonctionnement du transformateur. On présentera son rôle et leurs principaux éléments, et finalement on présentera le système d'isolation et les matériaux isolants du transformateur ainsi que les différents type d'isolation (solide, liquide).

Dans le deuxième chapitre on a donné des rappels sur le champ électrique, et on a présenté aussi notre méthode de calcul des contraintes électriques dans l'huile avec l'utilisation de la méthode de « Weidmann ».

Le troisième chapitre est réservé à l'étude de simulation qui sera effectué dans notre exemple avec le logiciel « Comsol 3.5a » .

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats et des calculs de la simulation réalisée par « Comsol 3.5a ».

Chapitre I

Présentation des transformateurs de puissance

I.1 Introduction

Les transformateurs sont des machines statiques à induction électromagnétique généralement utilisés pour modifier les caractéristiques de l'énergie électrique alternative afin de la rendre aussi commodes que possible à tous les stades, de la production, du transport de la distribution et de l'utilisation. cet appareil est d'un emploi absolument universel, en effet il transforme les signaux des sources de tensions et de courants sinusoïdaux en signaux de même fréquence mais de valeurs efficaces généralement différentes. [1]



Figure 1.1: Vue d'Un transformateur de puissance dans un poste électrique

I.2 Principaux éléments du transformateur :

Un transformateur est une machine fixe qui assure la conversion d'une tension Alternative à une autre tension alternative mais de même fréquence. Et contient d'un ou plusieurs enroulements de fil enroulés autour d'un noyau ferromagnétique commun.

Habituellement, ces enroulements ne sont pas reliés électriquement. Ils sont reliés par le flux magnétique commun confiné dans le noyau. les transformateurs sont généralement Monophasés ou triphasés. [2]

Ses principaux composants sont un noyau ferromagnétique, sur lequel sont bobinés deux enroulements. Le conducteur du premier enroulement a un diamètre plus grand que le conducteur du second. L'enroulement contient un fil de diamètre plus faible véhicule un courant alternatif au niveau de tension plus élevée et a l'intensité de courant plus faible (enroulement HT) ; au contraire, dans le fil de diamètre plus important la tension est plus faible et le courant plus élevé (enroulement BT). L'énergie est transférée du primaire au secondaire par l'intermédiaire du circuit magnétique [3].

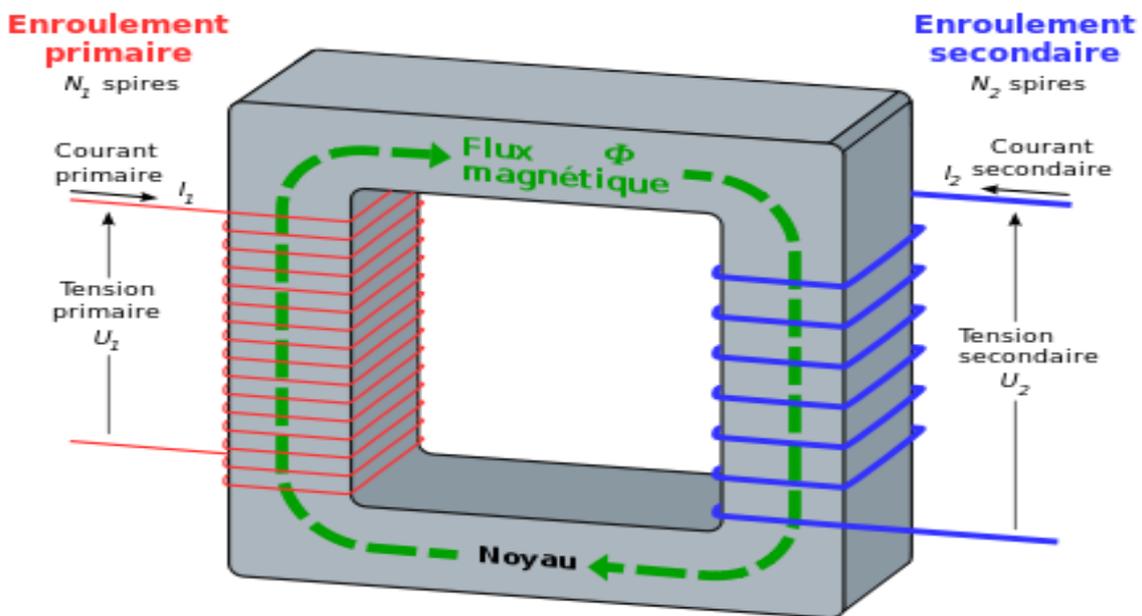


Figure I.2: Schéma de principe d'un transformateur monophasé

Le transformateur peut jouer le rôle d'un élévateur de tension (transport de l'énergie électrique) et le rôle d'abaisseur de tension (transformateur de distribution).

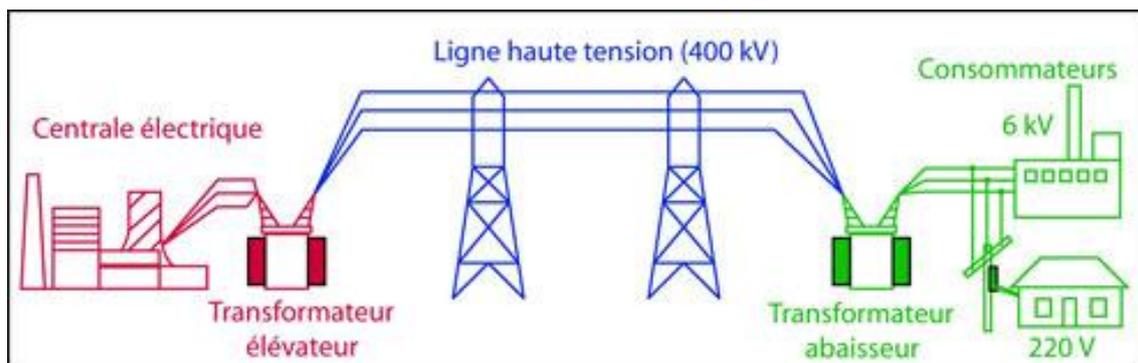


Figure I.3: Position des transformateurs sur le réseau d'énergie électrique.

I.3 Différents types de transformateurs :

On distingue deux principales technologies qui sont les transformateurs à colonnes et les transformateurs cuirassés. [1]

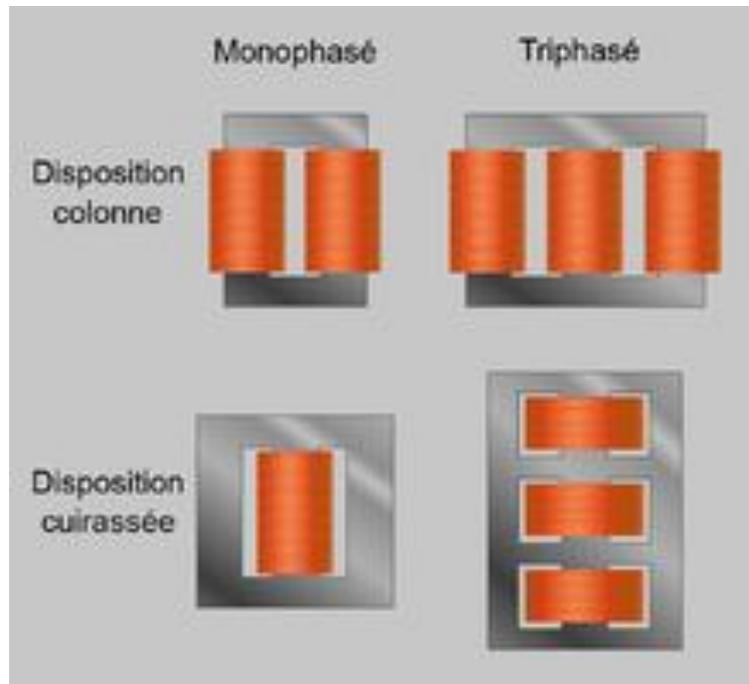


Figure I.4: vue d'un transformateur à colonne et cuirassés.

I.2.1 Transformateur à colonnes :

Cette catégorie de transformateur qui s'appelle colonne contient deux enroulements concentriques par phase. ces enroulements sont montés sur un noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique.

Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs. les conducteurs sont de dimensions variables et de topologies multiples, selon les puissances mises en jeu. [4]

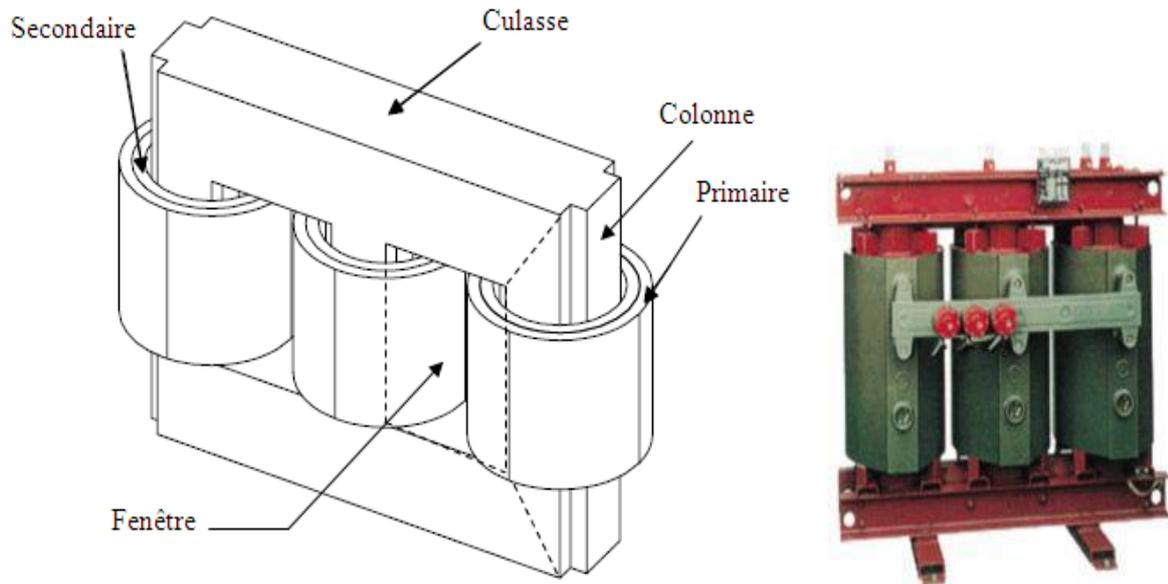


Figure I.5: transformateur à colonne.

I.2.2 Transformateur cuirassé :

Dans cette catégorie de transformateur cuirassée, le circuit magnétique entoure complètement le bobinage, ce qui lui donne un fonctionnement à "flux libre". La cuve assure le serrage de l'ensemble et le transformateur ainsi constitué est alors assuré d'une excellente rigidité mécanique associée à une grande compacité. En contrepartie, le confinement résultant rend plus difficile le refroidissement de l'ensemble. [4]

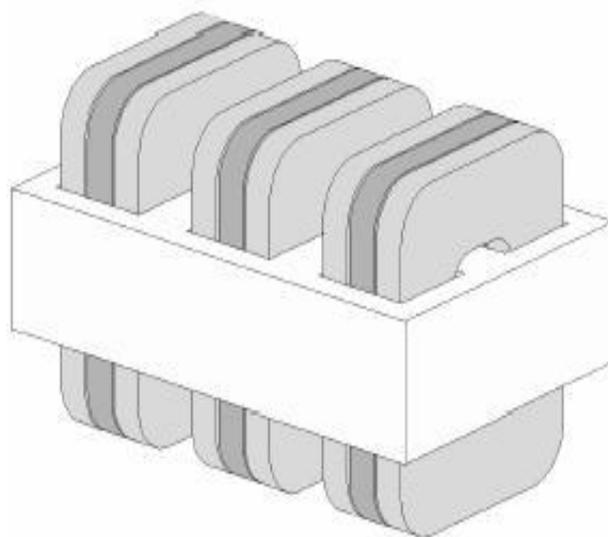


Figure I.6: transformateur cuirassé

Les transformateurs cuirassés sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition, où les surtensions transitoires sont fréquentes.

I.3 Le système d'Isolation des transformateurs :

L'isolation des parties actives des transformateurs de puissance est réalisée à l'aide de papier, de carton et d'huile (minérale ou synthétique). malgré que ce système d'isolation est l'élément le plus faible dans le transformateur, mais ce représente la partie la plus importante du transformateur et pour la maintenir, il nécessite une attention particulière. [5]

I.4 Les matériaux isolants :

Utilisés entre les couches conductrices et/ou entre les couches conductrices et le matériau magnétique d'un transformateur. les principales caractéristiques de ces matériaux sont leur rigidité diélectrique (la plus grande possible est de l'ordre de $150 \text{ V}/\mu\text{m}$ pour le mica) et leur permittivité relative (classiquement entre 1,5 et 5). se trouve aussi quelques inconvénients en raison de l'augmentation du couplage capacitif entre les couches conductrices. leur présence donnera également naissance à un entrefer ce qui augmentera les fuites donc réduira les performances. dans les transformateurs on rencontre en général des matériaux isolants comme des oxydes de silicium. d'autres auteurs utilisent dans leurs travaux des isolants comme les polyamides à cause de leur tenue mécanique et thermique, de leur faible constante diélectrique et de leur facilité de mise en œuvre (dépôt à la tournette) [6].

I.5 Isolation solides :

On dire isolation solide des transformateurs car ce dernier est réalisée à l'aide de papier et de carton. le papier utilisé pour isoler les enroulements, comme le carton, et il assure l'isolation entre les enroulements et entre les enroulements et le noyau. [5]

I.5.1 Rôle d'isolations solides :

Son rôle se trouve un grand nombre de dispositifs de production, de transport, de distribution et d'utilisation de l'énergie électrique. dans les transformateurs et plus particulièrement dans les transformateurs de puissance, les isolants solides assurent plusieurs fonctions. Ils sont utilisés pour maintenir mécaniquement les bobinages et pour matérialiser les canaux de

circulation du liquide de refroidissement. selon leur nature, les isolants solides sont regroupés en deux catégories : organique ou inorganique [7].

I.5.2 Principaux type d'isolation solide :

➤ **Les isolants inorganiques :**

- ❖ **Les verres** : utilisés pour l'isolement des lignes électriques aériennes.
- ❖ **Les céramiques et oxydes** : utilisé pour l'isolation haute ou basse tension, haute fréquence, sous vide et dans les condensateurs;
- ❖ **Les micas et produits micacés** : particulièrement importants dans le secteur de l'isolation à la masse des bobinages des stators de machines tournantes alternateur de tension nominale comprise entre 1 et 30 kV. [7]

➤ **Les isolants organiques :**

Utilisés généralement dans le domaine de la câblerie, des condensateurs, des alternateurs, des transformateurs et des moteurs et aussi dans les dispositifs électroniques et composants de puissance. il est divisé entre matériaux naturels (caoutchoucs, paraffine et papier) et synthétiques (élastomères, polymères et composites). [7]

I.5.3 Cartons et papier :

Ce sont des matériaux isolants possédant des caractéristiques diélectriques excellentes. l'imprégnation par un isolant liquide, essentiellement l'huile minérale leur donne une rigidité diélectrique merveilleuse. le papier kraft est l'un des papiers les plus utilisés dans l'industrie électrique. ces isolants solides sont constitués de fibres de celluloses (chaînes de glucose extraites de la pulpe de bois ou de fibres de coton). les celluloses sont formées de longues chaînes comprenant environ 1200 anneaux de glucose reliés par des ponts d'oxygène. [8]

Pour les cartons leur nature diélectrique est représenté l'isolent électriquement des bobinages entre eux. de plus, leur porosité leur permet d'être imprégnés par le liquide isolant et caloporteur qui circule dans le transformateur. les cartons pour transformateurs sont conçus à partir de pâte cellulosique chimique de type kraft. [7]

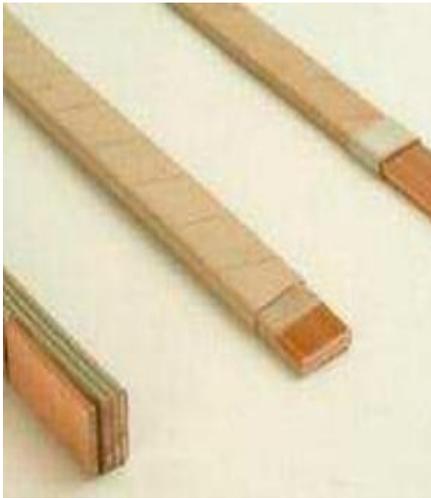


Figure I.7: Isolation électrique papier



Figure I.8: Isolation électrique carton

I.6 Isolant liquide :

Il se compose par les liquides isolants et constitués principalement par les huiles minérales, les huiles végétales et les huiles de synthèse. les huiles minérales couvrent 90 à 95 % du marché des liquides isolants, cela est dû à leur faible coût [5].

I.6.1 Huile diélectrique :

Généralement sont utilisés pour remplir les transformateurs, l'huile isolante fournit un support d'isolation, ainsi qu'un milieu de transfert de chaleur qui évacue la chaleur produite dans les enroulements et le noyau de fer.

La résistance électrique et la durée de vie d'un transformateur dépendent principalement de la qualité de l'huile isolante, il est très important d'utiliser une huile isolante de qualité .et il doit généralement satisfaire aux exigences suivantes :

- 1/ Fournir une résistance électrique élevée.
- 2/ Permis un bon transfert de chaleur.
- 3/Avoir une faible viscosité d'huile c'est à dire, avoir une plus grande fluidité.
- 4/ Avoir un point d'écoulement bas - huile à faible point d'écoulement cessera de s'écouler seulement à de basses températures.

5/ Avoir un point d'éclair élevé. qui caractérise sa tendance à s'évaporer. Lorsque l'huile se vaporise, il perd en volume, sa viscosité augmente, et un mélange explosif peut être formé avec l'air au-dessus de l'huile

6/ Avoir une stabilité chimique pour assurer un service continu. [9]

I.6.2 Les principales qualités recherchées pour une huile de transformateurs :

- Une haute rigidité diélectrique.
- Une faible viscosité et un bas point d'écoulement pour assurer sa circulation.
- Un point d'éclair (ou point d'inflammabilité) élevé.
- Une bonne stabilité chimique essentiellement vis-à-vis des phénomènes d'oxydation et de décomposition. [5]

I.6.3 Principaux type d'isolant liquide :

Généralement il n'existe pas de liquide isolant qui peut remplir toutes les caractéristiques demandé pour une application particulière. les caractéristiques électrique, chimique et physique d'un liquide diffèrent donc d'une application à une autre. les huiles isolantes sont classées selon leurs origines. on distingue trois types : les huiles végétales (produit 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. en effet, les huiles végétales furent les premières utilisées, ensuite les huiles minérales ont été développées, puis les liquides de synthèse ont été fabriqués par la suite pour pallier aux lacunes de l'huile minérale dans certaines applications. dans ce qui suit, nous présentons les trois types d'isolants liquides utilisés dans les transformateurs. [7]

I.6.3.1 Huile minérale :

L'huile minérale est obtenue à partir du raffinage du pétrole brut, sont utilisées comme isolants dans les équipements électriques depuis plus d'un siècle. mis à part les transformateurs de distribution, lesquels sont soumis à des contraintes de fonctionnement particulières, les transformateurs immergés sont généralement remplis d'huile minérale. les caractéristiques principales requises pour l'huile minérale sont :

- Une faible viscosité et un bon point d'écoulement pour assurer sa circulation.
- Un point éclair élevé.

- Une bonne stabilité chimique vis-à-vis des phénomènes d'oxydation et de décomposition.
- Une rigidité diélectrique élevée. [8].

I.6.3.2 Huiles synthétiques :

Les huiles synthétiques sont utilisées lorsque les caractéristiques requises ne sont pas remplies par les huiles minérales. c'est le cas en particulier lorsqu'il est question d'améliorer la résistance au feu (transformateurs) ou lorsque l'on cherche une meilleure stabilité thermique et de grandes performances diélectriques (câbles et condensateurs). il existe quatre principaux types de liquides synthétiques :

- ❖ Les hydrocarbures aromatiques ;
- ❖ Les hydrocarbures aliphatiques tels que les polyoléfines ;
- ❖ Les esters synthétiques ou esters organiques (esters de pentaérythritol, les phtalates) ;
- ❖ Les silicones.

Les liquides synthétiques sont un peu dans une position intermédiaire entre les PCB et les huiles minérales à cause de leur point d'éclair et leur température d'auto-inflammation. les liquides synthétiques appartiennent aux liquides ayant un point d'éclair élevé. on les appelle également liquides ininflammables (liquides qui ont un point d'éclair minimum au-dessus de 300 °c). en raison de ce degré élevé de résistance à l'inflammation, ils sont utilisés dans les transformateurs situés dans les zones urbaines (c'est-à-dire là où la sécurité des personnes et des biens pourrait être compromise par le feu). [8]

I.6.3.3 Huile végétale ou ester naturel :

Leur composition chimique est celle d'un triester provenant principalement de triglycérides. La formule d'un ester est $R-COO-R'$. La figure I.3 donne la structure chimique d'une huile végétale.

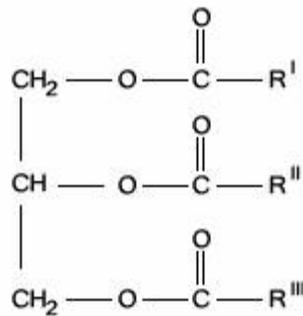


Figure I.9: Structure générale d'une huile végétale.

Les huiles végétales (ou esters naturels) sont obtenues par estérification d'un trialcool 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 (sans double ou triple liaison) ou insaturés et parfois hydroxylés. les triglycérides sont obtenus par trituration (broyage et pression) des grains.

les huiles végétales sont en général très peu toxiques et possèdent une excellente biodégradabilité. ces qualités sont dues notamment à une faible résistance à l'oxydation et l'hydrolyse. ces deux caractéristiques, qui sont favorables à l'aspect éco-toxicologique, représentent un désavantage important pour les applications électrotechniques. en outre, leur comportement diélectrique n'est pas très élevé. malgré ces inconvénients, les huiles végétales sont déjà utilisées dans les transformateurs de distribution et des tentatives sont en cours pour étendre leur utilisation dans les transformateurs de puissance. deux unités ont été d'ailleurs installées ces dernières années : l'une au royaume-uni (90 MVA /132 kV) et l'autre au Brésil (245 kV/22 MVAR) [8].

I.7 Rôle des huiles isolantes dans les transformateurs :

Les huiles isolantes sont utilisées en électrotechnique comme imprégnant d'isolations cellulosique ou comme produit de remplissage de matériels électrique très divers :

Transformateurs (de puissance, de distribution, de traction, de four, de mesure...), réactances, condensateur, câbles, traversées, disjoncteurs, changeurs de prise, etc...

Les volumes d'huiles employées varient de quelques litres pour les condensateurs, à plusieurs dizaines de milliers de litres pour les transformateurs de puissance. Leur rôle principal est

d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer la tenue diélectrique de l'isolation solide sachant que la rigidité diélectrique des liquides est nettement supérieure à celle des gaz. Cependant, dans beaucoup d'applications, ils servent à la fois à assurer l'isolation électrique et l'évacuation de la chaleur d'un assemblage, comme dans le cas des transformateurs. [10]

I.8 Conclusion :

Dans ce chapitre on a donné une vue d'ensemble sur les transformateurs de puissance, et on a détaillé les différents types d'isolants utilisés. Notre étude s'intéresse plus particulièrement aux isolants liquides (les huiles) et la méthode de calcul pour déterminer leur efficacité dans l'isolement du transformateur. Le chapitre suivant présentera une méthode d'analyse pour le calcul des contraintes électriques dans l'huile qui nous servira dans l'analyse des résultats de notre travail de simulation.

Chapitre II
méthode de calcul
des contraintes
électriques dans
l'huile

II.1 Introduction :

Nous présentons dans ce deuxième chapitre les bases et les équations de calcul avec la méthode de Weidman qu'on va utiliser dans notre étude pour la modélisation d'un problème électrotechnique à travers un petit rappel sur le champ électrique.

II.2 Rappels sur le champ électrique :

II.2.1 Définition :

Le champ électrique est lié à la tension. Il se mesure en volts par mètre (V/m). Près des lignes à haute tension, le champ électrique se mesure généralement en kilovolts par mètre (KV/m). Plus la tension d'alimentation d'un appareil est grande, plus le champ électrique qui en résulte est intense. Le fil d'un appareil branché dans une prise de courant génère un champ électrique, même si l'appareil n'est pas en marche [11].

II.2.2 Champ uniforme :

Un champ électrique E uniforme, a une même valeur, même direction et même sens en tout point de l'espace. Il s'obtient entre deux armatures métalliques planes A et B séparées d'une distance d , entre lesquelles une tension est appliquée Figure (II.1).

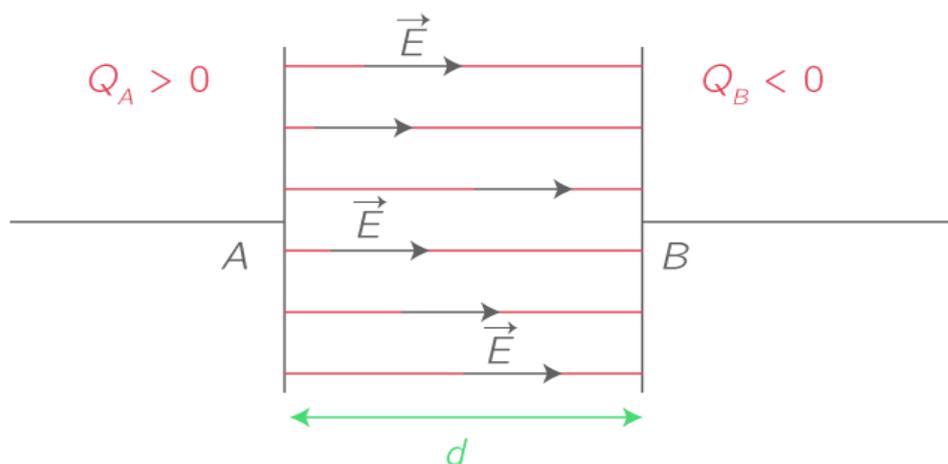


Figure II.1 : Champ uniforme (plan/plan).

Ce champ est orthogonal aux armatures, orienté de l'armature de plus haut potentiel vers l'armature de plus bas potentiel. La valeur du champ électrique moyen s'exprime selon la formule suivante :

$$E = \frac{V}{d} \dots\dots\dots (I)$$

Avec v est la tension appliquée entre les électrodes, et d est la distance les séparant.

Dans le cas d'un champ uniforme, le champ électrique maximum est égal au champ électrique moyen dans la configuration plan/plan. [12].

II.2.3 Champ non uniforme ou divergent (pointe/plan):

Dans un intervalle isolant, compris entre deux électrodes dont au moins une n'est pas plane, le champ n'est pas uniforme : il atteint un maximum en un point donnée, souvent au voisinage d'une pointe comme le montre la figure (II.2). [13]

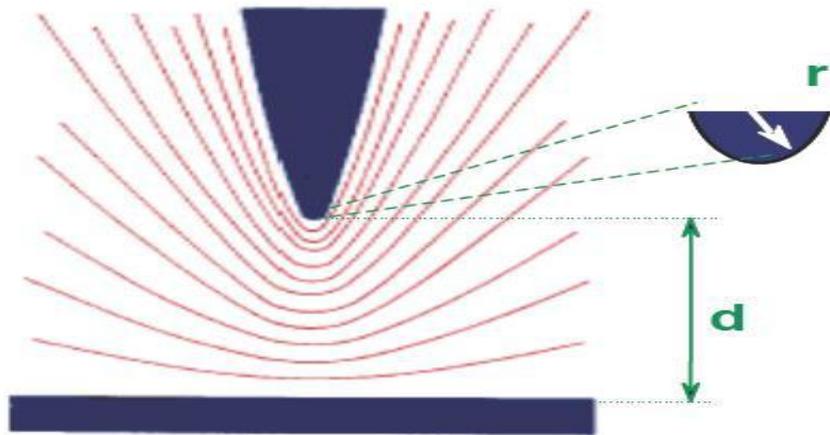


Figure II.2: Champ divergent (pointe/plan).

La valeur du champ électrique moyen s'exprime toujours selon la formule : $E = \frac{V}{d}$, mais dans la configuration pointe/plan le champ électrique maximum est très supérieur au champ électrique moyen, qui s'exprime selon la formule suivant dans le cas de la configuration de la figure (II.2) à titre d'exemple :

$$E = \frac{2V}{r \ln\left(\frac{4d}{r}\right)} \dots\dots\dots (II)$$

Avec r est le rayon de courbure de la pointe, v est la tension appliquée entre les électrodes, et d est la distance les séparant.

II.3 Méthode de calcul de Weidmann :

Weidman, un fabricant suisse de carton et de papier diélectrique, qui à la suite de nombreux essais et travaux de recherche sur la tenue diélectrique dans les grandes espaces (ou distances) d'huile, a établi des courbes largement utilisées par les constructeurs de transformateurs de puissance. Ces courbes montrent que la rigidité diélectrique de l'huile diminue avec la distance entre les électrodes.

Elles montrent également, que la nature des électrodes (nue ou isolée) ainsi que la qualité d'huile (propre ou mal dégazée) ont une influence non négligeable sur la tenue diélectrique. La figure (II.3) montre la variation de «Epd » en fonction de la distance dans l'huile.

«Epd » étant la valeur du champ électrique correspondant à 1% de probabilité d'apparition de décharges partielles. [14]

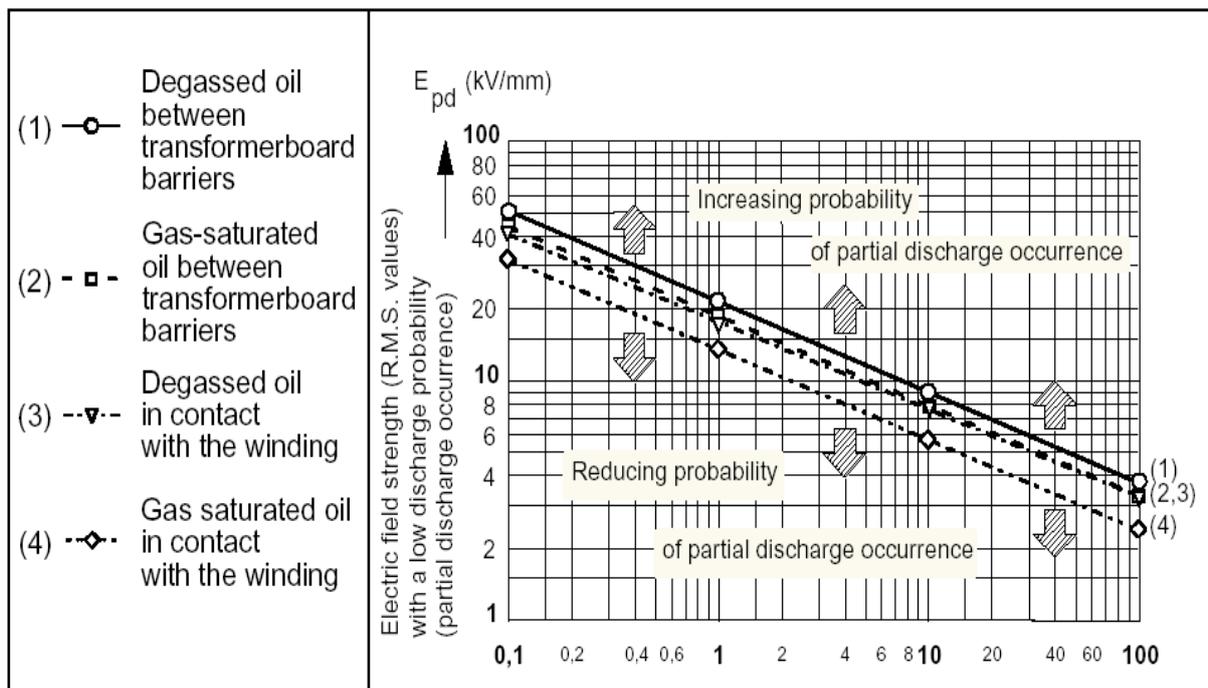


Figure II.3 : Variation du champ électrique « Epd » en fonction de la distance pour différentes Configurations (courbes Weidman).

Différentes courbes ont été établies en fonction de la nature des électrodes et de la qualité de l'huile. L'équation reliant la variation de « Edp » et la distance, s'écrit sous la forme suivante :

$$E_{dp} = A \cdot d^{-0.37} \quad [\text{kV/mm}] \dots\dots\dots \text{(III)}$$

Avec :

D : distance dans l'huile (mm)

A : coefficient qui dépend de la configuration d'essai (voir tableau II.1)

Configuration	Description de l'espace d'huile	Huile propre	Huile «mal dégazée»
1	Entre barrières isolantes	21	17.5
2	Entre électrode isolée et 1ère barrière isolante	17.5	14.5
3	Entre électrode nue et 1ère barrière isolante	14.5	12

Tableau II.1: Coefficients "A" des courbes Weidmann.

II.4 Exemple de calcul avec la méthode « Weidmann » :

On a utilisé le modèle dans la figure (II.4) pour illustrer le calcul avec la méthode de «Weidmann».

Dans une configuration avec deux électrodes plan/plan, l'une à la masse et l'autre à la HT, séparé par une distances de 100mm, on remplit un volume d'huile propre entre les deux électrodes. la tension appliquée entre les électrodes est de 350kV. dans cet exemple, l'électrode HT est isolée avec un carton d'épaisseur de 2mm, ce qui correspond à la configuration N°3 du tableau (II.1).

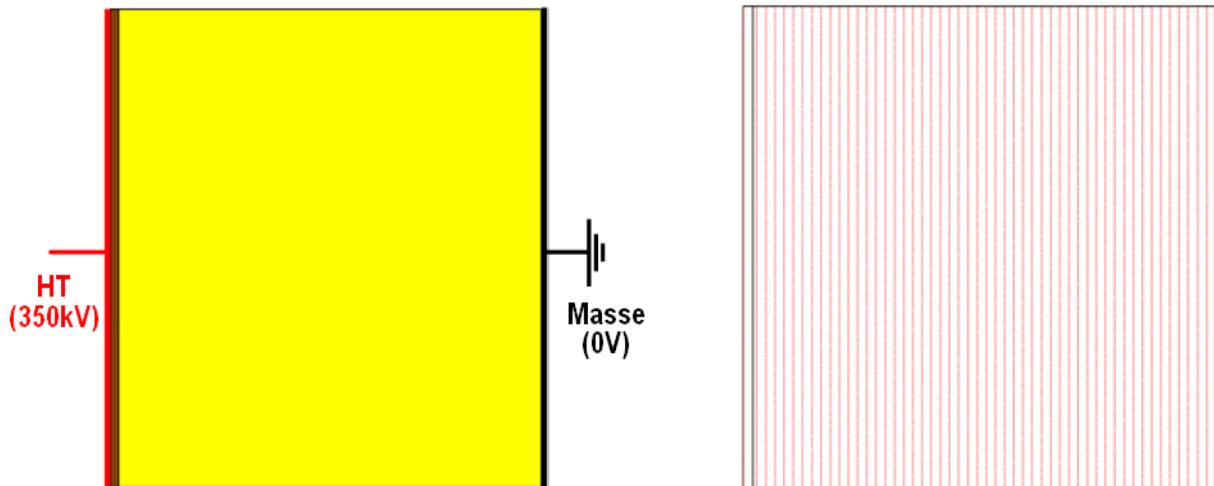


Figure II.4: I) : Configuration géométrique du model. II) Répartition des lignes équipotentielles.

Le champ électrique dans l'huile sera donc uniforme et égale au rapport de la tension appliquée sur la distance d'huile, soit ($E_H = 350\text{kV} / 100\text{mm} = 3,5\text{kV/mm}$).

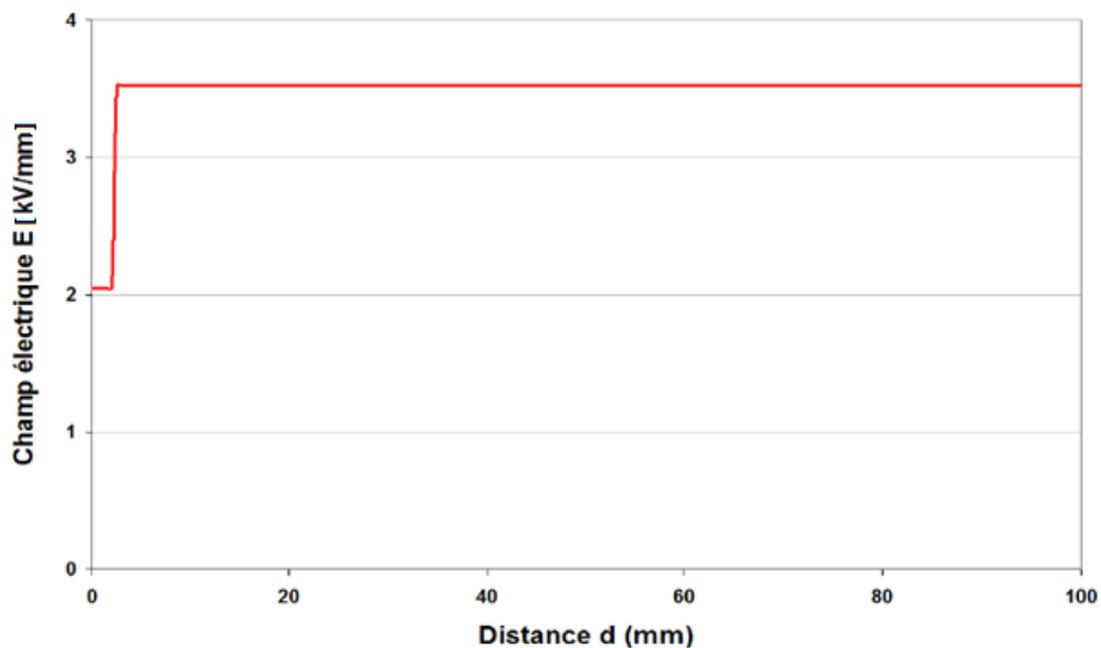


Figure II.5: Champ électrique uniforme dans l'huile.

A partir de la figure (II.5), on peut voir que le champ électrique E_c dans le carton est plus faible à cause du rapport de permittivité entre le carton et l'huile qui est égal à environ 0,6 selon le rapport suivant :

$$\frac{E_c}{E_H} = \frac{\epsilon_H}{\epsilon_C} = 0.6 \dots\dots\dots (IV)$$

La contrainte admissible (à ne pas dépasser) dans l'huile en utilisant la méthode Weidmann sera donc :

$$E_{adm} = A \cdot d^{-0.37} = 14.5 \times 98^{-0.37} = 2.66 \text{ [kV/mm]} \dots\dots\dots (V)$$

Avec :

$A = 14,5$ (coefficient Weidmann correspondant la configuration 3 du tableau II.1).

$d = 98\text{mm}$ (distance dans l'huile c.-à-d., distance entre les électrodes « 100mm », déduite de «2mm» d'épaisseur du carton).

D'après la méthode de Weidmann, on remarque que la valeur de champ électrique moyen dans l'huile ($E_H = 3.5\text{kV/mm}$) est largement supérieur à la valeur admissible calculé par la méthode de Weidmann ($E_{adm} = 2.65 \text{ kV/mm}$). alors on obtient une marge de sécurité négative -32% ce qui implique que cette situation est inacceptable. voir figure (II.6).

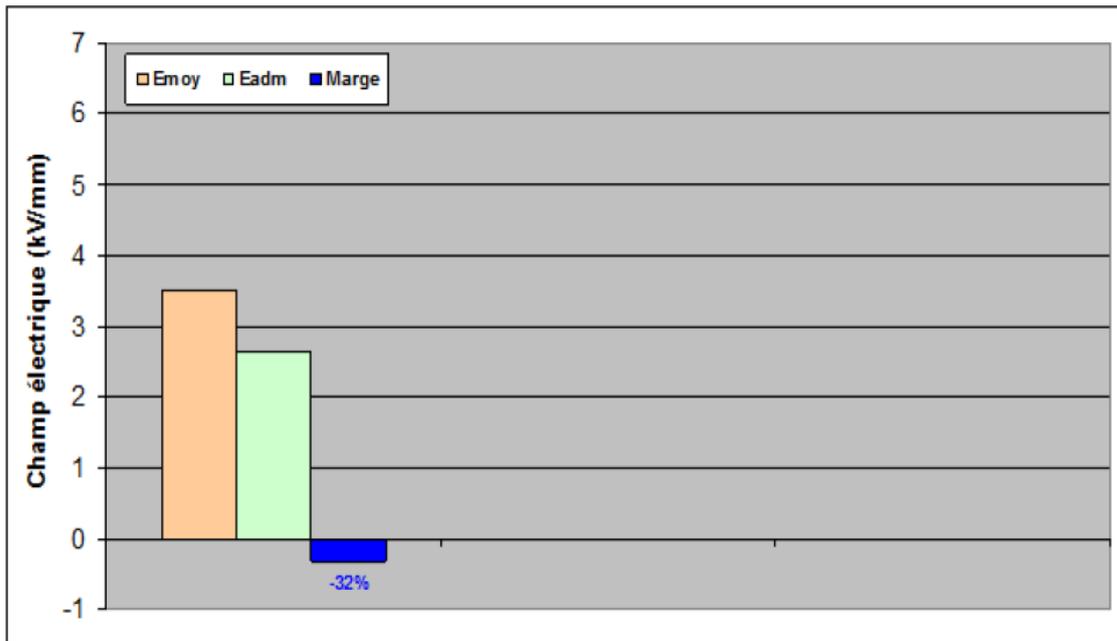


Figure II.6: Comparaison entre la valeur moyenne et la valeur admissible du champ électrique dans l'huile (configuration avec $A=14,5$).

Pour régler cette situation, il faut subdiviser le volume d'huile de telle façon à garder la valeur de champ électrique moyen dans l'huile toujours petite par rapport à la valeur admissible calculée par la méthode de Weidmann.

Ainsi, en plaçant deux barrières de cartons dans le volume d'huile, on va le subdiviser en trois petits canaux (figure II.7). En fonction de la configuration de chaque canal, on calculera ensuite le champ électrique admissible (on va utiliser les données des tableaux II.2, II.3 et II.4) :

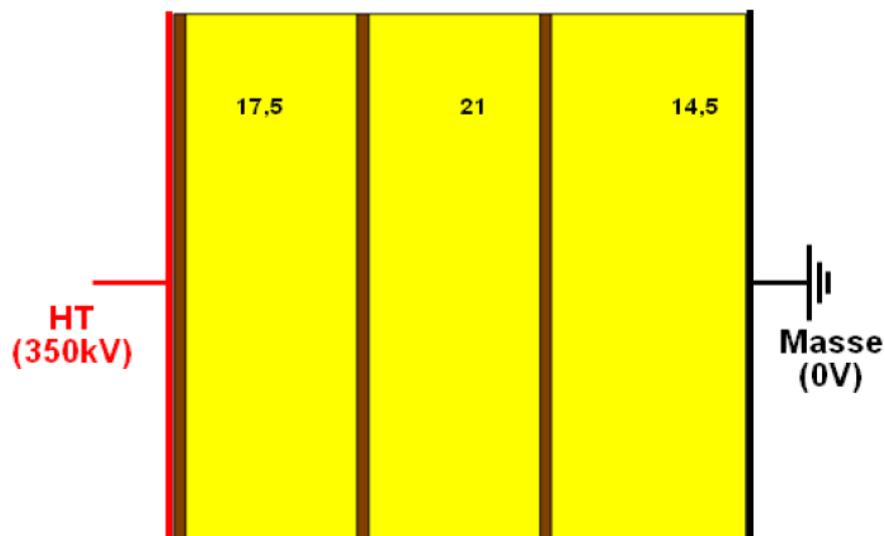


Figure II.7: Subdivision du volume d'huile en trois canaux à l'aide des barrières carton.

❖ Premier canal d'huile :

coté	placement	Coefficient « A »	la valeur admissible du champ électrique	Numéro de configuration de tableau 1 précédent.
HT	Se trouve entre une électrode à isolée avec un carton (la HT) et une autre barrière carton.	17.5	$E_{adm1} = 17.5 d_1^{-0.37}$	N°2

Tableau II.2: Données pour le calcul du champ électrique dans le premier canal d'huile.

❖ Deuxième canal d'huile :

coté	placement	Coefficient « A »	la valeur admissible du champ électrique	Numéro de configuration de tableau 1.
au milieu	se trouve entre deux barrières carton.	21	$E_{adm2} = 21 d_2^{-0.37}$	N°1

Tableau II.3: Données pour le calcul du champ électrique dans le deuxième canal d'huile

❖ Troisième canal d'huile :

coté	placement	Coefficient « A »	la valeur admissible du champ électrique	Numéro de configuration de tableau 1.
masse	se trouve entre une barrière carton et une électrode nue (la masse).	14.5	$E_{adm3} = 14.5 d_3^{-0.37}$	N°3

Tableau II.4: Données pour le calcul du champ électrique dans le troisième canal d'huile.

Pour les trois canaux d'huile, chaque valeur de champ électrique moyen est comparée avec sa valeur admissible calculée avec les coefficients de Weidmann. On obtient ainsi une marge de sécurité positive pour chaque canal comme le montre la figure (II.8) :

- Premier canal : 30% (coté HT).
- Deuxième canal : 41% (aux milieux).
- Troisième canal : 11% (coté masse).

On remarque que plus la distance dans l'huile est faible, plus elle peut supporter un champ électrique élevé. Inversement, plus cette distance augmente, moins elle sera en mesure de supporter cette contrainte.

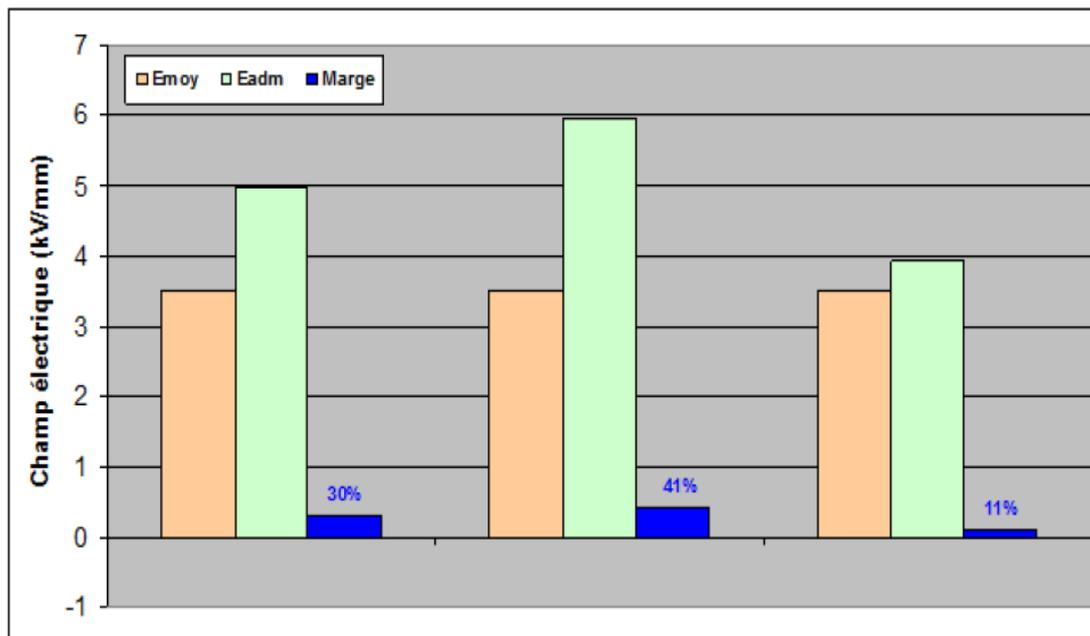


Figure II.8: Marges positives dans les trois canaux d'huile.

On peut donc optimiser encore mieux le niveau de contraintes électriques dans les trois canaux en modifiant l'emplacement des barrières carton dans le volume d'huile comme indiquée sur la figure (II.9).

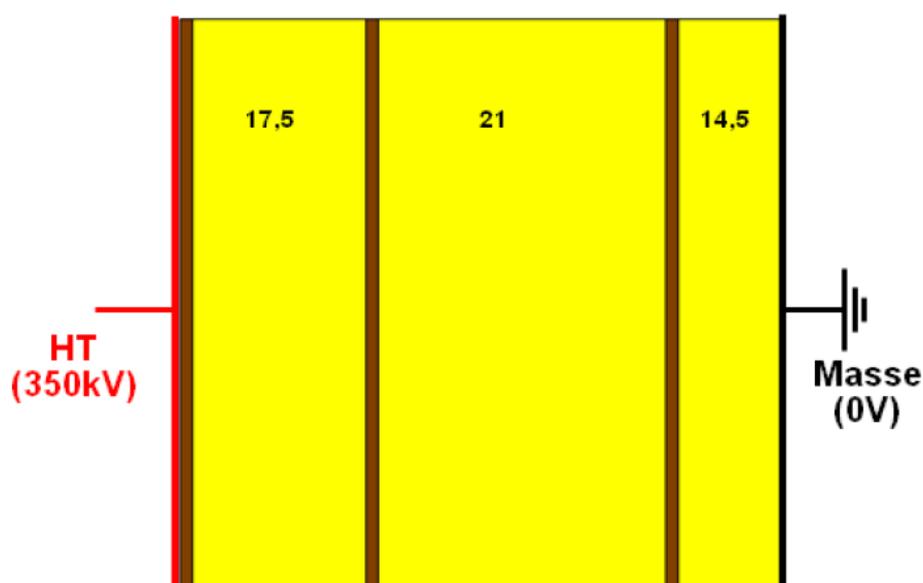


Figure II.9: Modification de l'emplacement des barrières carton.

Ainsi, on obtient une meilleure répartition des contraintes électriques sur les trois canaux d'huile, qui deviennent contraints électriquement de manière plus équitable, avec la même marge de sécurité d'environ 30% comme le montre la figure (II.10).

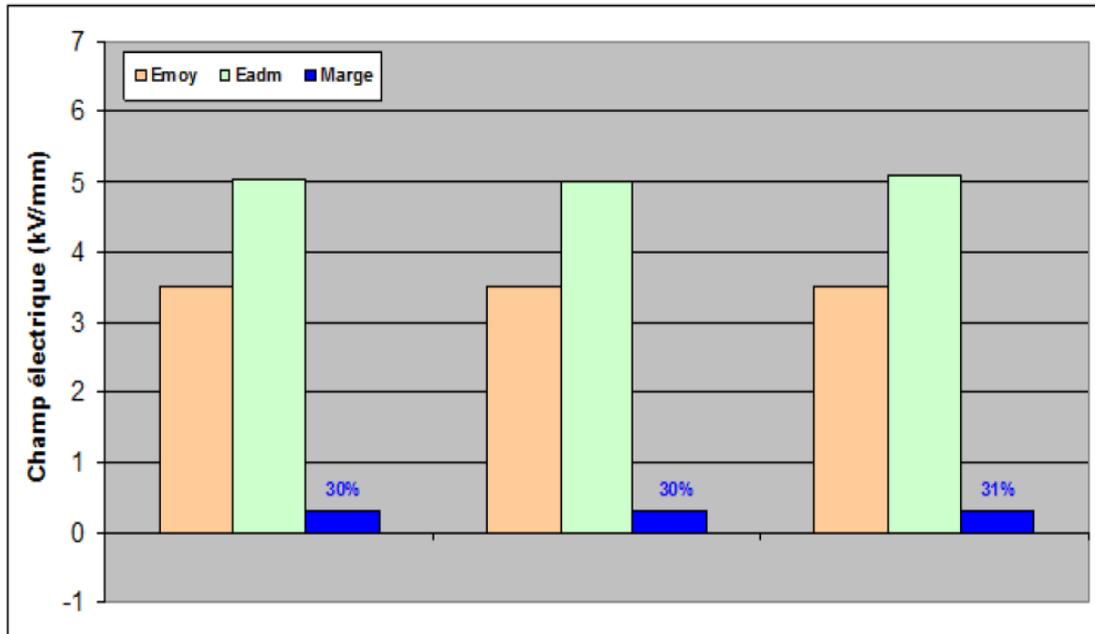


Figure II.10: Optimisation des marges de sécurité sur les trois canaux d'huile.

II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthode de « Weidmann » retenue dans notre étude. Pour une bonne compréhension, on a donné un exemple simple qui montre l'effet de la distance dans les différents espaces d'huile sur les valeurs de champ électrique. Cette méthode d'analyse du champ électrique sera utilisée dans l'étude de notre modèle dans le chapitre quatre.

Chapitre III
présentation du
modèle étudié

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre on présente les deux cas de simulation considérés dans notre étude. Pour cela, on a utilisé « COMSOL MULTIPHYSIQUE », un logiciel de simulation d'éléments finis afin de calculer le champ électrique. La géométrie du modèle étudié est présentée dans la figure(III.1).

Il s'agit d'un modèle qui simule une expérimentation réelle réalisée par la société weidmann pour mettre en évidence une méthode d'analyse, dans des configurations dans lesquelles le champ électrique est non uniforme. Dans cette expérience, on place deux cylindres de diamètre différent l'un dans l'autre. Le cylindre extérieur (ϕ 600 mm) est porté à la masse et le cylindre intérieur de faible diamètre (câble) est connecté à la haute tension (100kV). L'ensemble est placé dans une cuve d'essai remplie d'huile isolante.

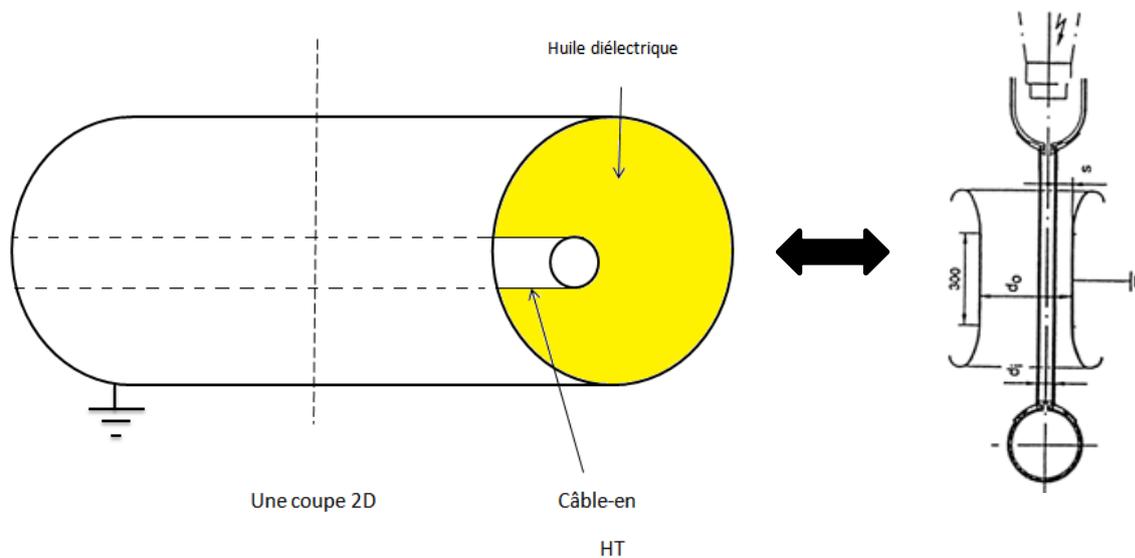


Figure III.1 : Présentation de l'exemple étudié. [17]

Une coupe 2D dans ce dispositif permet d'obtenir la vue en coupe indiquée dans la figure III.2. Le résultat ainsi obtenu se présente sous la forme de deux cercles l'un dans l'autre avec une distance constante entre les deux cercles (72 mm). Dans notre étude, on va considérer deux cas en prenant deux diamètres différents pour le câble (20 mm et 80 mm).

La forme de deux cercle présenté dans la figure (III.2) on va fixer le diamètre de la primaire cercle (le tube) dans les deux cas et on faire change le diamètre de la deuxième cercle (câble), avec une distance constante entre les deux cercle.

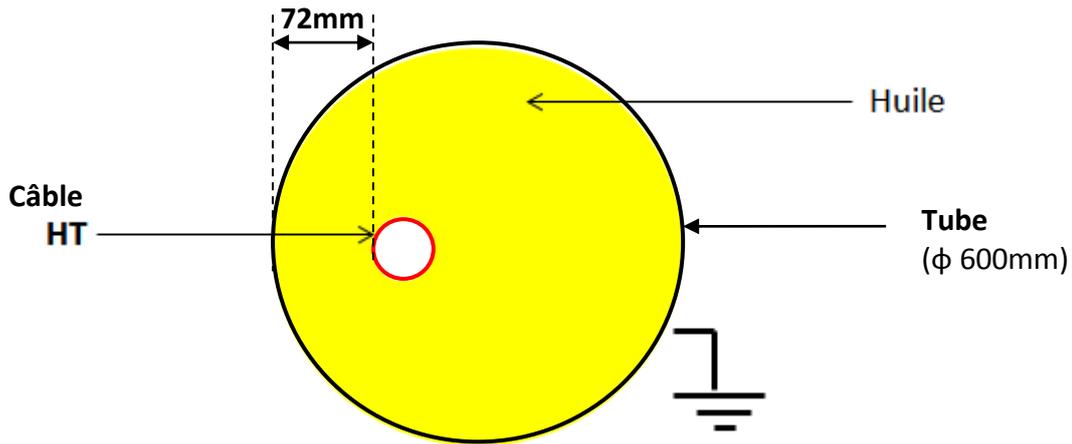


Figure III.2 : Vue générale sur notre étude (coupe 2D).

III.2 Présentation du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS :

COMSOL MULTIPHYSICS est un logiciel avancé pour la modélisation et la simulation de phénomènes physiques décrits par des systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP) résolues par éléments finis. Ce logiciel inclut un éditeur CAO complet ainsi que des solveurs performants qui permettent de traiter des problèmes de taille importante tout en convergeant rapidement vers le résultat. Une interface graphique rapide et interactive fournit à l'utilisateur différents moyens pour décrire un problème en 1D, 2D et 3D. Il a en outre l'avantage de permettre un couplage et une résolution simultanée des équations provenant de domaines physiques très différents. S'ajoute à cela des possibilités optimisées de visualisation et de post traitement des solutions qui font de FEMLAB (ancien nom du logiciel) un outil complet et polyvalent. Un avantage très important de ce logiciel c'est que l'utilisateur peut se concentrer sur le modèle et n'a pas besoin de consacrer du temps à résoudre les équations, construire les lignes de programmation, ou visualiser les résultats. la Figure (III.3) montre la fenêtre principale du logiciel COMSOL 3.5a. [15]

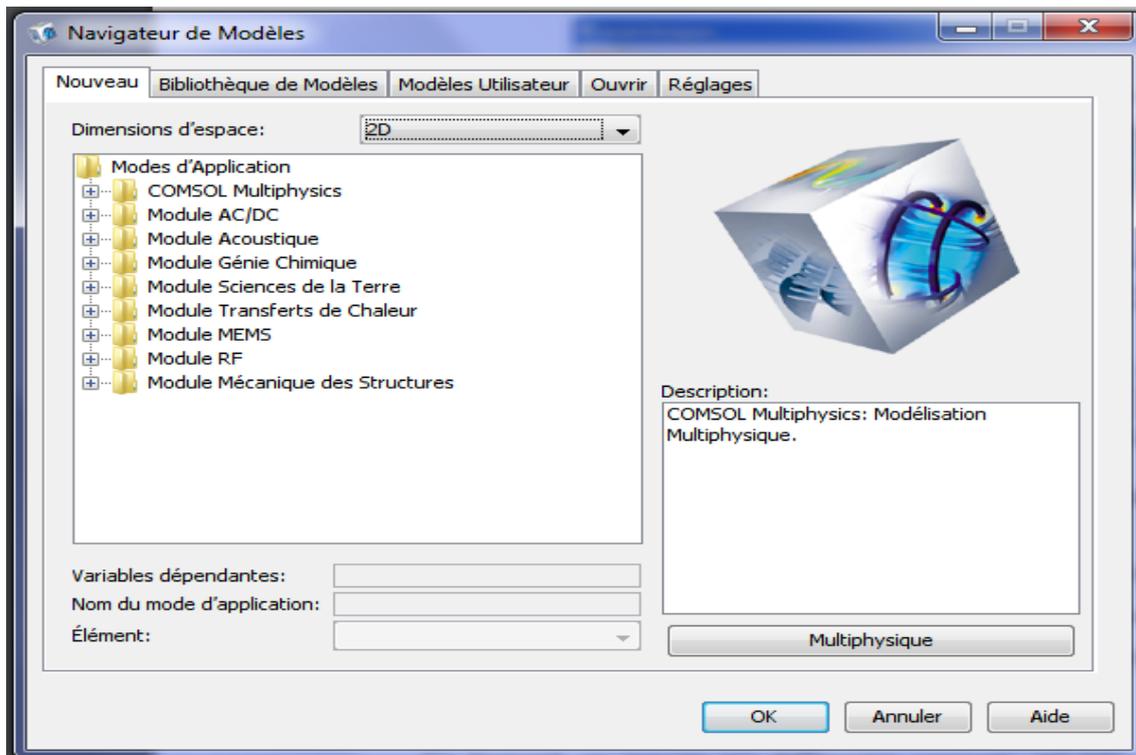


Figure III.3 : Fenêtre principale du logiciel COMSOL 3.5a MULTIPHYSICS.

Les différentes étapes du processus de modélisation :

- ✓ Définir la géométrie,
- ✓ les propriétés matériaux,
- ✓ Le maillage,
- ✓ Choisir la ou les physiques,
- ✓ Résoudre et afficher les résultats. [16].

III.2.1 Présentation à l'interface utilisateur de COMSOL 3.5a :

L'interface de COMSOL version 3.5a constituée de quatre grandes parties. On retrouve comme la première partie c'est la barre de menu (en noir). La deuxième (en bleu) à droit comporte des options relatives à ce qui est sélectionné dans la barre de menu, par exemple, les dimensions d'un objet qui vient d'être créé dans Geometry.

La troisième partie (en rouge) est la fenêtre d'affichage graphique (Graphiques) permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats.

Finalement, la quatrième partie au-dessous de la fenêtre d'affichage graphique, il y a une fenêtre (en vert) permettant de visualiser les messages d'erreurs.

Les différents éléments de l'interface utilisateur de COMSOL 3.5a sont présentés à la figure(III.4) suivante [16] :

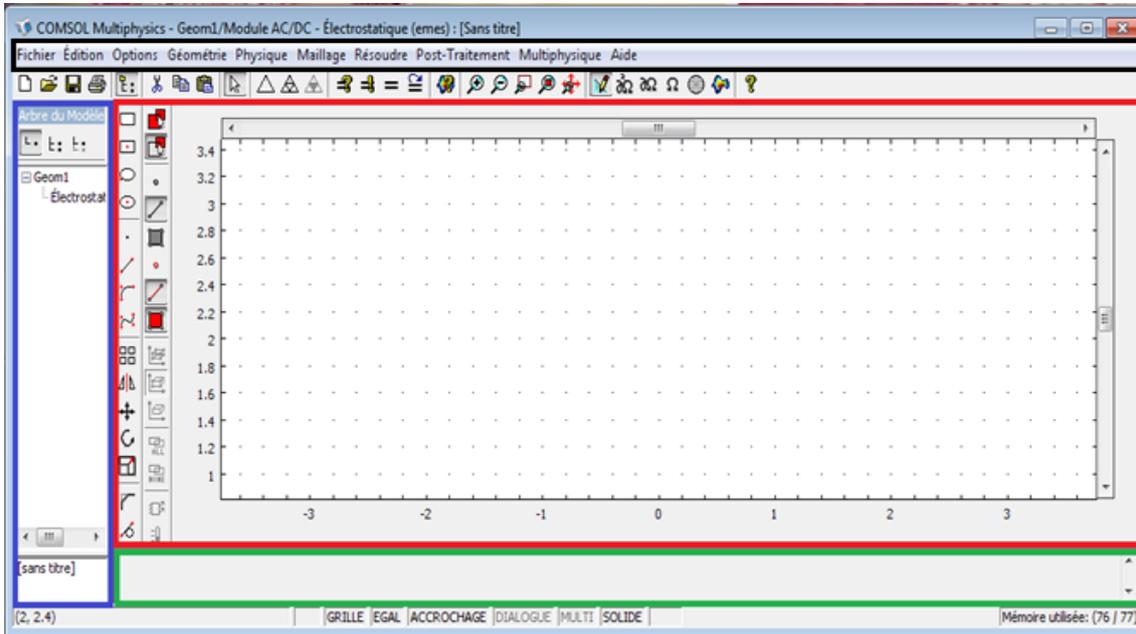


Figure III.4 : Les différents éléments de l'interface utilisateur de COMSOL 3.5a.

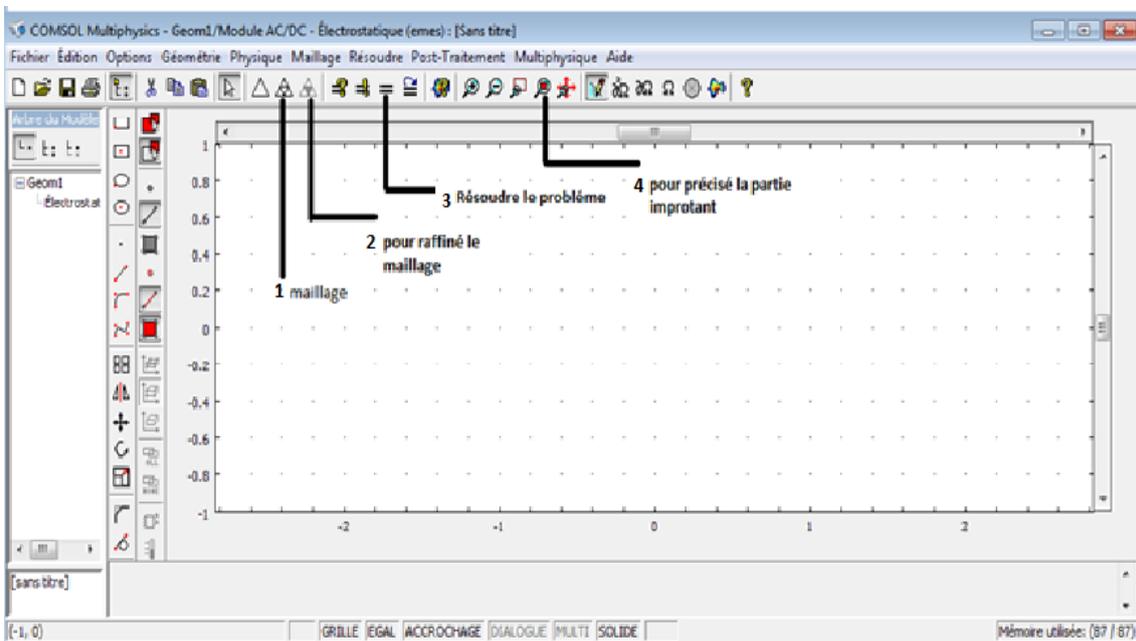


Figure III.5 : les accessoires de la barre d'outils de l'interface de COMSOL 3.5a.

III.2.2 Étapes de simulation :

Le processus de simulation sous COMSOL Multiphysics 3.5a implique plusieurs étapes décrites ci-après :

- Choix de la dimension : 2D
- Choix des modules physiques : pour notre étude, il s'agit du module « AC/DC » suivi du sous-module « statique, électrique ».
- Choix du type d'analyse : électrostatique.
- Construction de la géométrie, dimensionnement et choix du matériau :

La structure étudiée ici est considérée comme l'association de deux cylindres. Le premier est à la masse et le deuxième représentant un câble est porté à une haute tension. L'espace entre ces deux cylindres séparés avec une distance constante D est rempli avec une huile diélectrique.

III.3 Etapes de calcul du champ électrique sous COMSOL 3.5 :

III.3.1 Choix du modèle d'étude :

Le problème de notre exemple on va le résoudre en 2D modèle électrostatique afin de calculer le champ électrique dans un différent cas.

III.3.2 Géométrie :

La première chose à faire une fois le programme est ouvert, est de dessiner la géométrie de notre système, composée de deux cercles avec une distance fixe entre eux $D = 72\text{mm}$.

Le cercle extérieur (le tube) possède un diamètre inchangé d'une valeur de 600 mm. Deux cas ont été considérés en suite :

Cas1 : Le diamètre du câble est égal à 80mm. (Figure III.6).

Cas2 : Le diamètre du câble est égal à 20mm. (Figure III.7).

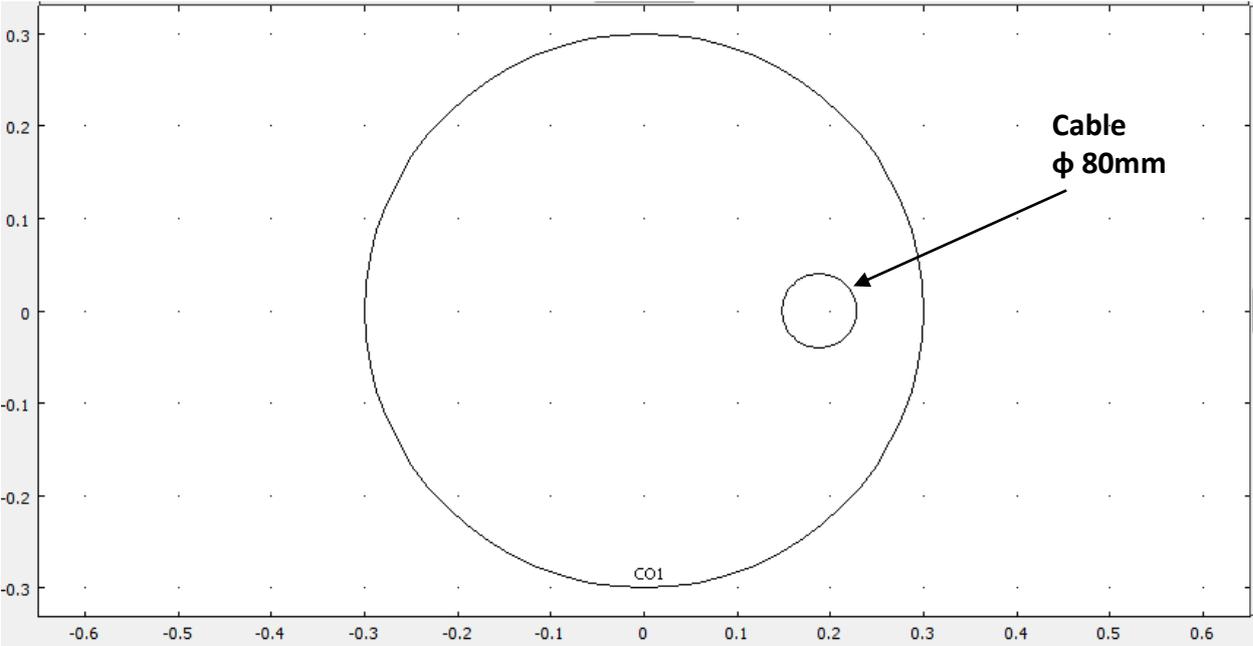


Figure III.6 : Géométrie du modèle en 2D pour le cas1 (φ 80mm).

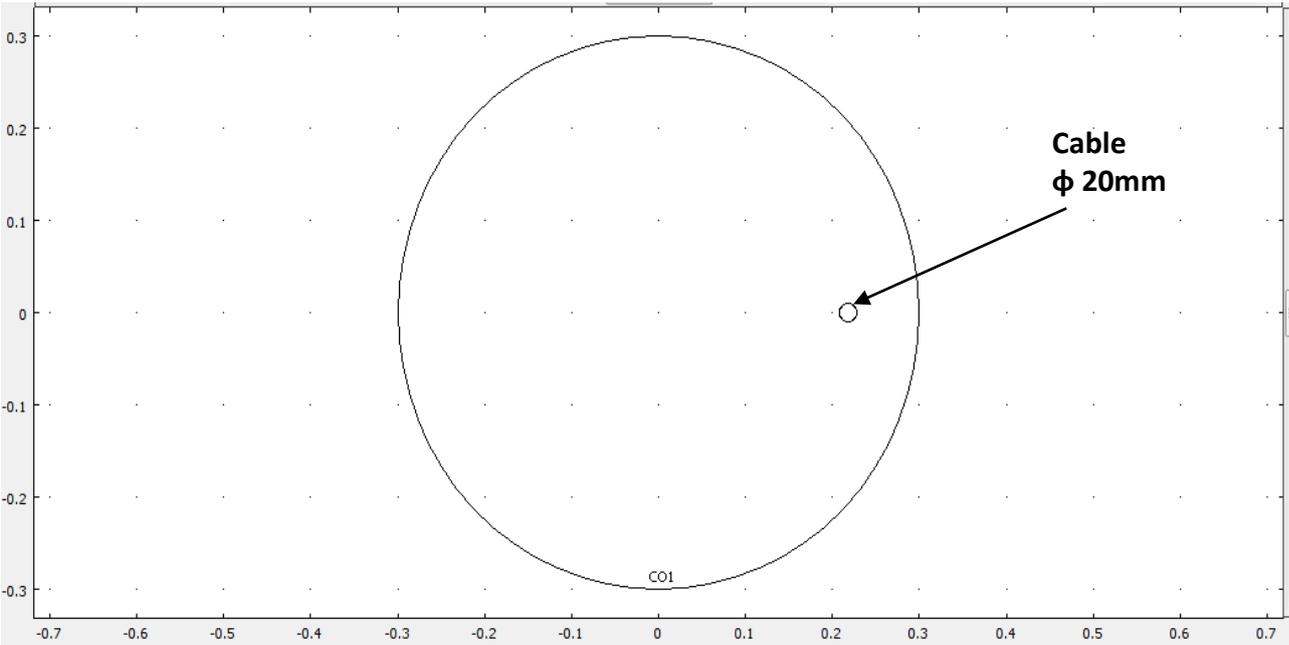


Figure III.7: Géométrie de notre modèle en 2D pour cas2 (φ20mm).

III.3.3 Modélisation de la physique :

III.3.3.1 Matériaux :

Cette étape consiste à introduire le matériau et leurs propriétés physiques afin d'établir des modèles dans COMSOL MULTIPHYSICS nous devons choisir le paramètre physique pour préciser la valeur de permittivité relative ϵ_r de l'huile diélectrique qui est 'égale à $\epsilon_r = 2.2$.

III.3.3.2 Conditions aux limites :

On donne à chaque cercle un potentiel électrique. on affecte à l'électrode HT un potentiel connu de câble (100kV) et un potentiel nul pour le tube (0V). ces valeurs sont identiques pour les deux cas. Figure (III.8) et (III.9)

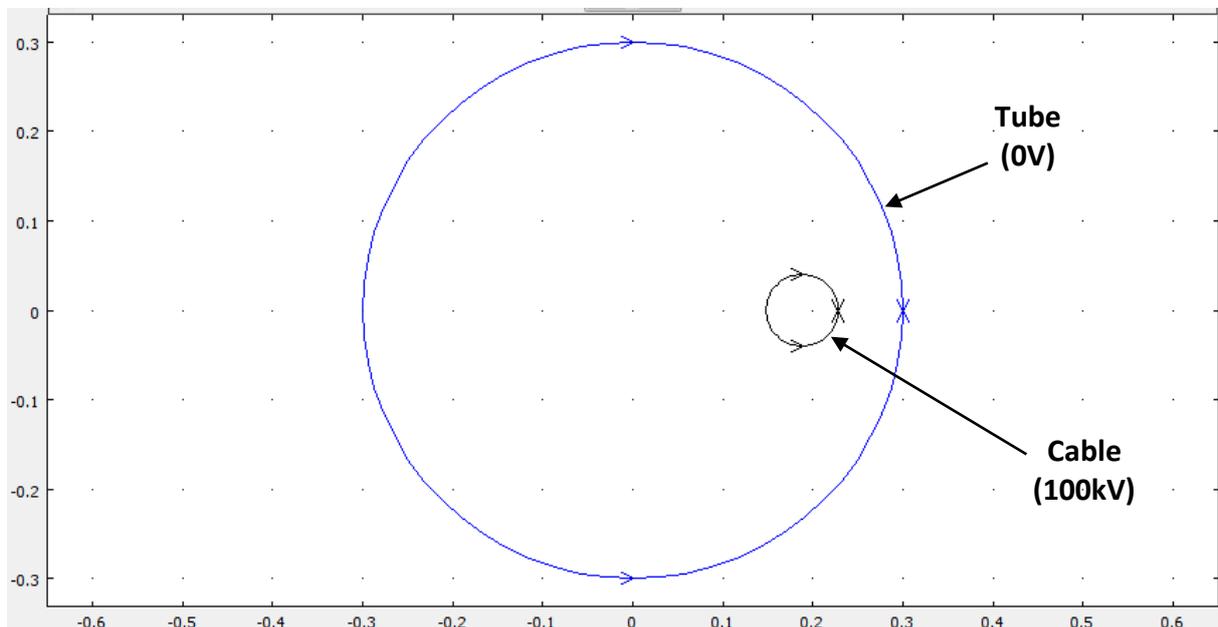


Figure III.8: Fenêtre de modèle physique (sous domaine, limite) pour cas 1.

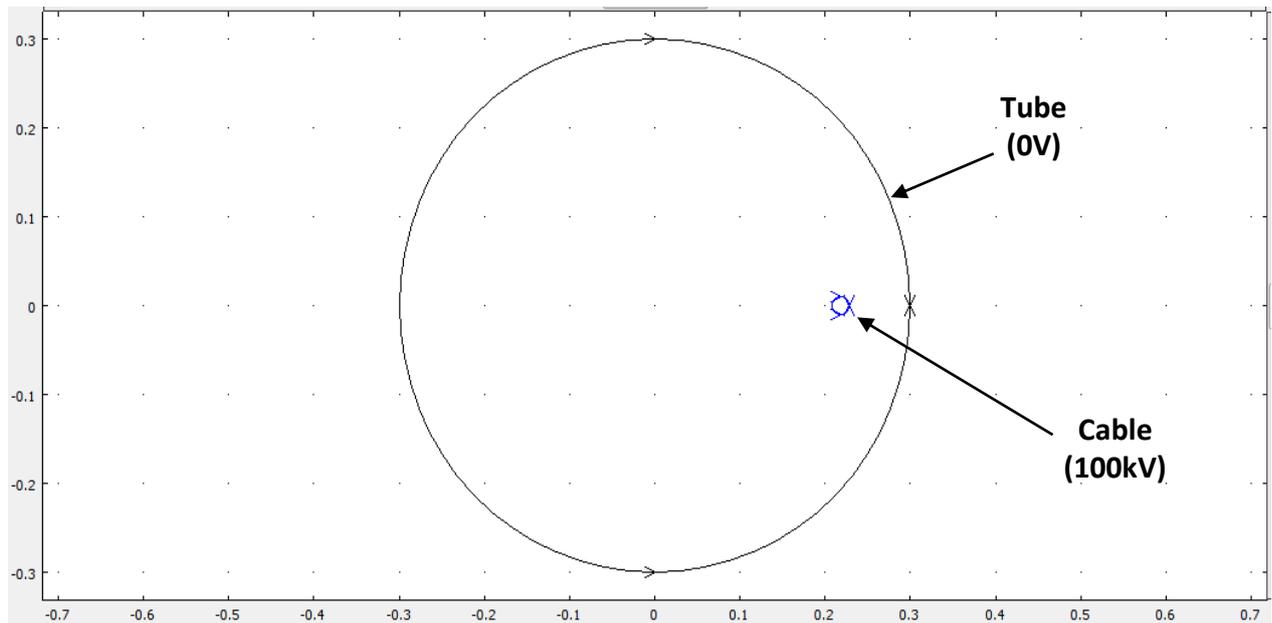


Figure III.9 : Fenêtre de modèle physique (sous domaine, limite) pour cas 2.

III.3.4 Choix du maillage :

Un maillage est une partition du modèle de la géométrie en petites unités de formes simples. le maillage permet de diviser le domaine d'étude en un certain nombre de nœuds ou les valeurs des différents inconnus (V, E,..) seront calculées.

Nous pouvons créer un maillage libre dans COMSOL MULTIPHYSICS en cliquant sur le bouton raffiner le maillage est cette opération sera effectué automatiquement par le logiciel.

Les figures suivantes montrent le maillage réalisé sur la coupe de deux cylindres. la zone encadrée est la plus intéressante pour notre exemple a été maillées très finement afin d'avoir des résultats plus précis.

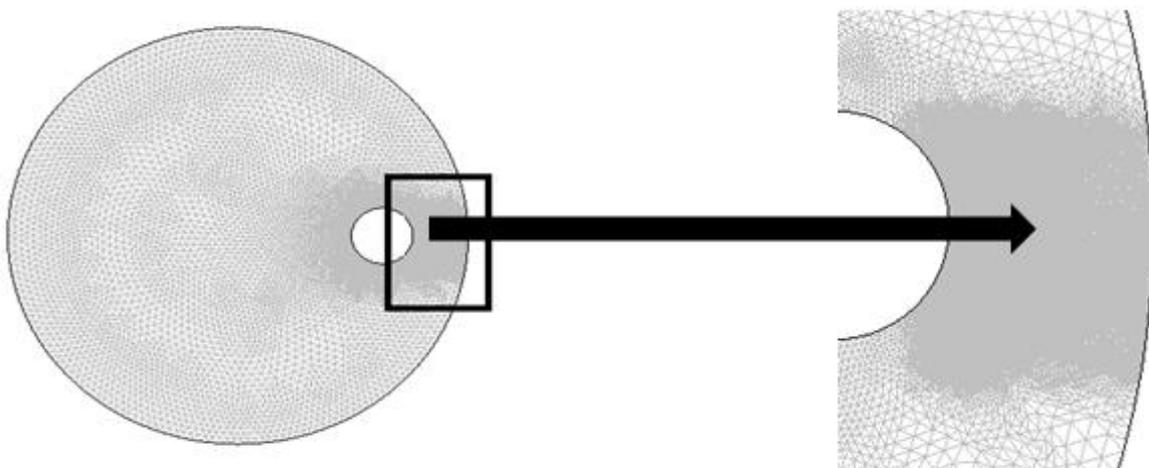


Figure III.10: Vue sur le maillage global avec un zoom de la partie encadrée cas1.

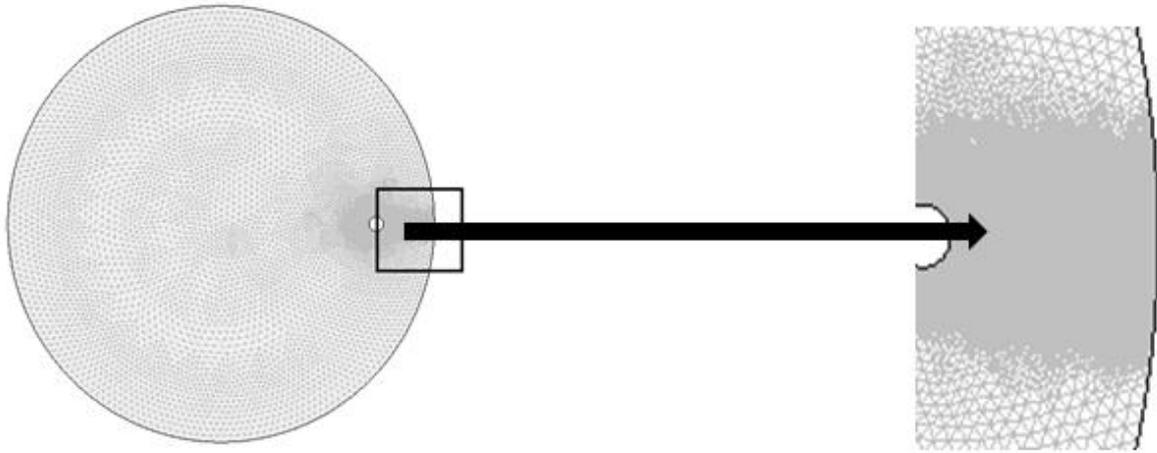


Figure III.11 : Vue sur le maillage global avec un zoom de la partie encadrée cas2.

III.3.5 Résolution du problème :

Lorsque le problème est complètement défini, il ne reste que le résoudre. alors cette étape se fait directement après le maillage.

Cette dernière étape nous permet de choisir le paramètre physique qu'on souhaite calculer, ici le champ électrique exprimé en V/m.

III.4 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les étapes de la simulation réalisée avec le logiciel « COMSOL 3.5 a » afin de calculer le champ électrique entre le tube et le câble. les résultats et les calculs sont présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre IV
analyse de l'étude
de simulation

IV.1 Introduction :

Le but de ce chapitre est d'analyser et de comparer les résultats de simulation des deux cas que nous avons présentés dans le chapitre 3

IV.2 Distribution des lignes équipotentiels :

Nous observons à travers la figure IV.1 une concentration élevée des lignes équipotentiels dans les zones les plus contraintes électriquement (au niveau des 72 mm qui séparent le câble du tube). Ce qui se traduit par une élévation du champ électrique dans cette zone.

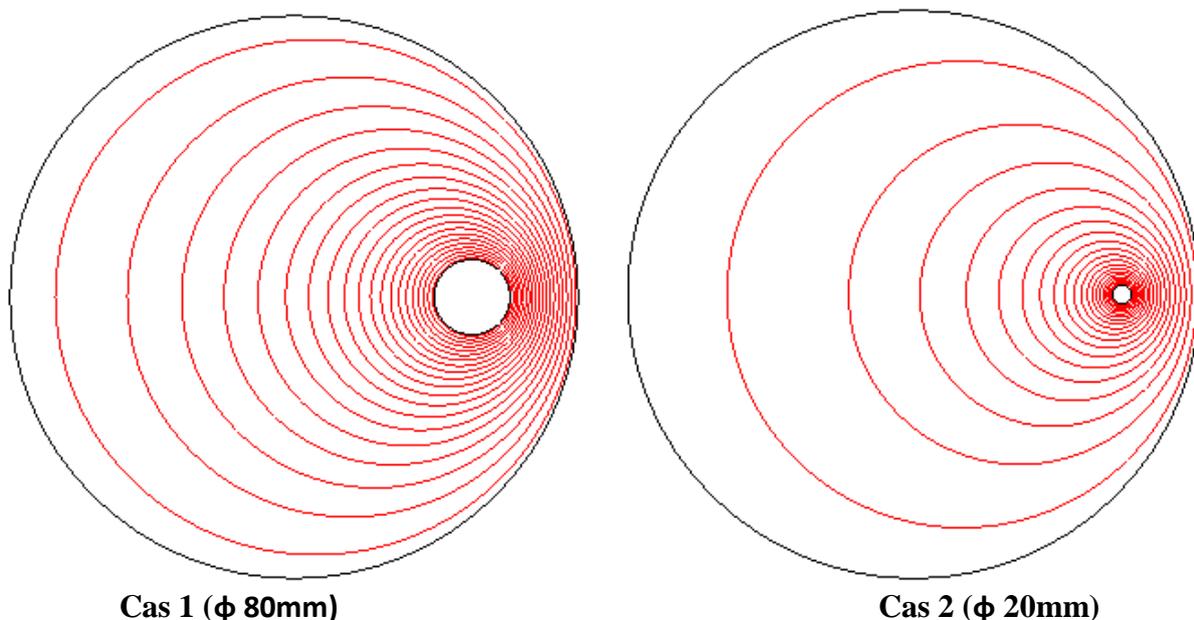


Figure IV.1: Répartition des lignes équipotentiels pour les deux cas étudiés (cas 1 et 2).

IV.3 Dégradation de champ électrique :

La figure IV.2 illustre bien les zones où règne un champ électrique intense, facilement identifiable à travers les couleurs « chaudes » du dégradé de champs autour du câble HT. On voit que pour les deux cas, le champ électrique est non uniforme dans la distance 72 mm qui sépare le câble HT (100kV) du tube à la masse. Il est élevé autour du câble HT, puis décroît progressivement jusqu'à la paroi du tube à la masse.

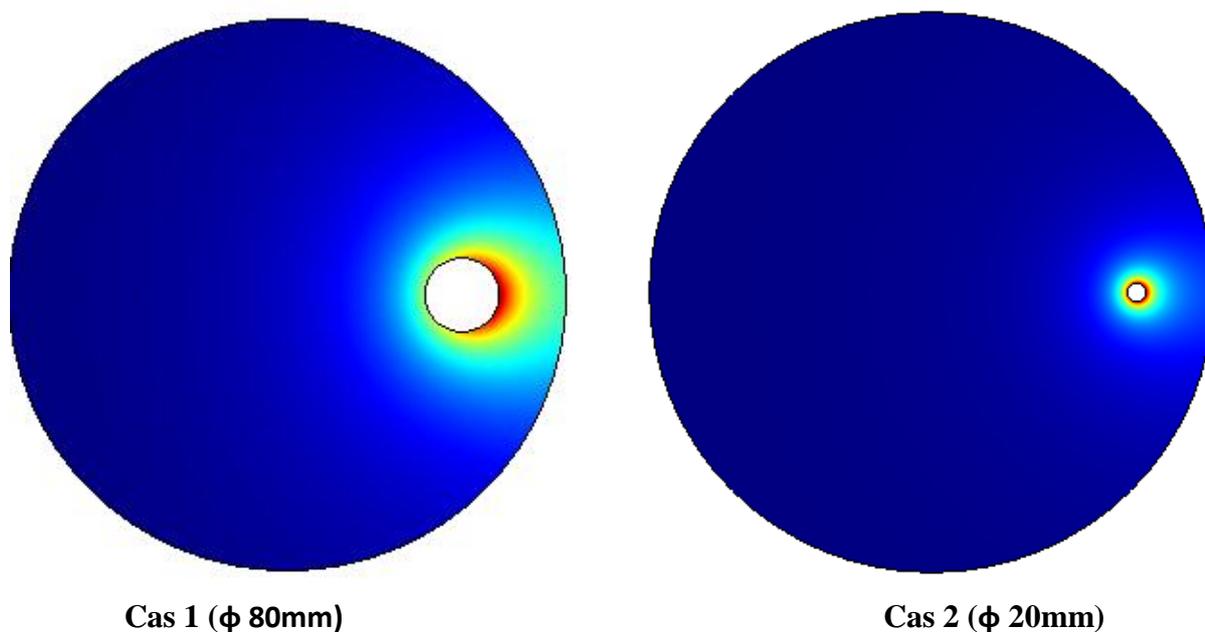


Figure IV.2: Dégradé du champ électrique pour dans les deux cas (cas 1 et cas 2).

IV.4 Méthode d'analyse simplifiée :

Pour calculer le champ électrique dans la zone qui nous intéresse (c'est-à-dire, la distance 72mm), on trace dans Comsol un chemin (une ligne) entre le câble en HT et le tube à la masse. La figure IV.3 montre ce chemin qui va servir pour tracer la variation du champ électrique entre le câble HT et le tube à la masse pour les deux cas étudiés (câble φ 80mm et φ 20mm).

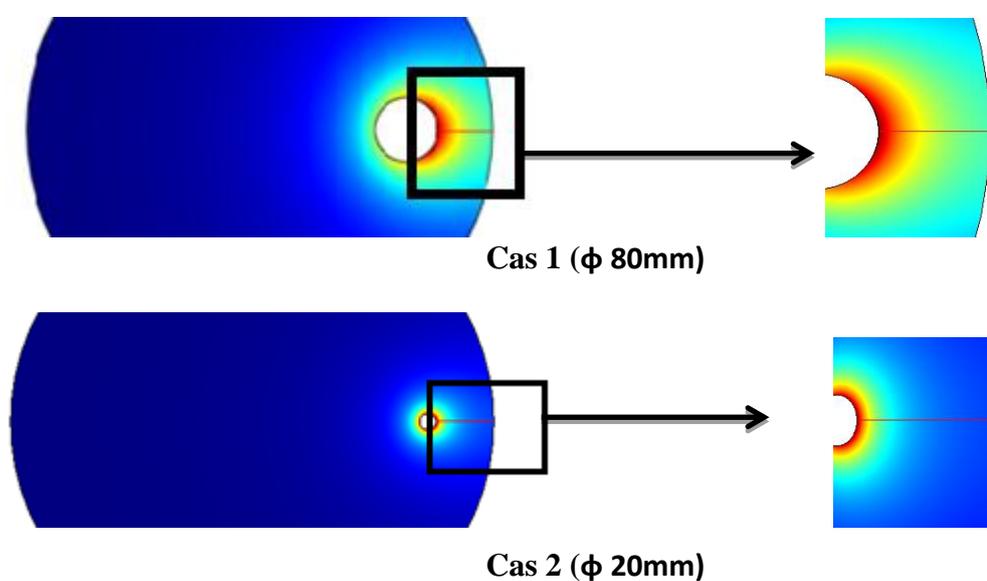


Figure IV.3: Chemins utilisés pour le calcul des contraintes électriques dans l'huile.

La Figure IV.4 montre la variation du champ électrique pour les deux diamètres du tube le long du chemin indiqué dans la figure IV.3. On remarque que le champ électrique est décroissant en allant du câble HT vers le tube, ce qui implique que c'est un champ non uniforme pour les deux cas. La valeur maximale du champ électrique est atteinte dans l'huile au niveau câble. Elle est plus élevée pour le cas 2 où le tube possède un diamètre plus faible (20mm) et donc un effet de pointe plus prononcé.

- **Cas1** : $E_{max1} = 2.24$ [kV/mm] pour le tube dont le diamètre est égal à 80mm.
- **Cas2** : $E_{max2} = 4.19$ [kV/mm] pour le tube dont le diamètre est égal à 20mm.

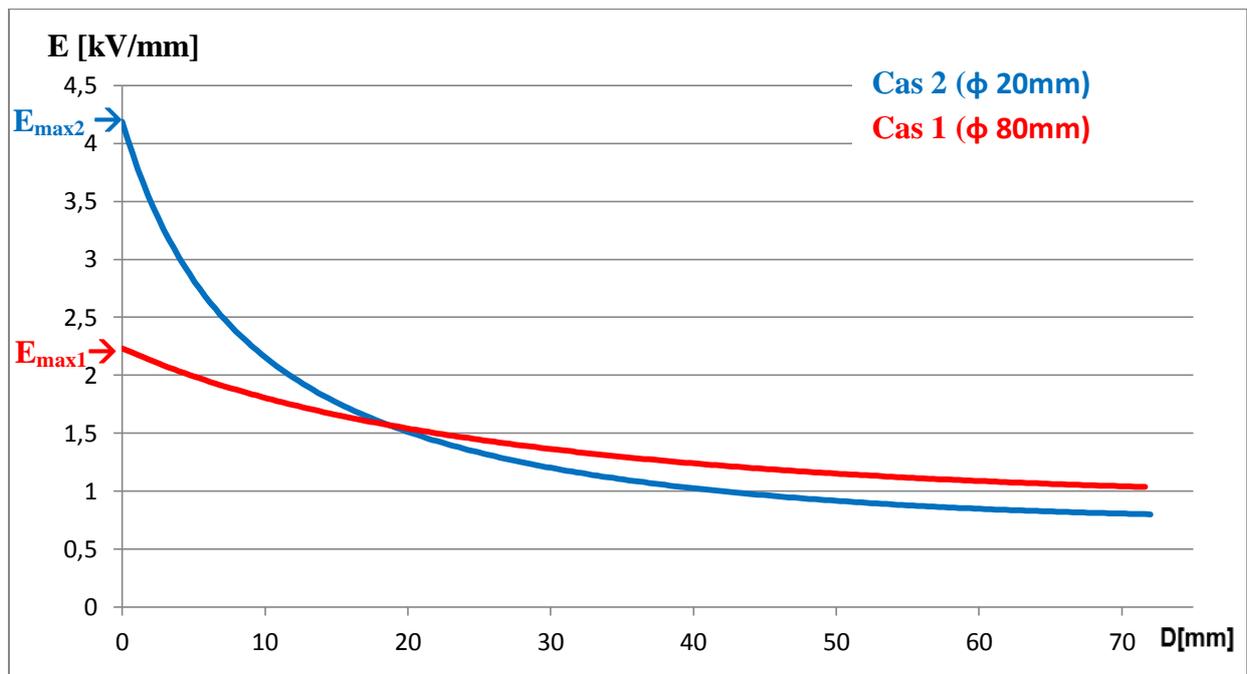


Figure IV.4: Variation du champ électrique dans l'huile en allant du câble HT vers le tube.

Cependant, le champ moyen pour les deux cas peut se calculer avec la formule suivante :

$$E_{moy} = \left(\frac{V}{d}\right) \dots \dots \dots \quad \text{(IV-1)}$$

Avec : $d=72\text{mm}$ et $V=100\text{kV}$

On trouve donc : $E_{moy} = 1,39$ [kV/mm]

Si on utilise la méthode de Weidmann présentée dans le chapitre 2 pour calculer la contrainte admissible par l'huile dans cette distance de 72 mm, on procède comme suit :

- On calcule d'abord la valeur du champ admissible dans l'huile entre le câble et le tube :

$$E_{adm} = A * d^{-0.37} = 14.5 * d^{-0.37} \dots \dots \dots \quad \text{(IV-2)}$$

Ici $d=72\text{mm}$ donc $E_{adm} = 14.5 * 72^{-0.37} = 2.98$ [kV/mm]..... (IV-3)

- Ensuite, on compare cette valeur (2,98kV/mm) avec le champ moyen (1,39kV/mm) en calculant le rapport entre eux afin d'obtenir la valeur de « la marge de sécurité » :

$$E_{adm} / E_{moy} = 2.14$$

Donc selon cette méthode d'analyse, la distance de 72mm d'huile entre le câble et le tube peut supporter un champ électrique jusqu'à 2,98kV/mm, or le champ moyen étant plus faible (1,39kV/mm), on conclue donc qu'il n'y a pas de risque car la marge de sécurité est de 2,14. C'est-à-dire que l'huile peut supporter 2,14 fois la valeur réelle du champ électrique (moyen) qui lui est appliquée (1,39kV/mm).

Ceci serait donc valable pour les deux cas considérés, quelque soit le diamètre du câble bien que le champ électrique maximal au niveau des deux câbles soit différent (Figure IV.4).

IV.5 Méthode de Weidmann pour l'analyse d'un champ non uniforme :

On a vu qu'avec la méthode de Weidmann présentée dans le chapitre 2, l'analyse des contraintes électrique est identique pour les deux cas 1 et 2. Cette analyse ne prend donc pas en compte le fait que le champ maximal soit différent selon le diamètre du câble. Elle est donc optimiste car elle néglige le risque de claquage dans l'huile au voisinage immédiat du câble ou le champ atteint sa valeur maximale. Weidmann a donc trouvé une autre méthode pour analyser les contraintes électriques dans ces cas où le champ n'est pas uniforme et décroît progressivement comme dans notre étude. On va présenter dans ce qui suit cette nouvelle méthode pour analyser les contraintes électriques dans les deux cas 1 et 2.

- **Cas 1 (diamètre de 80mm) :**

On trace une nouvelle courbe en faisant la moyenne cumulée des valeurs du champ réel qui existe dans l'huile entre le câble et le tube. dans la figure IV.5, on a donc tracé deux courbes :

- Une première courbe de la variation du champ réel le long des 72mm de distance d'huile séparant le câble du tube ;
- Une deuxième courbe issue la moyenne cumulée de la première courbe. on notera cette nouvelle courbe E_{moy} noter que le dernier point de cette courbe, correspond à la valeur du champ moyen calculé précédemment par la formule IV-1 ($E_{moy} = 1,39\text{kV/mm}$).

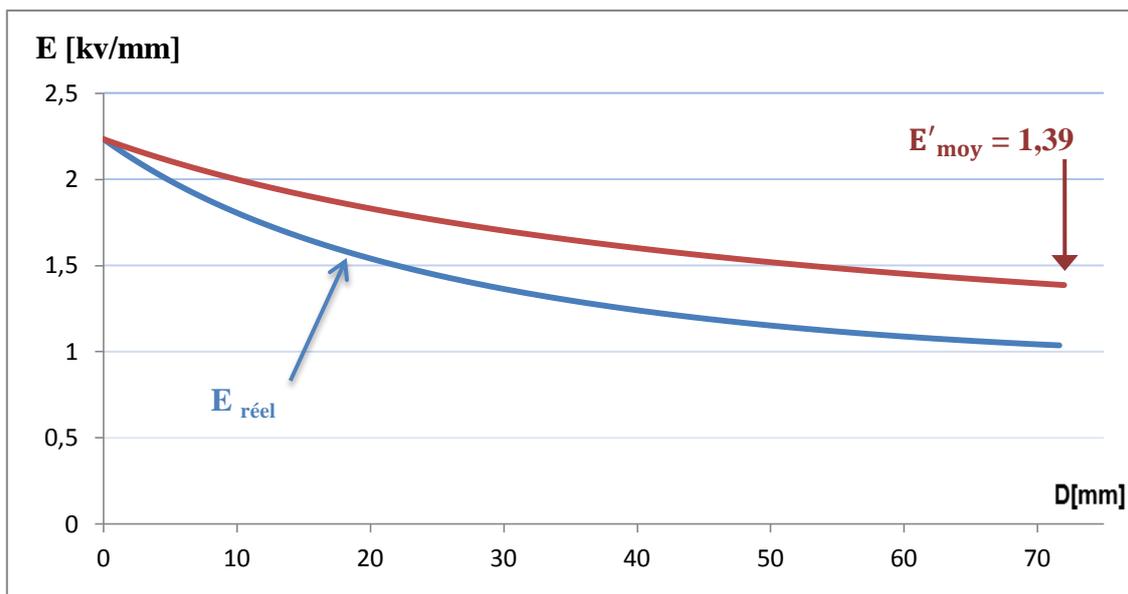


Figure IV.5: Courbe du champ électrique réel et de sa moyenne cumulée.

On compare ensuite cette nouvelle courbe E'_{moy} avec autre une courbe du champ admissible calculé par la méthode « standard » de Weidmann en utilisant l'équation IV-2 ($14,5d^{-0,37}$) pour chaque distance dans l'huile ($d=1, 2, 3, \dots, 72\text{mm}$). Le critère étant que les valeurs de la courbe E'_{moy} restent toujours inférieures aux valeurs calculées par Weidmann E_{adm} .

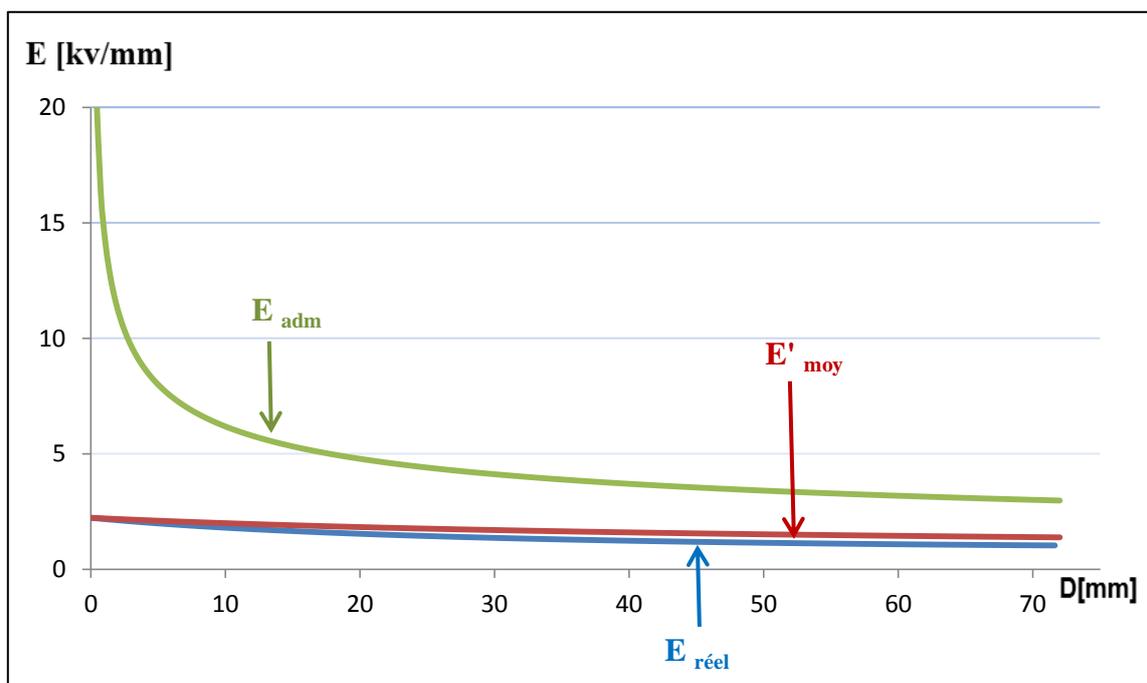


Figure IV.6: Comparaison entre la courbe Weidmann avec le champ moyen cumulé

On observe que le champ moyen cumulé E'_{moy} ne dépasse pas la valeur admissible E_{adm} . On obtient ainsi des marges de sécurité « q » supérieures à 1 et suffisantes pour chaque distance d'huile comme le montre la figure IV.7 (courbe « $q=E_{adm}/E'_{moy}$ » sur l'axe à droite). Les valeurs q étant le rapport de E_{adm}/E'_{moy} pour chaque distance. Par conséquent, on peut dire que le dimensionnement diélectrique dans cette zone peut être validé.

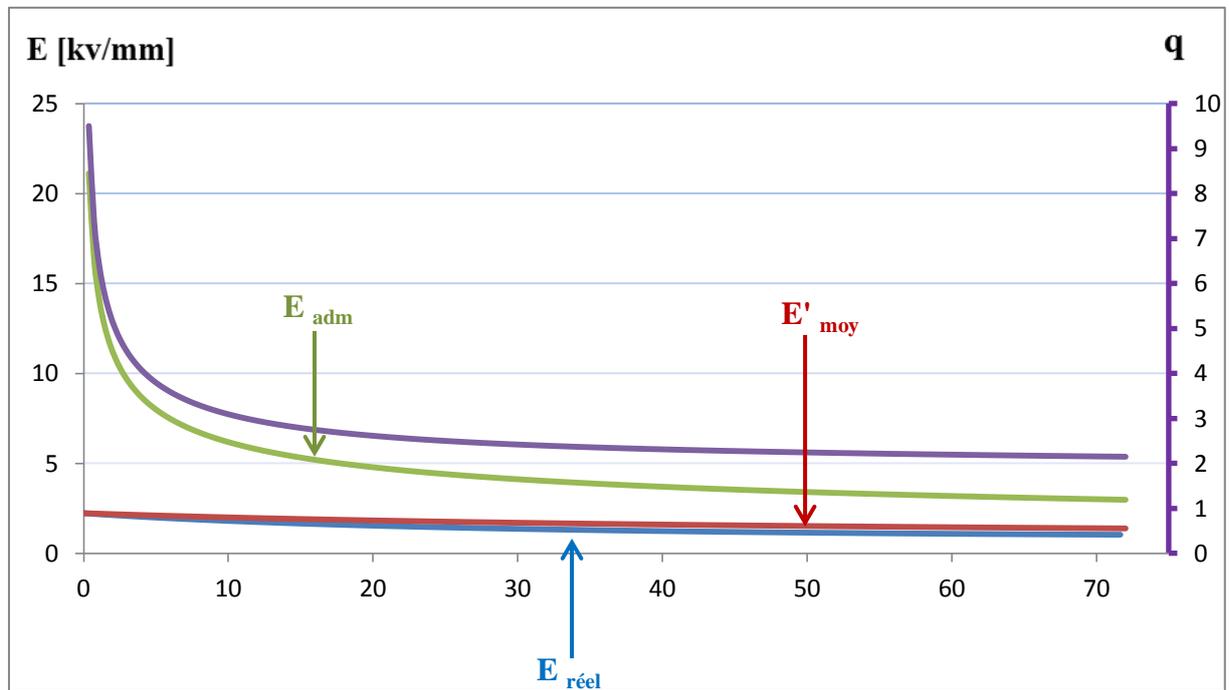


Figure IV.7: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le cas 1

- **Cas 2 (diamètre de 20mm) :**

En suivant les mêmes étapes que le Cas1, on trace la courbe du champ moyen cumulé (Figure IV.8) et on la compare avec la courbe du champ admissible de Weidmann E_{adm} . on vérifie ensuite que les valeurs de la marge de sécurité q restent supérieures à 1 (Figure IV.9).

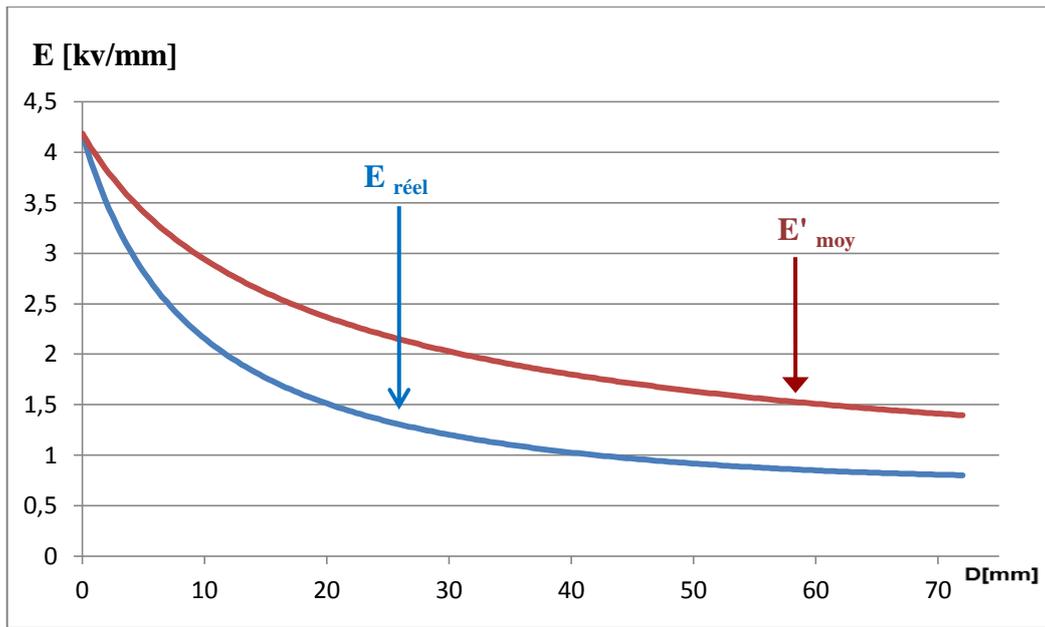


Figure IV.8: Courbe du champ électrique réel et de sa moyenne cumulée - Cas 2.

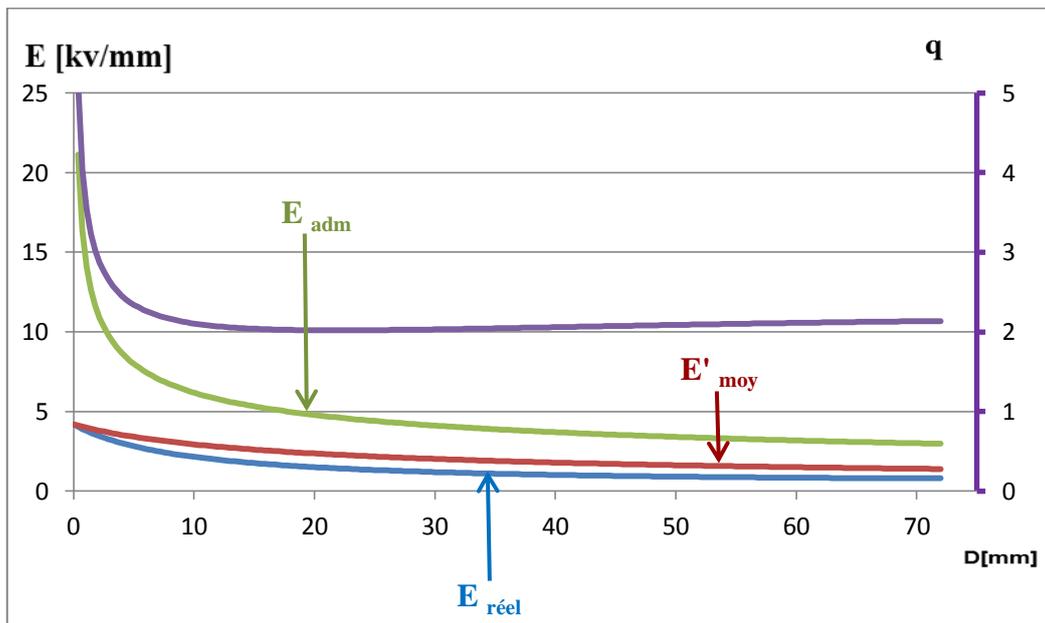


Figure IV.9: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le cas 2.

IV.6 Limite de la méthode d'analyse simplifiée :

On a vu qu'en utilisant la méthode d'analyse simplifiée qui raisonne seulement sur la distance globale d'huile entre le câble et le tube (72mm), on obtient la même marge de sécurité pour les deux cas 1 et 2, alors que la variation du champ électrique ainsi que sa valeur maximale sont différentes selon le diamètre du câble.

	d (mm)	E_{max}	$E_{moy} = V/d$	$E_{adm} = 14.5*d^{-0.37}$	$q = E_{adm}/E_{moy}$
Cas 1 $\phi 80\text{mm}$	72	2.24	1.39	2.98	2.14
Cas 2 $\phi 20\text{mm}$	72	4.19	1.39	2.98	2.14

Tableau IV.1 : Résultats d'analyse avec la méthode simplifiée

Pour montrer la limite (inconvenients) de la méthode d'analyse simplifiée, on va prendre un exemple dans lequel la tension du câble est de 215kV et non pas 100kV.

En utilisant la méthode de Weidman pour analyser les contraintes électriques avec cette nouvelle tension du câble, on obtient les courbes présentées dans les figures IV.10 et IV.11

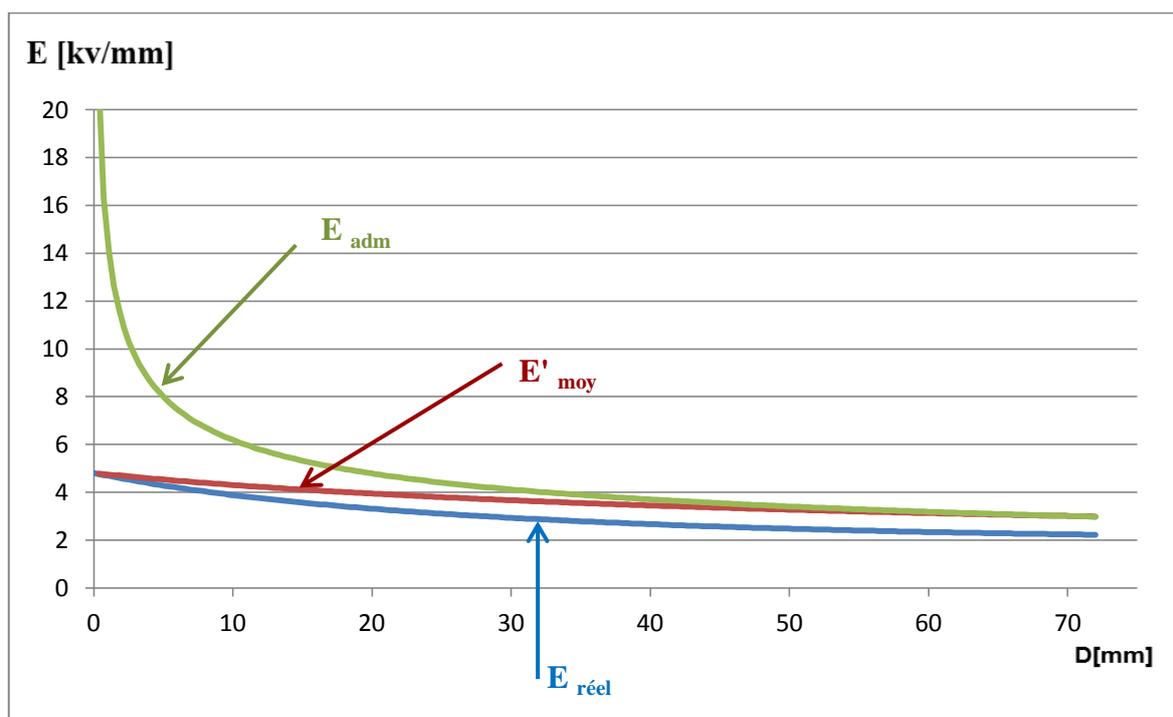


Figure IV.10: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le Cas 1 $\phi 80\text{mm}$ – $U = 215\text{kV}$.

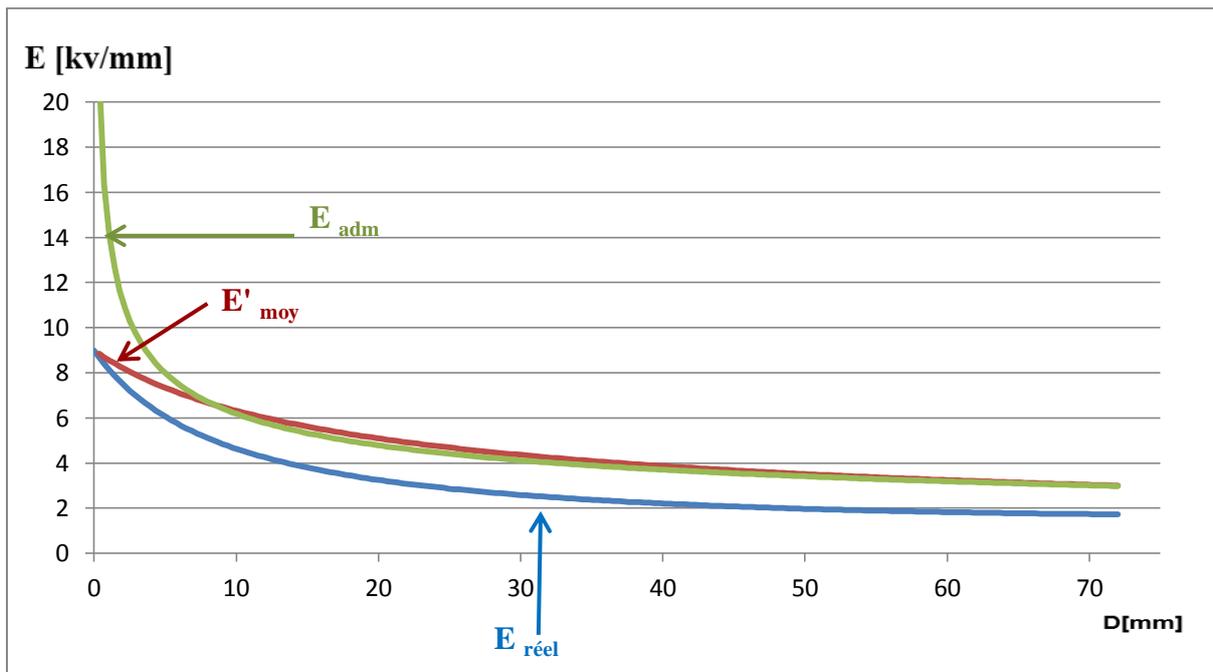


Figure IV.11: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le Cas 2 ϕ 20mm – U =215kV.

On voit que si on raisonne seulement sur la distance 72mm dans sa totalité entre le câble et le tube, on obtient une marge de sécurité $q = 1$ pour les deux cas (derniers points de la figure IV-12). Or, on remarque que dans le cas 2, la valeur de q devient inférieure à « 1 » et passe par un minimum à une distance critique d_{crit} de 22 mm du câble ϕ 20mm. Ceci signifie que cette distance est critique et ne supporte pas le champ électrique qui lui est appliqué. Il faudrait par exemple mettre une barrière isolante à cette distance pour subdiviser le volume d'huile.

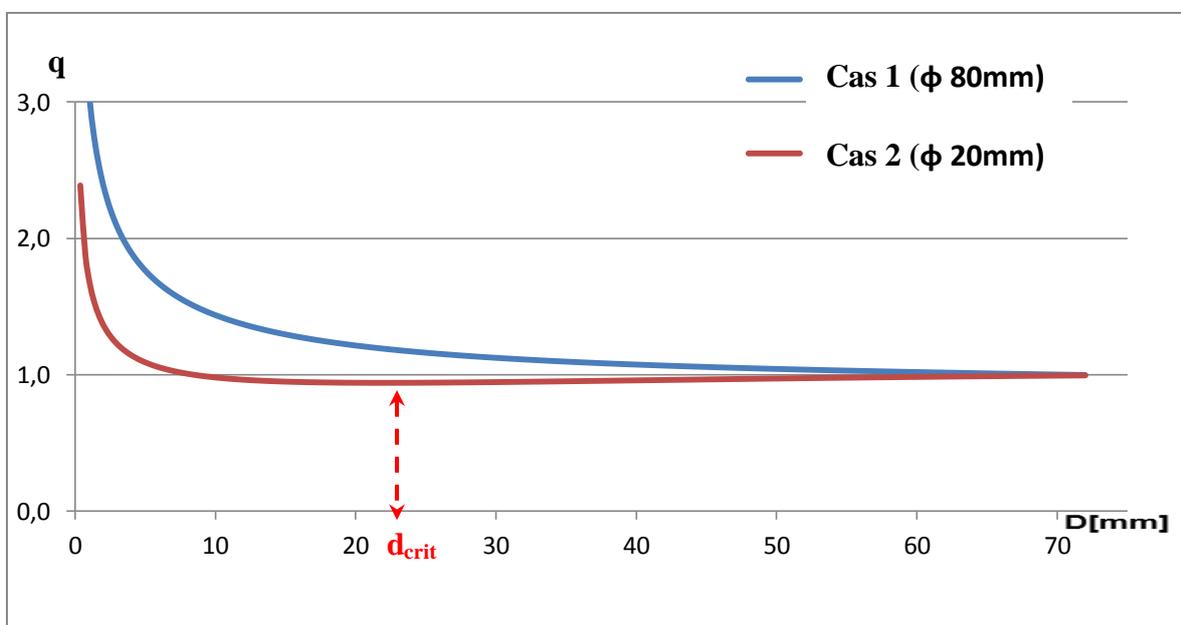


Figure IV.12: Variation de la marge de sécurité en fonction de la distance dans l'huile

IV.7 Conclusion :

Dans ce chapitre on a calculé les contraintes électriques à partir des résultats obtenus par la simulation du logiciel Comsol 3.5a.

Les résultats de calcul ont montré qu'en fonction de la méthode d'analyse utilisée. On a montré que dans le cas d'un champ non uniforme, utiliser la méthode simplifiée peut induire des erreurs d'appréciation des marges de sécurité dans l'huile. Par contre, l'utilisation de la méthode de Weidmann permet de mettre en évidence des distances critiques qui ne peuvent pas supporter le champ électrique appliquée, ce qui peut provoquer un risque et peut conduire à des décharges partielles, voire un claquage dans l'huile.

*Conclusion
générale*

Conclusion générale :

Les travaux décrits dans ce mémoire ont porté sur un exemple dans lequel on a calculé le champ électrique en fonction de la distance à travers un model de simulation avec le logiciel comsol 3.5a.

De cette étude, nous avons réalisé des calculs des contraintes électriques dans l'huile avec deux cas en prenant deux câbles de diamètre différents (cas1 avec le diamètre 80 mm et cas 2 avec le diamètre 20mm).

On a montré l'inconvénient d'utiliser la méthode simplifiée pour analyser les résultats de calcul du champ électrique.

On a montré par ailleurs qu'avec la méthode de Weidmann, l'analyse est plus précise et permet mettre en évidence des distances critiques dans l'huile qui peuvent être à l'origine de claquage.

.

Bibliographie

Bibliographie

[1] Mr. MEZIANI, Madjid. « *Contribution à la modélisation analytico-numérique des transformateurs de puissance* », mémoire de magister, l'université de MOULOUD MAMMERI Tizi-Ouzou, 18/09/2011, p : 4-5.

[2] YAHIOU Abdelghani, Contribution à l'étude et à l'analyse du régime transitoire dans les transformateurs de puissance : Cas du courant d'appel, mémoire de magister, université de Ferhat Abbas Sétif, 21/06/2012, p : 1.5.

[3] BOURGEOIS Audrey, Etude du phénomène d'électrification par écoulement sur les cartons des transformateurs de puissance, (thèse de docteur de l'inp Grenoble), Ecole Française de Papeterie et des Industries Graphiques - UMR CNRS 5518, dans le cadre de l'Ecole Doctorale Science des Matériaux et Génie des Procèdes, Institut national polytechnique de Grenoble, 9 février 2007, p : 14

[4]BERNARD Hochart, « transformateur statique calcule. Construction », *électricité licencié ès sciences*, technique d'ingénieur, p : 427-6.

[5] BOURGEOIS Audrey, Etude du phénomène d'électrification par écoulement sur les cartons des transformateurs de puissance, (thèse de docteur de l'inp Grenoble), Ecole Française de Papeterie et des Industries Graphiques - UMR CNRS 5518, dans le cadre de l'Ecole Doctorale Science des Matériaux et Génie des Procèdes, Institut national polytechnique de Grenoble, 9 février 2007, p : 14.

[6] ANTHONY Lefèvre, *contribution a la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs Application à l'étude de l'échauffement sur charges non linéaires*, (Thèse de Doctorat), école doctorale sciences et technologies de l'information et des matériaux, université de nantes, 27 octobre 2006,p :21-26.

[7] AMIDOU Betie, Impacts de la qualité du système d'isolation sur la condition et l'efficacité des transformateurs de puissance, (thèse du doctorat en ingénierie), l'université du Québec à Chicoutimi, Septembre 2015, p : 19-26

[8] CHRISTOPHE Perrier, étude des huiles et mélanges à base d'huile minérale pour transformateurs de puissance-recherche d'un mélange optimal, thèse pour obtenir le grade de docteur, école centrale de Lyon, 12/04/2005, p : 11.

[9] BEBOUKHA Abd Errazzak, « *ghilani Moussa, modélisation et simulation de la protection différentielle d'un transformateur de puissances* » Mémoire de Fin d'Etude En vue de l'obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE, Université d'EL-Oued, 23-24 Juin 2014, p : 15-16.

[10] BELKACEMI Djamel, « *Etude des caractéristiques des matériaux isolants pour transformateurs* », mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, juin 2012, p : 3-4.

[11] France Renaud, et autre, *les effets des champs électriques et magnétiques sur la santé et la productivité du bétail*, canada, hydro Québec, 1999,16p.

[12] zentak. *Applications des lois de la dynamique*, [En ligne]. Adresse URL : http://zentak.fr/terminaleS/T2_Lois_modeles/P6_Mvts_Champs_Electrostatiques.pdf

[13] chapitre2 électrostatique, « *cour de haute tension master semestre1* », p : 17.

www.surprises.ch/HT/chapitres/Ch-2.pps

[14] CHERIFI mohamed el habib, chaibi kouider, « *Méthode de calcul de champ électrique pour l'isolation des transformateurs immergés* », mémoire de master, Université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2014/2015, p : 12-17.

«Wiedmann electrical technologies» Weidmann systems international AG- 2003.

[15]: Mohamed-Raed ARAB, *Reconstruction stochastique 3D d'un matériau céramique poreux à partir d'images expérimentales et évaluation de sa conductivité thermique et de sa perméabilité*, Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Limoges, université de limoges, le 5 juillet 2010, p : 98.

[16] : MOHAMED Ouameur, ' *modélisation, simulation et optimisation d'un moteur roue*, note d'application de projet, interface comsol/matlab et algorithme génétique, le 01/01/2014, p : 6-8.

[17] Derler.f, h.j.kirch, ch.vrause, e.schneider, Weidmann.H Ltd.ch.8640 rapperswill switzerland, « *development of a desing method for insulating structuresexposed to electric stress in long oil gaps and along oil transformerboard interfaces* »,1992,p:110.

RÉSUMÉ

Résumé :

Notre mémoire a été effectuée pour le principe de calcul de champ électrique dans les grandes distances d'huile. Le premier pas de ce travail à faire c'est un modèle de simulation qui est établi et calculé par le logiciel comsol 3.5a 2D à cause de la comparaison des deux cas étudiés : cas1 (un diamètre de 80mm) et cas2 (un diamètre de 20mm) à travers de ce changement on compare les résultats de calculs de champ électrique et la marge de sécurité. Enfin on trouve que la bonne situation est présente dans le cas1, ce qui implique une validation d'isolation, et d'exclure l'apparition d'une décharge partielle.

Mots clés: champ électrique-isolation-l'huile-comsol 3.5a 2D-simulation.

Abstract:

Our memory has been made for the calculation principle of electric field in the great distances of oil. The first step of this work to be made it is the model of simulation that was established and calculated by the comsol software 3.5a 2D to compare both cases studies:

cas1 (80 mm of diameter) and cas2 (20 mm of diameter) through this change we compare the results of calculations of electric field and the safety margin. Finally we find that the good location (good financial situation) is present in him cas1, what implies a validation of insulation, and to exclude the appearance of a partial discharge.

Key words: electric field-isolation-oil-comsol 3.5a 2D-simulation.

ملخص:

في مذكرتنا قمنا بحساب مبدأ الحقل الكهربائي في مسافات كبيرة من النفط. الخطوة الأولى من هذا العمل هو نموذج تم حسابه و إنشائه بواسطة برنامج Comsol 3.5a 2D :

الحالة الأولى 1 (قطر 80 ملم), الحالة الثانية 2 (قطر 20 ملم) من خلال هذا التغيير مقارنة النتائج المحسوبة من الحقل الكهربائي وهامش أمان. وأخيرا نجد أن الوضع الصحيح هو الحالة الأولى. هذا ينطوي على التحقق من صحة العزل، واستبعاد حدوث التفريغ الجزئي.

الكلمات المفتاحية : المجال الكهربائي- العزل- نفط- comsol 3.5a 2D- محاكاة.