

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université de Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الإلكترونيات

Département d'Électrotechnique



Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commande Électrique

Thème

Simulation numérique d'une configuration non uniforme du champ électrique dans l'huile de transformateur de puissance

Présenté par :

- 1) BELMILOUD FAYCAL ABDELAZZIZ
- 2) BENSMAIL BOCHRA

Devant le jury :

Dr AOUIMEUR Djillali
Dr BOUDJELLA Fatima Zohra
Pr. ZELMAT Samir

UAT.B.B (Ain Temouchent) Président
UAT.B.B (Ain Temouchent) Examinatrice
UAT.B.B (Ain Temouchent) Encadrant

Année Universitaire 2024/2025

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, qui nous a accordé la force, la patience et la persévérance nécessaire pour mener à bien ce travail.

Nous souhaitons ensuite adresser nos sincères remerciements à Monsieur ZELMAT Samir, notre encadrant à l'université, pour sa disponibilité, ses conseils pertinents, son suivi et ses encouragements tout au long de ce projet. Son encadrement a grandement contribué à la qualité de ce mémoire.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury :

- Dr AOUIMEUR Djillali
- Dr BOUDJELLA Fatima Zohra

Nos remerciements vont également à nos professeurs de l'université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, pour la qualité de l'enseignement reçu durant notre cursus, ainsi qu'à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Enfin, nous remercions nos familles et nos amis pour leur soutien moral inestimable, leur patience et leur présence avec nous.

DÉDICACES

Je dédie ces mémoires

À mes chers parents, que Dieu les protège.

À mes chères sœurs.

À mon cher frère.

À toute la famille Bensmaïl.

À tous mes amis.

À tous ceux qui m'ont aidée.

À tous ceux qui me sont chers.

Bochra

Je dédie ces mémoires

À mes chers parents, que Dieu les protège.

À mes chères sœurs.

À toute la famille Belmiloud.

À tous mes amis.

À tous ceux qui m'ont aidée.

Fayçal abdelazziz

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GÉNÉRALE

I. Généralités sur les transformateurs

I.1 Introduction :	1
I.2 Définition du transformateur :	1
I.3 Symboles électriques du transformateur :	2
I.4 Principe de fonctionnement :	2
I.5 Le rôle des transformateurs :	2
I.5.1 Transformateur triphasé :	3
I.5.2 Transformateur monophasé :	4
I.6 Les technologies de bobinage :	4
I.6.1 La technologie en colonne :	5
I.6.2 La technologie cuirassé :	6
I.7 Construction du transformateur de puissance :	6
I.8 Le système d'isolation dans les transformateurs de puissance :	7
I.8.1 Isolants liquides :	8
I.8.1.1 Principaux types d'isolants liquides :	8
I.8.1.2 Les huiles minérales :	9
I.8.1.3 Huiles synthétiques :	9
I.8.1.4 Huiles silicones :	10
I.8.1.5 Choix d'un liquide isolant :	10
I.8.2 Isolants solides :	11
I.8.2.1 Rôle et principaux types des isolants solides :	11
I.8.2.2 Les isolants organiques :	12
I.8.2.3 Cartons et papiers :	12
I.9 Conclusion :	13
II .Méthode de calcul des contraintes électriques dans l'huile	
II.1 Introduction :	14
II.2 Le champ électrique :	14
II.2.1 Définition :	14
II.2.2 Champ uniforme :	14
II.2.3 Champ non uniforme ou divergent (pointe/plan):	15
II.3 Méthode de calcul de Weidmann :	16
II.4 Exemple de calcul avec la méthode « Weidmann » :	17

II.5 Conclusion :	22
III. Présentation des configurations étudiées	
III.1 Introduction :	23
III.2 Configurations étudiées :	23
III.2.1 Premier cas :	23
III.2.2 Deuxième cas :	24
III.2.3 Troisième cas :	25
III.3 Présentation du logiciel FLUX 2D :	26
III.4 Les étapes de calcul du champ électrique sous Flux 2D:	27
III.4.1 Choix du modèle d'étude :	27
III.4.2 Géométrie :	27
III.4.2.1 Premier cas :	27
III.4.2.2 Deuxième cas :	28
III.4.2.3 Troisième cas :	29
III.4.3 Modélisation de la physique :	29
III.4.4 Choix du maillage :	29
III.4.4.1 Les effets de maillage :	30
III.4.4.2 Maillage du premier cas :	30
III.4.4.3 Maillage du deuxième cas :	31
III.4.4.4 Maillage du troisième cas :	32
III.4.5 Résolution du problème :	33
III.5 Conclusion :	33
IV. Analyse de l'étude de simulation	
IV.1 Introduction :	35
IV.2 Distribution des équipotentielles et dégradé du champ électrique :	35
IV.3 Méthode d'analyse des résultats de simulation :	39
IV.4 Effet du maillage	40
IV.5 Comparaison entre coupe 2D et coupe axisymétrique	42
IV.6 Méthode de calcul des contraintes électriques dans l'huile :	43
IV.7 Méthode Weidmann pour l'analyse d'un champ non uniforme :	47
IV.8 Limite de la méthode d'analyse simplifiée :	53
IV.9 Conclusion :	55
CONCLUSION GÉNÉRALE	
BIBLIOGRPAHIE	

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Transformateur de puissance.	1
Figure I.2 : Symbole d'un transformateur.	2
Figure I.3 : Position des transformateurs dans le réseau d'énergie électrique.	3
Figure I.4 : Transformateur triphasé.	3
Figure I.5: Transformateur monophasé.	4
Figure I.6 : Vue d'un transformateur à colonne et cuirassé.	5
Figure I.7 : Vue en coupe des bobines des transformateurs à colonnes.	5
Figure I.8 : Vue en coupe des bobines des transformateurs type cuirassé.	6
Figure I.9 : Vue schématique d'un transformateur, type colonne	7
Figure I.10. Vue intérieure d'un transformateur, type colonne.	7
Figure I.11. Processus de raffinage pour les huiles brutes	9
Figure I.12: Structure de l'ester synthétique, R : chaîne saturée.	10
Figure I.13: Différents types de papier d'isolation.	12
Figure II.1 : Champ uniforme (plan/plan).	14
Figure II.2: Champ divergent (pointe/plan).	15
Figure II.3 : Variation du champ électrique « Edp » en fonction de la distance pour différentes configurations (courbes Weidmann).	16
Figure II.4: I). Configuration géométrique du model. II). Répartition des lignes équipotentiellles.	17
Figure II.5: Champ électrique uniforme dans l'huile.	18
Figure II.6: Comparaison entre la valeur moyenne et la valeur admissible du champ électrique dans l'huile (configuration avec A=14,5).	19
Figure II.7: Subdivision du volume d'huile en 03 canaux à l'aide des barrières isolantes carton.	19
Figure II.8: Marges positives dans les trois canaux d'huile.	20
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 du modèle étudié - Cas 1 - [21].	23
Figure III.2 : Coupe 2D du modèle étudié - Cas 1 -	24
Figure III.3 : Présentation de deuxième cas étudié - Cas 2 -	24
Figure III.4 : Coupe 2D du modèle étudié dans le cas 2.	25
Figure III.5 : Présentation de deuxième cas étudié - Cas 3 - (coupe axisymétrique).	25
Figure III.6 : Coupe axisymétrique du modèle étudié dans le cas 3.	26
Figure III.7 : Fenêtre principale du logiciel flux-2D.	27
Figure III.8 : Géométrie du modèle en 2D pour le cas1 (φ 20- φ 80).	28
Figure III.9: Géométrie du modèle en 2D pour le cas2 (φ 20- φ 80).	28
Figure III.10 : Géométrie du modèle en axisymétrique pour le cas3 (φ 20- φ 80).	29
Figure III.11: Différence entre les trois maillages testés.	30
Figure III.12: Vue sur le maillage global avec un zoom de la partie encadrée cas1- φ 20.	30
Figure III.13: Vue sur le maillage global avec un zoom de la partie encadrée cas1- φ 80.	31
Figure III.14: Vue sur le maillage global avec un zoom de la partie encadrée cas 2- φ 20.	31
Figure III.15: Vue sur le maillage global avec un zoom de la partie encadrée cas 2- φ 80.	31
Figure III.16: Vue sur le maillage global avec un zoom de la partie encadrée cas 3- φ 20.	32
Figure III.17: Vue sur le maillage global avec un zoom de la partie encadrée cas 3- φ 80.	32

Figure IV.1: Répartition des équipotentiels pour les deux diamètres du câble HT (Cas1).....	36
Figure IV.2: Dégradé du champ électrique les deux diamètres du câble HT (Cas1).....	36
Figure IV.3: Répartition des équipotentiels pour les deux diamètres du câble HT (Cas2).....	37
Figure IV.4: Dégradé du champ électrique les deux diamètres du câble HT (Cas2).....	37
Figure IV.5: Répartition des équipotentiels pour les deux diamètres du câble HT (Cas3).....	38
Figure IV.6: Dégradé du champ électrique les deux diamètres du câble HT (Cas3).....	38
Figure IV.7: Chemins utilisés pour le calcul des contraintes électriques dans l'huile (cas1).....	39
Figure IV.8: Chemins utilisés pour le calcul des contraintes électriques dans l'huile (cas2).....	39
Figure IV.9: Chemins utilisés pour le calcul des contraintes électriques dans l'huile (cas3).....	40
Figure IV.10: Effet du maillage sur le dégradé de champ électrique (cas1- Φ 20mm).	41
Figure IV.11: l'effet des maillages en trois (cas1- Φ 20).	42
Figure IV.12: Comparaison entre 2D et axisymétrique (Φ 80mm).	43
Figure IV.13: Variation du champ électrique dans l'huile en allant du câble HT vers le tube (cas1).	44
Figure IV.14: Variation du champ électrique dans l'huile en allant du câble HT vers le tube (cas2).	46
Figure IV.15: Courbe du champ électrique réel et de sa moyenne cumulée (cas1- Φ 80).	48
Figure IV.16: Comparaison entre la courbe Weidmann avec le champ moyen cumulé.....	48
Figure IV.17: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le cas 1- Φ 80.	49
Figure IV.18: Courbe du champ électrique réel et de sa moyenne cumulée (cas1- Φ 20).	50
Figure IV.19: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le cas 1- Φ 20.	50
Figure IV.20: Courbe du champ électrique réel et de sa moyenne cumulée (cas2- Φ 80).	51
Figure IV.21: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le cas 2- Φ 80.	51
Figure IV.22: Courbe du champ électrique réel et de sa moyenne cumulée (cas2- Φ 20).	52
Figure IV.23: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le cas 2- Φ 20.	52
Figure IV.24: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le Cas 1- Φ 80mm – U =215kV.	53
Figure IV.25: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le Cas 1- Φ 20mm – U =215kV.	54
Figure IV.26: Variation de la marge de sécurité en fonction de la distance dans l'huile.	55

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Principaux éléments de construction du transformateur	6
Tableau I.2: Choix du liquide isolant pour différents types de transformateurs.	11
Tableau II.1: Coefficients “A” des courbes Weidmann.....	17
Tableau II.2: Données pour le calcul du champ électrique dans les trois canaux d’huile.	20
Tableau IV.1: Détails des configurations étudiées.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV.2 : Résultats d’analyse avec la méthode simplifiée.....	Erreur ! Signet non défini.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction Générale :

La distribution fiable et sécurisée de l'énergie électrique constitue aujourd'hui un enjeu majeur pour les réseaux de transport, les industries et les consommateurs. Dans ce contexte, les transformateurs de puissance jouent un rôle central, en assurant l'adaptation des niveaux de tension tout au long de la chaîne énergétique, depuis la production jusqu'à la consommation.

Le présent travail de fin d'études s'inscrit dans cette problématique et vise à étudier le comportement des transformateurs de puissance soumis à des contraintes électriques, notamment en ce qui concerne la tenue diélectrique dans l'huile isolante.

Dans ce mémoire on présentera une modélisation d'un dispositif expérimental à l'aide d'un logiciel de simulation d'éléments finis. Le but étant d'étudier des configurations en champ non uniforme et de comparer les différentes méthodes d'analyses des contraintes électriques dans l'huile.

Le premier chapitre présente des rappels sur les transformateurs de puissance, leur principe de fonctionnement ainsi que leur constitution. On présentera notamment l'aspect isolation des transformateurs et les matériaux utilisés pour assurer cette fonction essentielle et primordiale pour le bon fonctionnement du transformateur.

Dans le deuxième chapitre et après des rappels de quelques notions fondamentales sur le champ électrique, on présente la méthode d'analyse des contraintes électriques dans l'huile et notamment les équations de Weidmann utilisés dans la conception du système d'isolation des transformateurs. On donnera un exemple théorique sur lequel on appliquera cette méthode pour une meilleure compréhension de son principe de calcul.

L'étude de simulation est présentée dans le troisième chapitre. Le dispositif simulé est présenté en détails ainsi que les différentes configurations géométriques étudiées dans notre mémoire. On présentera également les différentes étapes suivies dans le logiciel Flux2D qui permettent de calculer les contraintes électriques dans l'huile.

Enfin, le dernier chapitre est consacré à l'analyse des résultats de simulation. On présentera une comparaison entre les différents cas étudiés en expliquant étape par étape la méthode de calcul des contraintes électriques dans l'huile ainsi que les valeurs du champ électriques admissibles. Le but étant de pouvoir déterminer des marges de sécurité fiables et représentative du système étudié.

On mettra notamment l'accent sur la particularité de ces calcul dans les configurations de champ non uniforme ainsi que les problématiques qui peuvent se poser afin d'arriver à une conception plus précise du système d'isolation des transformateurs de puissance.

CHAPITRE I

Généralités sur les transformateurs

I.1 Introduction :

Le transformateur joue un rôle essentiel dans le transport et la distribution de l'énergie électrique. En permettant à l'énergie d'être transportée sur de longues distances, il facilite ensuite sa distribution vers les industries et les habitations. Dispositif fondamental de l'électrotechnique, le transformateur fonctionne sur le principe de l'induction électromagnétique, convertissant l'énergie électrique d'un circuit à un autre tout en ajustant les niveaux de tension nécessaires.

Ce premier chapitre vise à introduire le contexte dans lequel s'inscrivent les transformateurs de puissance. Nous explorerons les principes de fonctionnement de ces appareils, les différents types existants, ainsi que leurs principaux éléments, afin de mieux comprendre leur importance dans le système électrique moderne.

I.2 Définition du transformateur :

Le transformateur est un appareil électrique statique, Comme on peut l'appeler un convertisseur qui permet de modifier les valeurs de la tension et de l'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative en un système de tension et de courant de valeurs différentes mais de même fréquence et de même forme. Il est composé de deux enroulements (ou plus) couplés sur un noyau magnétique. Un enroulement est un ensemble de spires formant un circuit associé à l'une des tensions pour lesquelles le transformateur a été établi [1].



Figure I.1: Transformateur de puissance [2].

I.3 Symboles électriques du transformateur :

Dans un schéma électrique, le transformateur peut être représenté par deux symboles (a) et (b) ci-dessous :

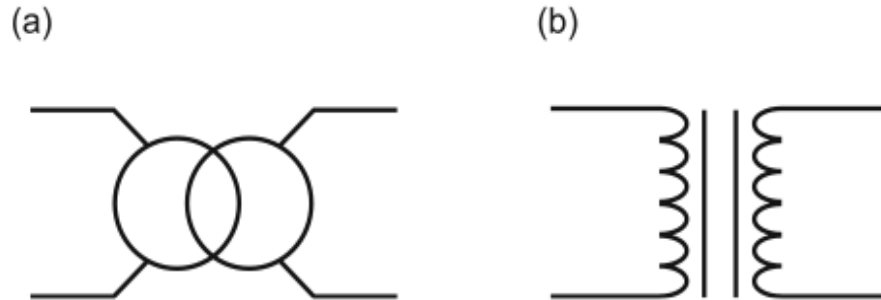


Figure I.2 : Symbole d'un transformateur [3].

I.4 Principe de fonctionnement :

Un transformateur est un dispositif électrique qui transfère l'énergie d'un circuit à un autre par induction électromagnétique. En termes simples, il modifie les niveaux de tension sans changer la fréquence. Le fonctionnement d'un transformateur repose principalement sur deux enroulements de fil isolé : un enroulement primaire et un enroulement secondaire, enroulés autour d'un noyau magnétique.

Enroulement primaire : Reçoit l'énergie électrique d'une source, comme une centrale électrique.

Enroulement secondaire : Transmet l'énergie électrique modifiée à la charge, comme les réseaux locaux de distribution.

Par la loi de Faraday, un changement de courant dans l'enroulement primaire induit une force électromotrice (f.é.m.) dans l'enroulement secondaire, permettant ainsi la transformation de la tension [4].

I.5 Le rôle des transformateurs :

Les transformateurs jouent un rôle essentiel dans le système de distribution électrique. Ils permettent de convertir les niveaux de tension entre les différentes étapes de production, de transport et de distribution de l'électricité. Comprendre le fonctionnement et l'importance des transformateurs est crucial pour appréhender comment l'électricité est acheminée efficacement et en toute sécurité jusqu'aux foyers et entreprises [5].

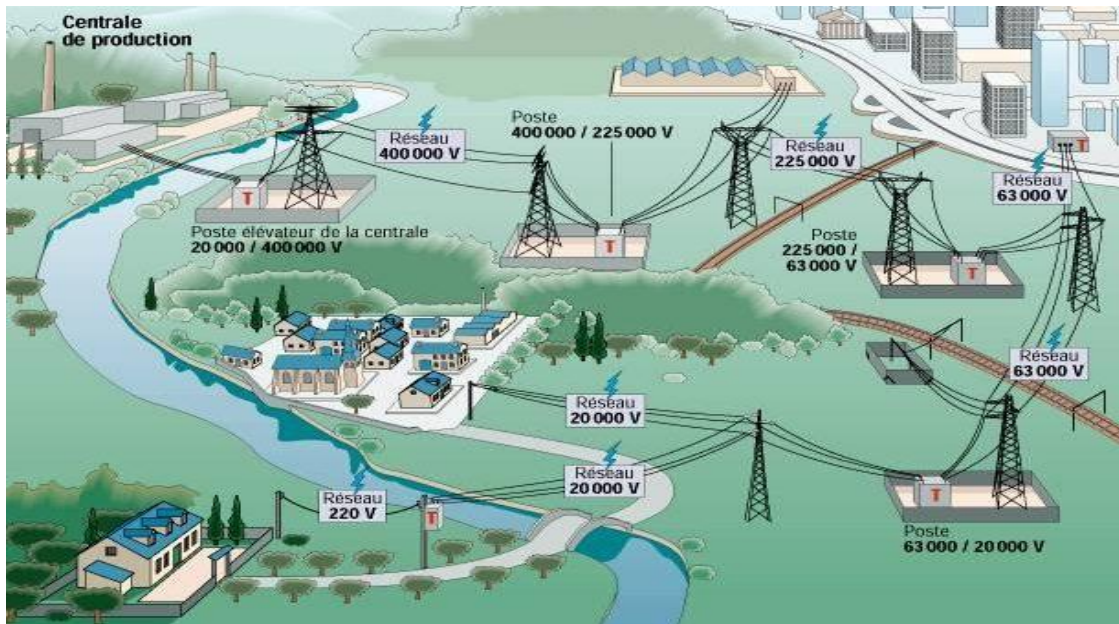


Figure I.3 : Position des transformateurs dans le réseau d'énergie électrique.

I.5.1 Transformateur triphasé :

Le transformateur triphasé est un appareil statique à induction électromagnétique destinée à transformer un système triphasé et alternatif en un autre système triphasé et alternatif de même fréquence, d'intensités et de tensions généralement différentes, en assurant un isolement galvanique.



Figure I.4 : Transformateur triphasé.

I.5.2 Transformateur monophasé :

Un transformateur monophasé est un transformateur dont le primaire est un enroulement monophasé alimenté par une tension monophasée et l'enroulement secondaire est une bobine qui alimente une charge monophasée également.

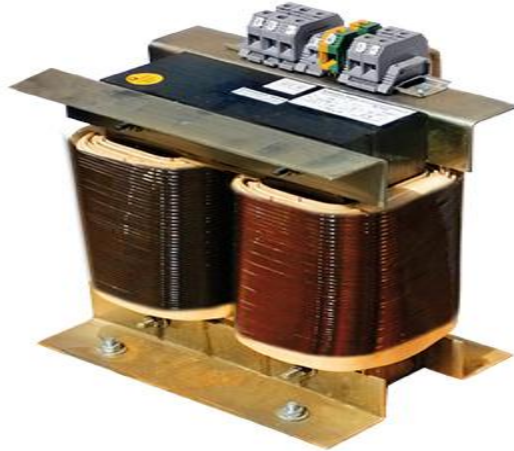


Figure I.5: Transformateur monophasé.

I.6 Les technologies de bobinage :

Pour réaliser un enroulement de transformateur d'une tension nominale donnée et d'un nombre de spires défini, deux technologies de bobinages sont réalisables : cuirassé ou colonne.

Chacune d'elle est caractérisée par sa configuration d'enroulements par rapport au circuit magnétique. La technologie dite cuirassé consiste à disposer les bobines au centre du circuit magnétique. Dans la technologie colonne, c'est l'inverse.

Chaque technologie tient les contraintes qui lui sont définies dans le cahier des charges. Le choix de l'une ou l'autre des technologies de bobinages relèvera souvent du constructeur.

Chacune d'elle a ses avantages qui peuvent être :

- Un gain de place (cuirassé)
- Une meilleure tenue au court-circuit (cuirassé)
- Un meilleur refroidissement (colonne)
- Une meilleure tenue au choc de foudre (colonne)
- Une (relative) facilitée de réalisation et bonne tenue diélectrique (colonne) [6].

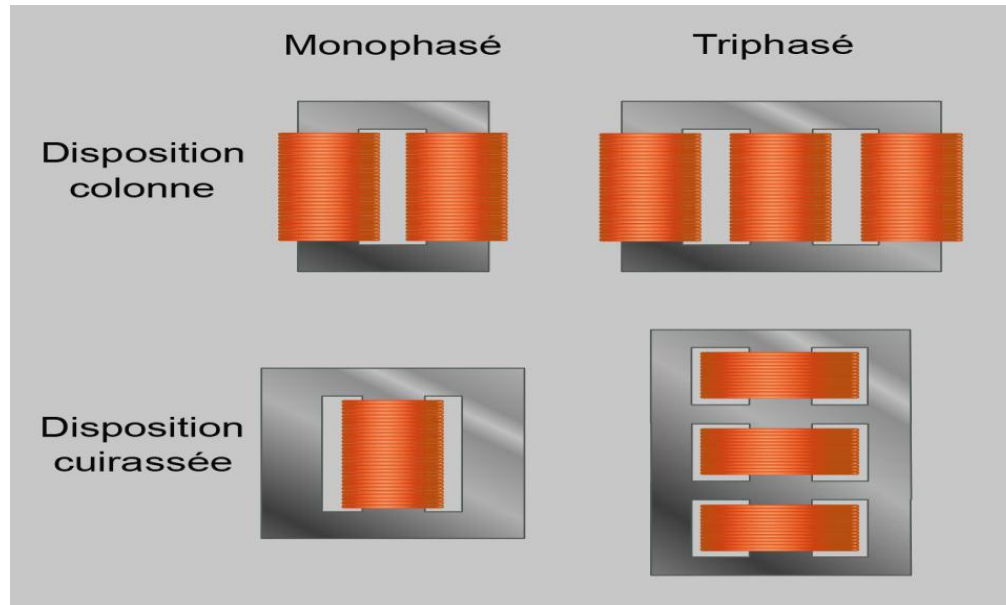


Figure I.6 : Vue d'un transformateur à colonne et cuirassé.

I.6.1 La technologie en colonne :

En technologie colonne, les chemins de retour du flux magnétique passent dans des jambes de circuit magnétique, qui sont entourées concentriquement par les enroulements principaux. Dans un transformateur triphasé, il y a une jambe de circuit magnétique par phase électrique. Ce type de transformateur est particulièrement répandu dans le monde pour tout type d'application. Il existe deux techniques de bobinage dans la technologie à colonne : le bobinage en couches et le bobinage en galettes [7].

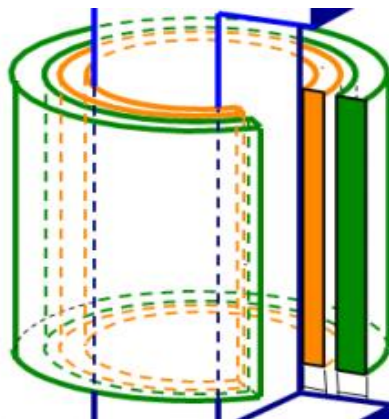


Figure I.7 : Vue en coupe des bobines des transformateurs à colonnes.

I 6.2 La technologie cuirassé :

En technologie cuirassé, le circuit magnétique entoure les bobinages haute et basse tensions d'une phase donnée. Les chemins de retour du flux magnétique à travers le circuit magnétique sont externes et entourent les bobinages. Cette technologie est particulièrement compacte. Elle nécessite une certaine expérience et une main d'œuvre importante pour la construction des bobinages et à l'assemblage des tonnes de circuit magnétique [7].

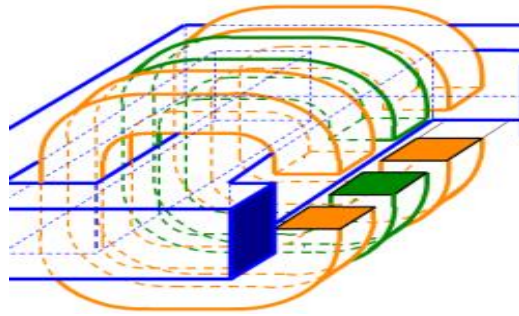


Figure I.8 : Vue en coupe des bobines des transformateurs type cuirassé.

I .7 Construction du transformateur de puissance :

Les éléments essentiels utilisés dans la construction des transformateurs de puissance sont listé dans le tableau suivant et illustrés dans la figure I.9.

Tableau I.1: Principaux éléments de construction du transformateur [8].

1	Cuve
2	Couvercle
3	Conservateur
4	Indicateur de niveau d'huile
5	Relais piège à gaz ou buchholz
6	Tuyau d'huile
7	Changeur de prise
8	Moteur électrique du changeur de prises
9	Transmission mécanique du changeur de prises
10	Traversée du primaire
11	Dôme avec transformateurs de courant à l'intérieur.
12	Traversée du secondaire
13	Connexion du secondaire avec l'extérieur
14	Enroulements
15	Noyau magnétique
16	Élément mécanique maintenant le noyau magnétique et les enroulements.
17	Connexion du changeur de prises aux enroulements.

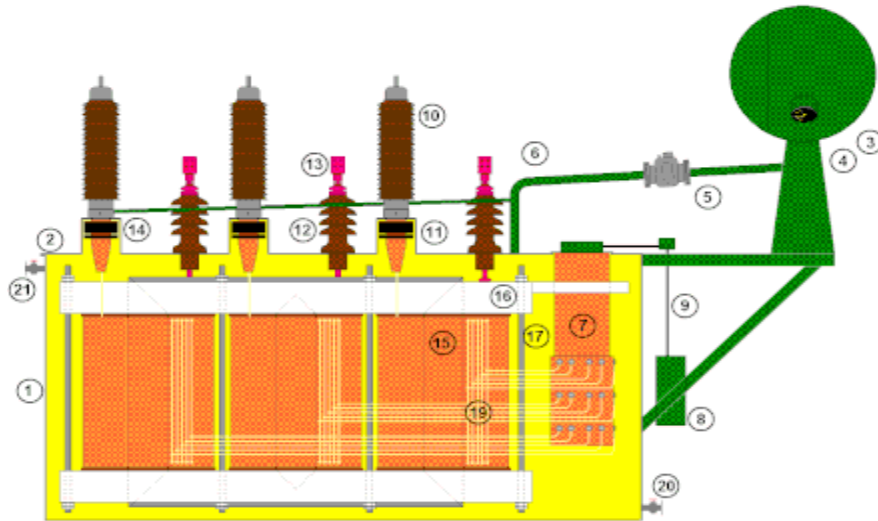


Figure I.9 : Vue schématique d'un transformateur, type colonne [8].

I.8 Le système d'isolation dans les transformateurs de puissance :

À l'intérieur d'un transformateur de puissance, on distingue deux types d'isolants :

Un isolant solide à base de cellulose, utilisé pour l'isolation entre les spires, entre les enroulements et entre les enroulements et la masse.

Une isolation liquide, généralement constituée d'huile, qui remplit les espaces d'air afin d'assurer une isolation optimale [9].

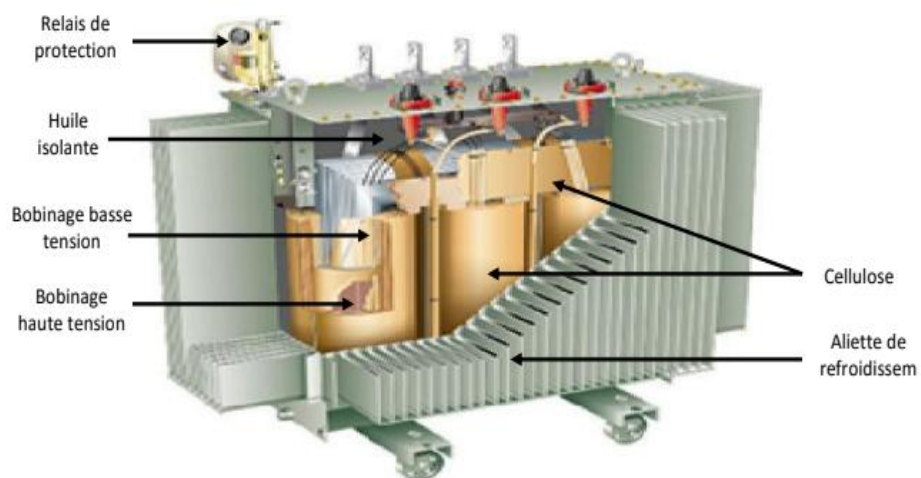


Figure I.10. Vue intérieure d'un transformateur, type colonne.

I.8.1 Isolants liquides :

Les isolants liquides sont utilisés en électrotechnique comme imprégnant d'isolation 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 d'un assemblage.

La technique d'isolation des transformateurs par des huiles isolantes est utilisée depuis plus d'un siècle et reste largement employée pour les transformateurs de puissance. En revanche, les transformateurs de distribution peuvent être secs. Cette différence s'explique par plusieurs raisons [10] :

- Comparés aux isolants solides, les liquides assurent à la fois le refroidissement et l'isolation du transformateur. Cela permet aux transformateurs immergés d'être plus compacts que les transformateurs secs de même puissance.
- Les liquides offrent des performances diélectriques comparables à celles des isolants solides, tout en étant plus économiques.
- Les isolants solides offrent des performances diélectriques similaires à celles des liquides, mais à un coût nettement plus élevé.
- Pour des niveaux de tensions élevés, l'utilisation d'isolants solides seuls présente un risque énorme aux décharges partielles.
- L'analyse de l'huile permet d'évaluer l'état du transformateur de manière économique.
- Les transformateurs immergés sont moins bruyants que les secs et provoquent ainsi moins de nuisance sonore.

Les huiles isolantes assurent donc essentiellement deux fonctions :

- a) Fonction diélectrique (isolation électrique).
- b) Fonction transfert de chaleur (refroidissement).

I.8.1.1 Principaux types d'isolants liquides :

Les huiles isolantes sont classées en fonction de leur origine et se répartissent en trois catégories : les huiles végétales (d'origine naturelle), les huiles minérales (issues du raffinage de produits pétroliers) et les liquides de synthèse. Cette classification reflète leur évolution chronologique dans les applications électrotechniques. Les huiles végétales ont été les premières à être utilisées, suivies du développement des huiles minérales. Par la suite, les liquides de synthèse ont été conçus pour compenser certaines limitations des huiles minérales dans des applications spécifiques.

I.8.1.2 Les huiles minérales :

Les huiles minérales sont obtenues par raffinage de bruts de pétrole. Ces pétroles bruts doivent passer par divers stades de raffinage pour donner des huiles isolantes conformes aux applications électrotechniques. Elles possèdent de bonnes propriétés diélectriques et de transfert de chaleur, et une bonne compatibilité avec les isolants celluloseux. Malgré les tensions sur le marché international, les huiles minérales sont encore disponibles et à des prix assez bas. C'est principalement pour ces raisons technico-économiques, que les huiles minérales sont les plus communément utilisées dans les transformateurs de puissance [10].

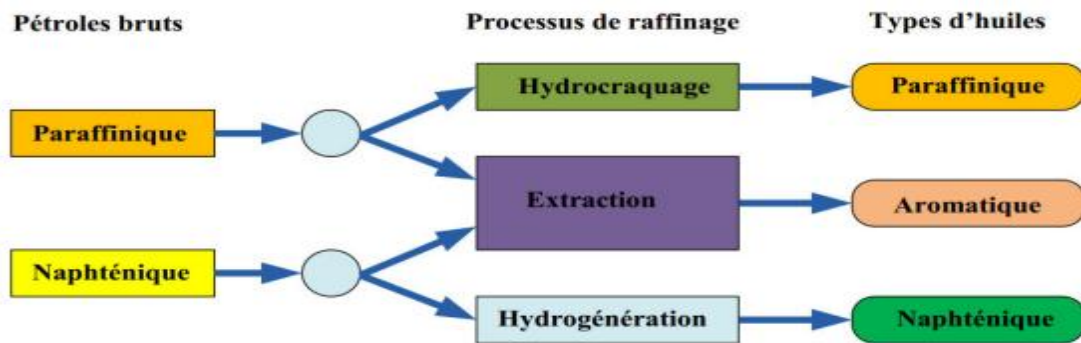


Figure I.11. Processus de raffinage pour les huiles brutes [11].

L'un des inconvénients des huiles minérales est leur inflammabilité. En effet, ces huiles possèdent un point éclair relativement bas. Ceci pose un problème pour les appareils installés en zone urbaine, près de la population, tels que les transformateurs de traction ou de distribution.

I.8.1.3 Huiles synthétiques :

Bien que les huiles minérales occupent une place très importante parmi les liquides pour les applications électrotechniques, les huiles de synthèse sont utilisées chaque fois que des propriétés particulières sont recherchées. C'est notamment le cas lorsqu'il s'agit d'améliorer la résistance au feu des transformateurs se trouvant à proximité de la population.

Ces liquides synthétiques sont tous produits à partir de divers procédés chimiques. On distingue trois types principaux, spécifiquement conçus pour les transformateurs.

- Les huiles silicones;
- Les hydrocarbures chlorés (halogénés), tel que les PCB ;
- Les huiles esters de pentaérythritol encore appelées esters synthétiques ou esters organiques (par opposition aux esters naturels ou huiles végétales).

Les huiles esters synthétiques sont obtenues à partir d'un tétra cool (pétaérythriol) ou d'un mélange d'acides mono carboxyliques contenant de 7 à 9 carbones (Figure I.12) [12].

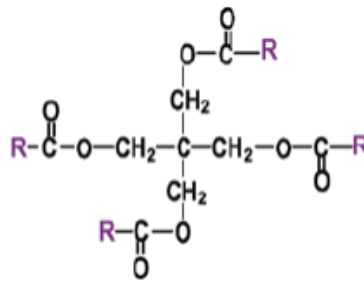


Figure I.12: Structure de l'ester synthétique, R : chaîne saturée.

I.8.1.4 Huiles silicones :

Les silicones, ou encore polysiloxanes, sont des composés inorganiques formés d'une chaîne silicium-oxygène (...-Si-O-Si-O-Si-O-...) sur laquelle des groupes se fixent, sur les atomes de silicium. Certains groupes organiques peuvent être utilisés pour relier entre eux plusieurs de ces chaînes (...-Si-O-...).

I.8.1.5 Choix d'un liquide isolant :

Le choix d'un liquide pour une application donnée doit garantir à la fois la fiabilité des équipements et la sécurité des opérateurs. Il implique toujours un compromis entre les performances techniques du liquide isolant et son coût.

Les hydrocarbures aromatiques offrent des propriétés diélectriques bien supérieures à celles des huiles minérales, bien que leur coût soit environ quatre à cinq fois plus élevé. Ils sont principalement utilisés dans les câbles et les condensateurs, et en optimisant l'imprégnation grâce à une réduction de la taille des équipements, les fabricants obtiennent des dispositifs plus performants et moins coûteux que ceux imprégnés d'huile minérale. Dans le cas des transformateurs, il n'est pas possible de bénéficier des meilleures propriétés des liquides synthétiques, ce qui explique l'usage courant de l'huile minérale. Toutefois, lorsque la résistance au feu devient le critère déterminant, on privilégie l'imprégnation avec de l'huile de silicone ou d'ester. Le tableau I.2 montre les différents types d'huile utilisés dans divers types de transformateurs.

Tableau I.2: Choix du liquide isolant pour différents types de transformateurs.

	Huile minérale	Fluide silicone	Ester synthétique	Huiles végétales (Esters naturels)
Transformateurs de puissance	A	X	B	B
Transformateurs de traction	A	A	A	X
Transformateurs de distribution	A	A	A	A
Transformateurs d'instrument	A	X	X	X
A= Largement utilisé B= Utilisé moins fréquemment X= Couramment non utilisé				

I.8.2 Isolants solides :

Elle est composée de papiers et de cartons : le papier assure l'isolation des enroulements, tandis que le carton sert à isoler les enroulements entre eux ainsi que par rapport au noyau. Pour renforcer leur rigidité diélectrique et limiter le risque de décharges partielles, ces matériaux sont imprégnés d'un liquide diélectrique (huile).

I.8.2.1 Rôle et principaux types des isolants solides :

Les isolants solides trouvent leurs applications dans 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 solides isolants assurent plusieurs fonctions. Ils sont utilisés pour maintenir mécaniquement les bobinages et pour matérialiser les canaux de circulation du liquide de refroidissement.

On distingue trois types d'isolation solide :

- Isolation solide conventionnelle : papiers et cartons sont à base de fibres de cellulose.
- Isolation solide haute température : papiers et cartons sont à base de polymères synthétiques (aramide).
- Isolation solide hybride : association des papiers cellulose et aramide [12].

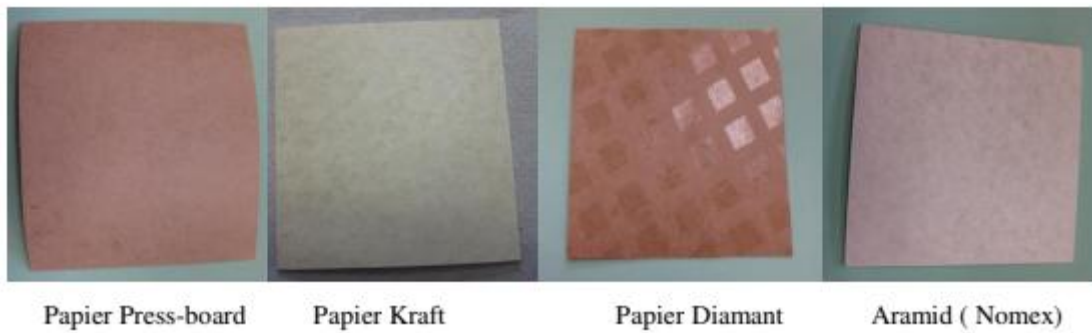


Figure I.13: Différents types de papier d'isolation.

I.8.2.2 Les isolants organiques :

Largement employés dans les domaines de la câblerie, des condensateurs, des alternateurs, des transformateurs et des moteurs, ainsi que dans les dispositifs électroniques et les composants de puissance, ces matériaux se répartissent en deux catégories : les matériaux naturels, tels que les caoutchoucs, la paraffine et le papier, et les matériaux synthétiques, incluant les élastomères, les polymères et les composites.

I.8.2.3 Cartons et papiers :

De par leur nature diélectrique, les cartons isolent électriquement les 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 [13].

La structure chimique du bois utilisé dans la fabrication des cartons est particulièrement complexe. La majorité des substances qui le composent sont des polymères. Ces composants peuvent être classés par ordre de proportion décroissante comme suit [14].

- Les polysaccharides représentent environ 60 à 80% du bois. Ils comprennent deux classes de macromolécules : la cellulose et les hémicelluloses.
- Les substances phénoliques (20 à 30%) comprenant la lignine, les tanins, les constituants secondaires, les substances colorées.
- Les autres constituants (environ 5% variable suivant les végétaux) : résines, protéines, constituants minéraux, acides gras, savon...

I.9 Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a permis d'explorer le rôle fondamental des transformateurs dans le système électrique moderne. Nous avons vu que ces dispositifs sont essentiels pour le transport et la distribution de l'énergie électrique, en permettant d'ajuster les niveaux de tension nécessaires pour une transmission efficace sur de longues distances.

Les transformateurs, qu'ils soient monophasés ou triphasés, jouent un rôle crucial dans la conversion de l'énergie, garantissant ainsi une distribution sécurisée vers les foyers et les industries. Leur fonctionnement repose sur des principes d'induction électromagnétique, impliquant des enroulements primaires et secondaires, et est soutenu par des technologies de bobinage variées qui optimisent leur performance.

Nous avons également examiné les différents types de transformateurs, leurs composants clés, ainsi que les technologies d'isolation qui assurent leur efficacité et leur sécurité. En somme, comprendre le fonctionnement des transformateurs est indispensable pour appréhender les défis et les innovations dans le domaine de l'électrotechnique, garantissant un approvisionnement énergétique fiable et durable pour l'avenir.

Dans le chapitre suivant, nous expliquerons le principe de dimensionnement du système d'isolation dans les transformateurs de puissance et les principales règles de calcul utilisées pour déterminer les niveaux de contraintes électriques admissibles sur les huiles diélectrique.

CHAPITRE II

Méthode de calcul des contraintes électriques dans l'huile

II.1 Introduction :

Dans ce deuxième chapitre et après un rappel sur le champ électrique, nous exposons les fondements et les équations de calcul selon la méthode dite « Weidmann », que nous utiliserons dans notre étude pour calculer les contraintes électriques dans l'huile.

II.2 Le champ électrique :

II.2.1 Définition :

Un champ électrique est un champ de force invisible créé par l'attraction et la répulsion de charges électriques et se mesure en Volts par mètre (V/m). L'intensité du champ diminue à mesure qu'augmente la distance à sa source [15].

II.2.2 Champ uniforme :

Un champ électrique uniforme est caractérisé par une intensité constante, une direction unique et un sens identique en tout point de l'espace considéré. Un tel champ peut être généré entre deux plaques métalliques planes, notées **A** et **B**, séparées par une distance **d**, lorsqu'une **tension électrique** est appliquée entre elles [16].

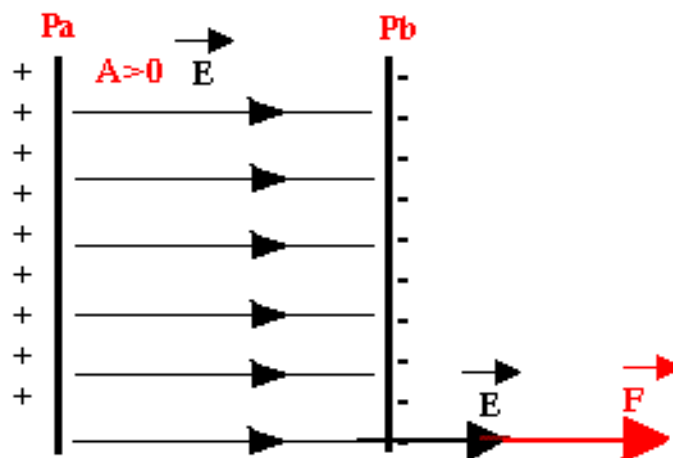


Figure II.1 : Champ uniforme (plan/plan).

Ce champ électrique est perpendiculaire aux armatures et s'oriente du conducteur ayant le potentiel le plus élevé vers celui ayant le potentiel le plus faible. L'intensité moyenne de ce champ est donnée par la formule suivante :

$$E = \frac{V}{d} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

V : est la tension appliquée entre les électrodes en Volts.

D : est la distance les séparant en mètre.

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

Du fait d'une forme et d'une taille particulière des électrodes, le champ électrique est beaucoup plus fort en certains points proches d'une électrode. Cette situation se produit en particulier lorsque la taille caractéristique de l'électrode est très petite devant la distance inter électrodes [17].

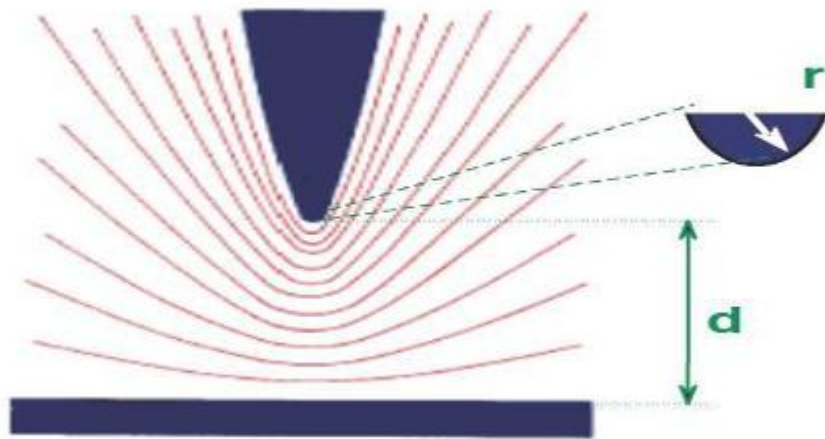


Figure II.2: Champ divergent (pointe/plan).

L'intensité moyenne de ce champ est donnée par la formule suivante :

$$E = \frac{2v}{r \ln\left(\frac{4d}{r}\right)} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

R : est le rayon de courbure de la pointe.

V : est la tension appliquée entre les électrodes.

D : est la distance les séparant.

II.3 Méthode de calcul de Weidmann :

Weidmann, un fabricant suisse de carton et de papier diélectrique, et à la suite de nombreux essais et travaux de recherche sur la tenue diélectrique dans les grands 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 électrodes. Elles montrent également que la nature des électrodes (nue ou isolée) ainsi que la qualité d'huile (propre ou mal dégazée, c-à-d neuve ou usée) ont une influence non négligeable sur la tenue diélectrique [18].

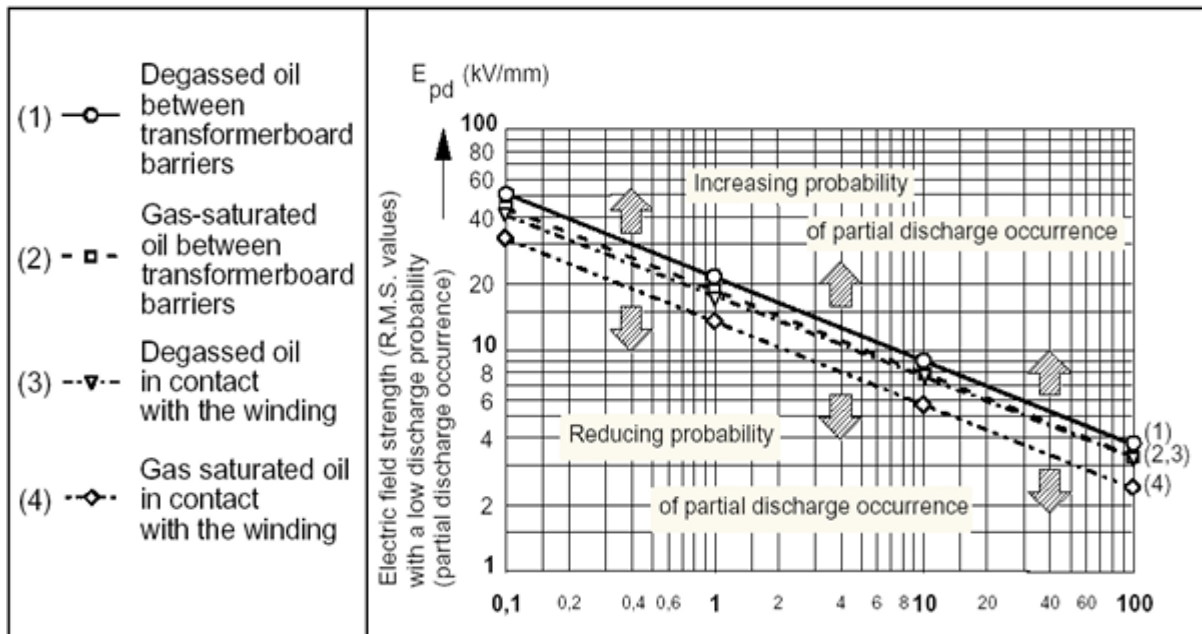


Figure II.3 : Variation du champ électrique « Edp » en fonction de la distance pour différentes configurations (courbes Weidmann).

Différentes courbes ont été établies en fonction de la nature des électrodes et de la qualité de l'huile. L'équation reliant la variation du champ électrique entrainant un faible taux de décharges partielles « Edp » et la distance dans l'huile, s'écrit sous la forme suivante :

$$E_{dp} = A \cdot d^{-0,37} \text{ [kV/mm]} \tag{II.3}$$

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 «maldégazée»
1	Huile entre barrières isolantes	21	17.5
2	Huile entre électrode isolée et 1ère barrière isolante	17.5	14.5
3	Huile 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 reliée à la masse et l'autre à la haute tension (HT), séparées par une distance de 100 mm, un volume d'huile propre est introduit entre les deux électrodes. Une tension de 350 kV est appliquée entre celles-ci. Dans cet exemple, l'électrode sous haute tension est isolée à l'aide d'un carton d'une épaisseur de 2 mm, correspondant à la configuration n°3 du tableau (II.1).

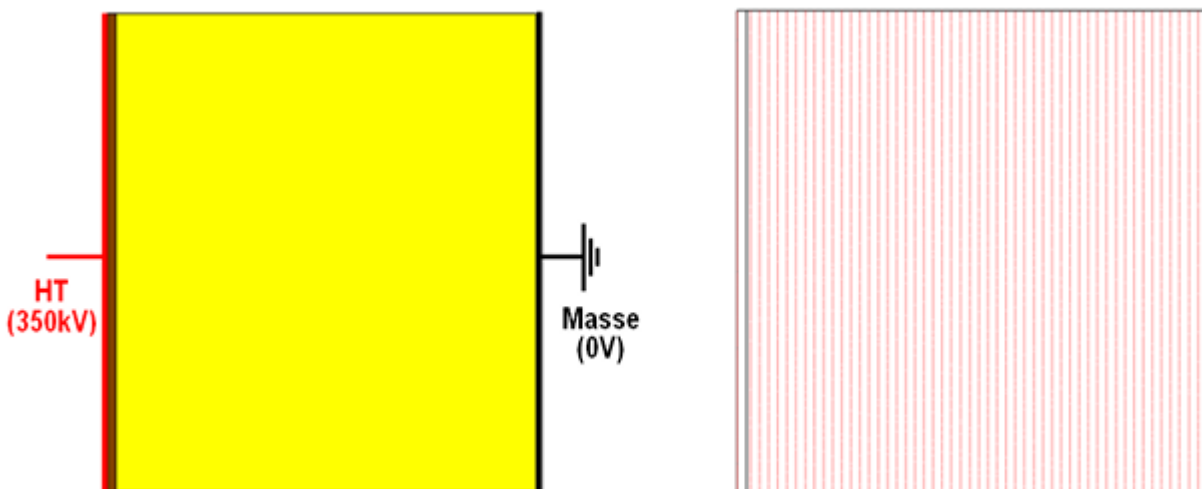


Figure II.4: I). Configuration géométrique du modèle. II). Répartition des lignes équipotentielles.

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

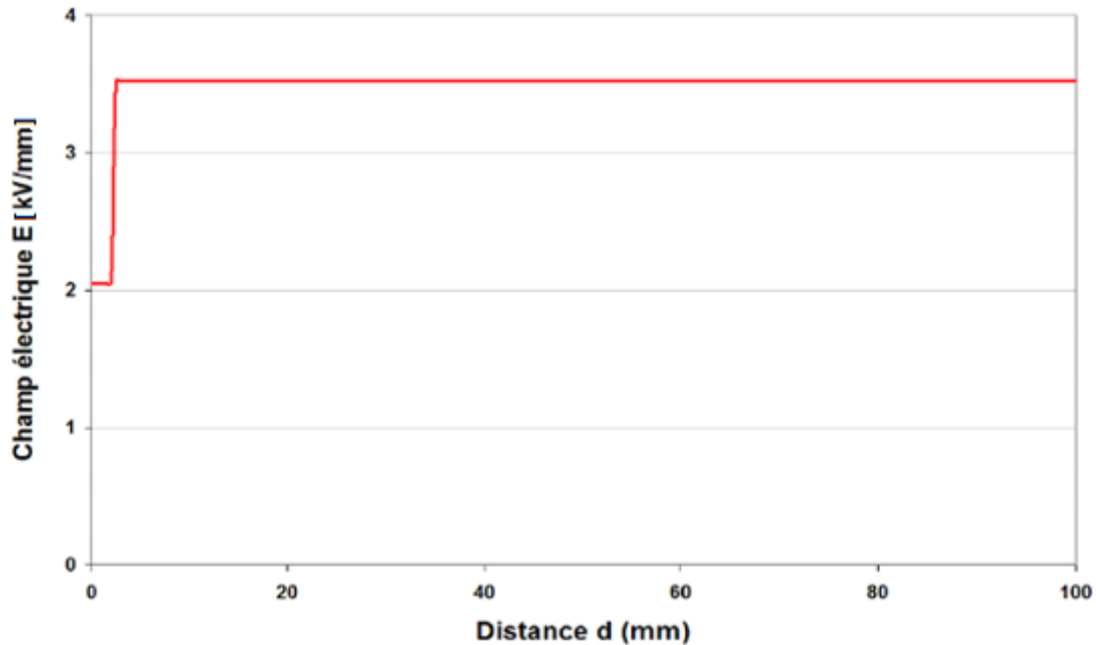


Figure II.5: Champ électrique uniforme dans l'huile.

D'après la figure (II.5), on observe que le champ électrique E dans le carton est plus faible, en raison du rapport de permittivité entre le carton et l'huile, qui est d'environ 0,6 selon la relation suivante :

$$\frac{Eh}{Ec} = \frac{\epsilon h}{\epsilon c} = 0,6 \quad (\text{II.4})$$

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

$$E_{adm} = A \cdot d^{-0,37} = 14,5 \times 98^{-0,37} = 2,66 \text{ [kV/mm]} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

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

d = 98 mm (distance dans l'huile c.-à-d., distance entre les électrodes « 100 mm », déduite des « 2 mm » d'épaisseur du carton).

Selon la méthode de Weidmann, on constate que la valeur moyenne du champ électrique dans l'huile ($E_{moy} = 3,5 \text{ kV/mm}$) dépasse largement la valeur admissible déterminée par cette méthode ($E_{adm} = 2,65 \text{ kV/mm}$). On définit alors la « *marge de sécurité* » comme étant le rapport entre E_{adm} sur E_{moy} . Dans cet exemple, elle est négative de -32 %, ce qui rend cette configuration inacceptable. Voir figure (II.6).

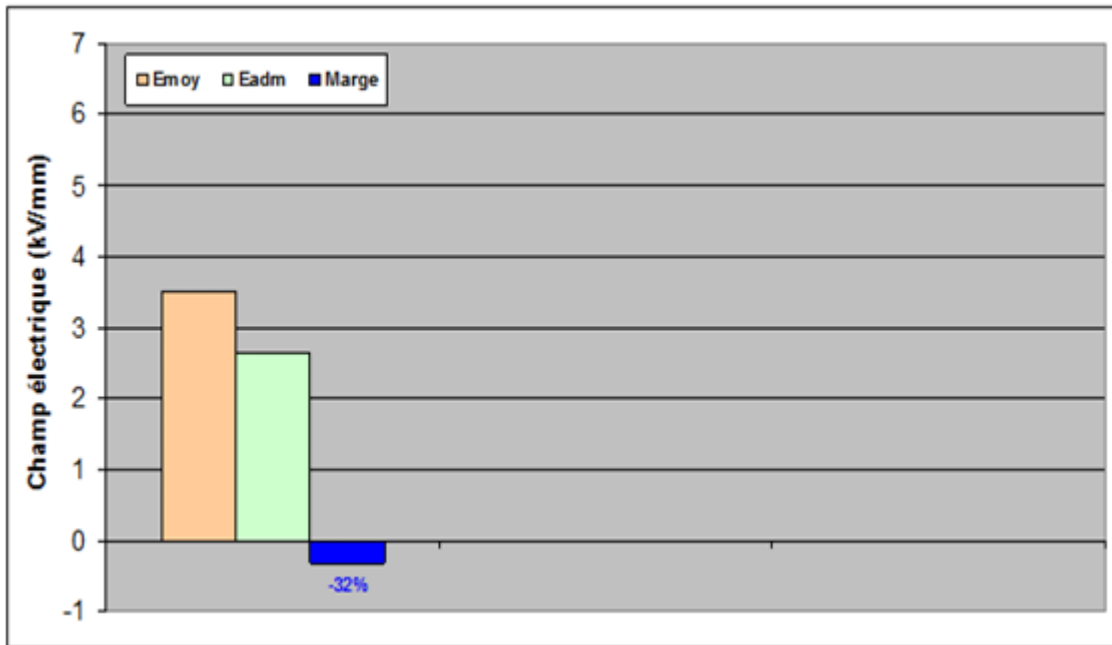


Figure II.6: Comparaison entre la valeur moyenne et la valeur admissible du champ électrique dans l'huile (configuration avec $A=14,5$).

Pour remédier à cette situation, il convient de subdiviser le volume d'huile de manière à maintenir la valeur moyenne du champ électrique dans l'huile nettement inférieure à la valeur admissible déterminée selon la méthode de Weidmann. Pour ce faire, deux barrières en carton sont insérées dans le volume d'huile, ce qui permet de le diviser en trois canaux distincts (voir figure II.7).

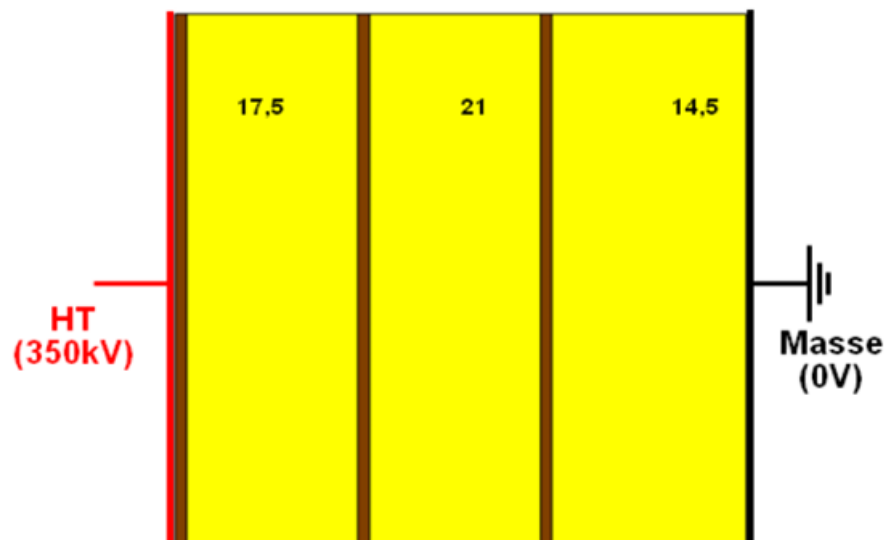


Figure II.7: Subdivision du volume d'huile en 03 canaux à l'aide des barrières isolantes carton.

En fonction de la géométrie propre à chaque canal, on procédera ensuite au calcul du champ électrique admissible, en s'appuyant sur les données fournies dans le tableau II.2. On obtient ainsi les marges de sécurité suivantes indiquées dans la figure II.8 :

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

Tableau II.2: Données pour le calcul du champ électrique dans les trois canaux d'huile.

Huile coté	Placement	Coefficient « A »	Valeur admissible du champ électrique	Numéro de configuration
HT	se trouve entre électrode isolée et une barrière carton	17,5	$E_{adm}=17,5 d^{-0.37}$	N°2
au milieu	se trouve entre deux barrières carton.	21	$E_{adm}=21 d^{-0.37}$	N°1
Masse	se trouve entre une barrière carton et une électrode nue (la masse).	14,5	$E_{adm}=14.5 d^{-0.37}$	N°3

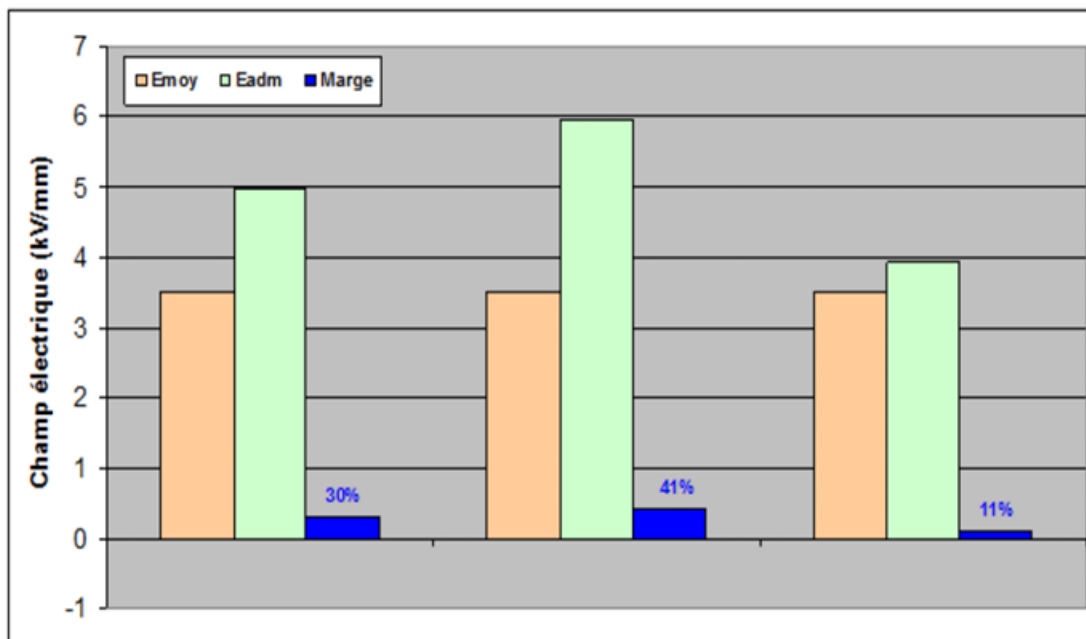


Figure II.8: Marges positives dans les trois canaux d'huile.

On observe que plus la distance dans l'huile est faible, plus elle peut supporter un champ électrique plus élevé. À l'inverse, lorsque cette distance augmente, la capacité de l'huile à supporter le champ électrique diminue.

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 indiqué sur la figure (II.9).

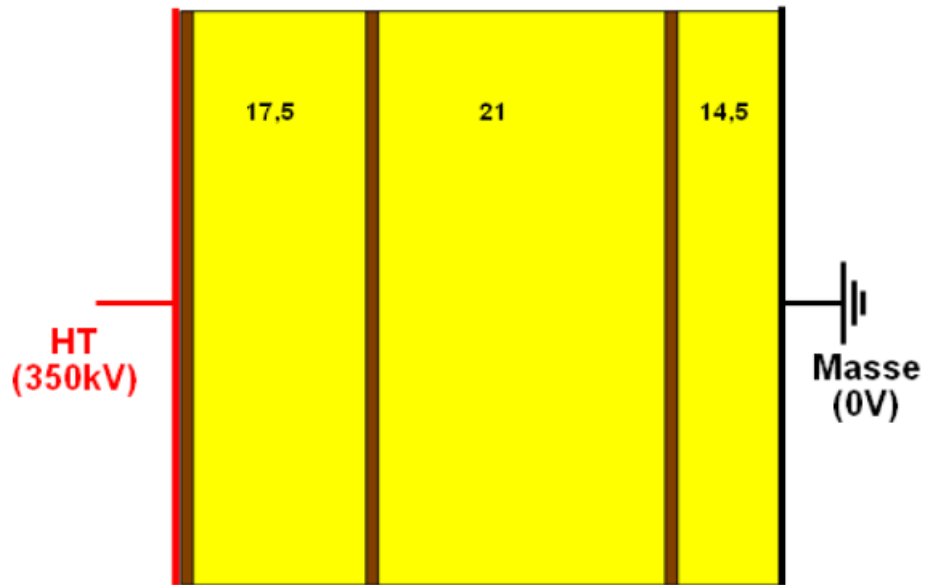


Figure II.9: Modification de l'emplacement des barrières carton.

Ainsi, la répartition des contraintes électriques entre les trois canaux d'huile est optimisée, chacun étant soumis à une contrainte électrique plus équilibrée. Tous bénéficient alors d'une marge de sécurité uniforme d'environ 30 %, comme l'illustre la figure II.10.

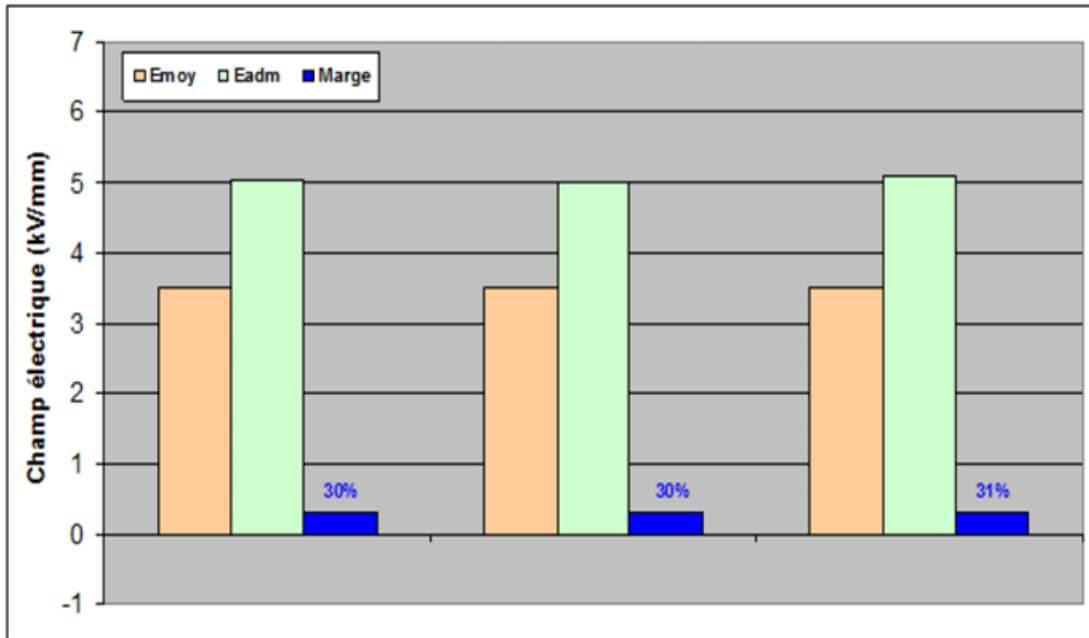


Figure II.10: Optimisation des marges de sécurité sur les trois canaux d'huile.

II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé la méthode de « Weidmann » sélectionnée pour notre travail. Pour faciliter la compréhension, un exemple simple a été fourni pour illustrer l'impact de la distance dans les divers espaces d'huile sur les valeurs du champ électrique. On utilisera cette approche dans l'analyse de notre modèle dans le dernier chapitre.

CHAPITRE III

Présentation des configurations étudiées

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les six cas de simulation examinés dans le cadre de notre étude. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel de simulation par éléments finis « Flux 2D » afin de calculer le champ électrique.

III.2 Configurations étudiées :

III.2.1 Premier cas :

La géométrie du modèle étudié est illustrée dans la figure (III.1). Ce modèle reproduit une expérimentation réelle menée par la société Weidmann, visant à démontrer une méthode d'analyse applicable à des configurations où le champ électrique est non uniforme [22]. L'expérience consiste à placer deux cylindres de diamètres différents l'un à l'intérieur de l'autre. Le cylindre extérieur (ϕ 600mm) est mis à la terre, tandis que le cylindre intérieur, de plus petit diamètre (représentant un câble), est soumis à une tension élevée de 100 kV. L'ensemble est immergé dans une cuve d'essai remplie d'huile isolante.

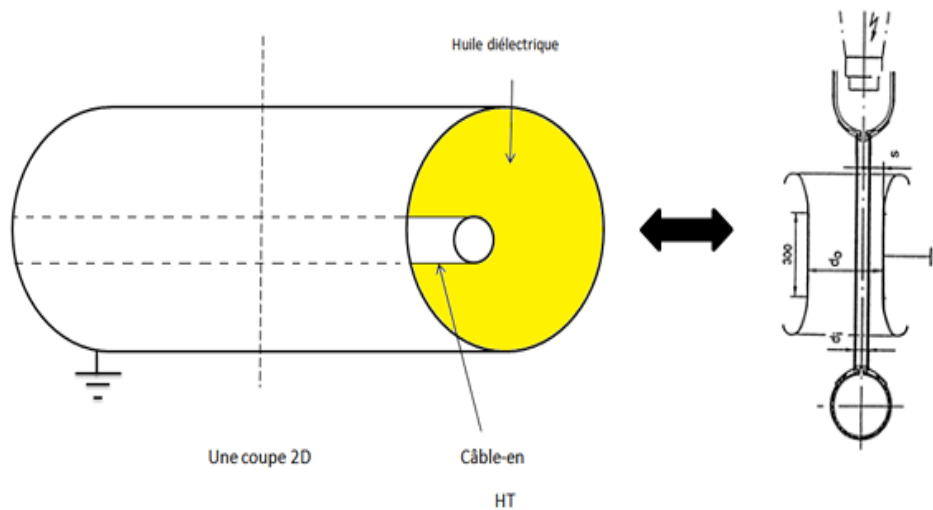


Figure III.1 : Présentation du modèle étudié - Cas 1 - [19].

Une coupe 2D dans ce dispositif permet d'obtenir la vue en coupe indiquée dans la figure III.2. Le résultat obtenu se présente sous la forme de deux cercles concentriques, séparés par une distance constante de 72 mm. Dans le cadre de notre étude, nous considérerons deux cas, en variant le diamètre du câble (ϕ 20mm et ϕ 80mm). Comme le montre la figure III.2, la forme obtenue est celle de deux cercles, le diamètre du cercle extérieur 600mm (représentant le tube) reste fixe dans les deux cas, tandis que celui du cercle intérieur (représentant le câble) varie, tout en maintenant une distance constante de 72mm entre les deux cercles.

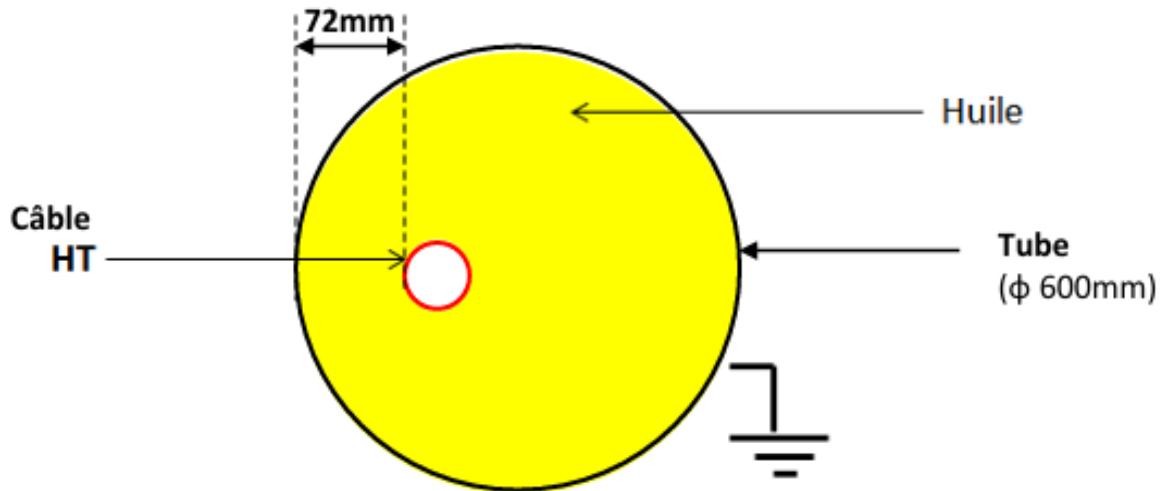


Figure III.2 : Coupe 2D du modèle étudié - Cas 1 -.

III.2.2 Deuxième cas :

La configuration du deuxième cas étudié dans notre travail est presque similaire à celle de la configuration précédente (cas 1) sauf que les deux cercles (tube et câble) sont ici parfaitement concentriques et alignées par rapport à un axe de symétrie commun pour les deux cercles comme le montre la figure III.3.

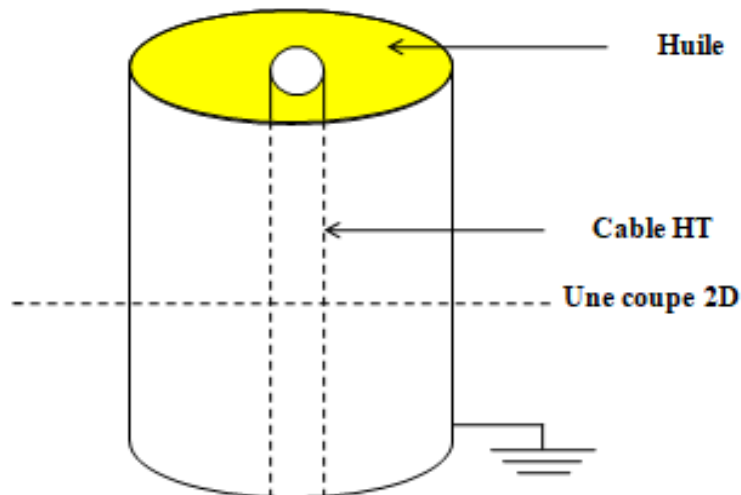


Figure III.3 : Présentation de deuxième cas étudié - Cas 2 -.

Une coupe 2D de cette configuration est présentée dans la figure III.4. Elle se présente sous la forme de deux cercles, l'un à l'intérieur de l'autre et ayant le même centre. Comme pour le cas

précédent, nous prenons deux diamètres de câble différents (ϕ 20mm et ϕ 80mm). Ainsi la distance radiale entre le câble et le tube est soit égale à 290mm (pour le câble ϕ 20mm), soit égale à 260mm (pour le câble ϕ 80mm) comme illustrée dans la figure suivante (III-4).

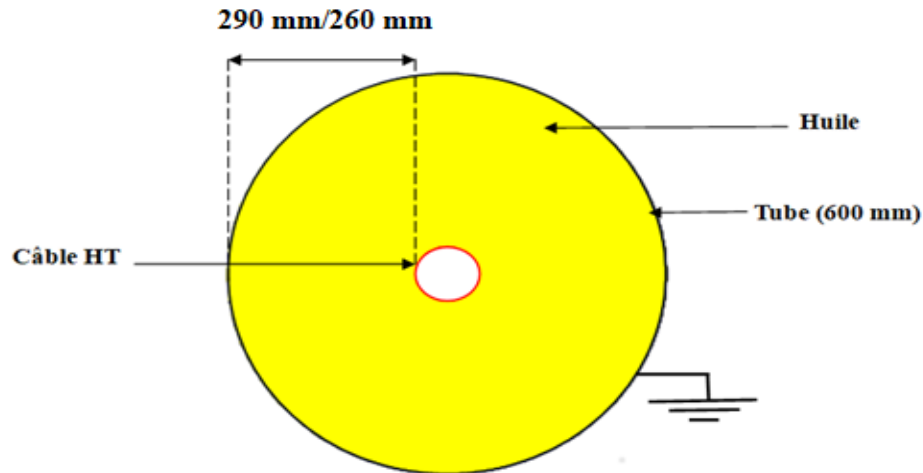


Figure III.4 : Coupe 2D du modèle étudié dans le cas 2.

III.2.3 Troisième cas :

Dans ce troisième cas, on prend la même configuration précédente du cas 2 et on réalise une coupe verticale selon l'axe central des deux cylindres formés par le tube et le câble (figure III-5). La géométrie ainsi obtenue se présente sous forme de deux rectangles placés symétriquement par rapport à l'axe centrale. On prend ensuite une demi-vue de cette géométrie pour obtenir une coupe dite « axisymétrique » comme le montre la figure III-6.

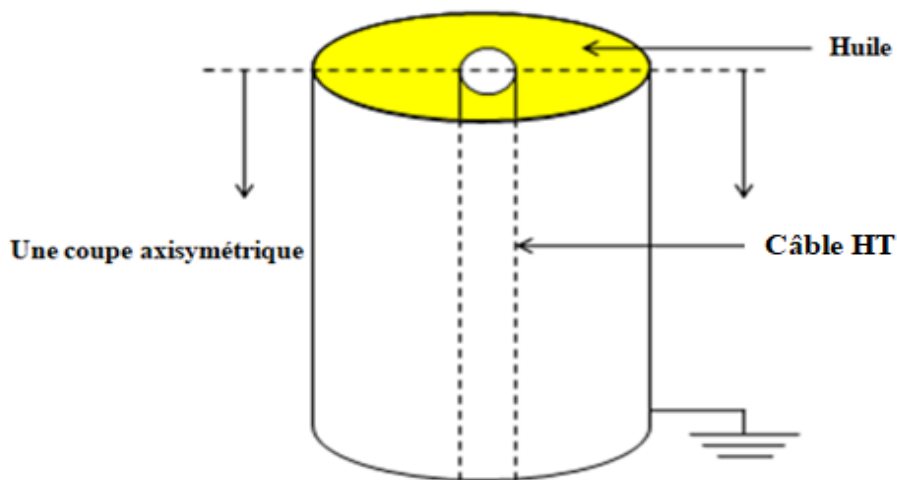


Figure III.5 : Présentation de deuxième cas étudié - Cas 3 - (coupe axisymétrique).

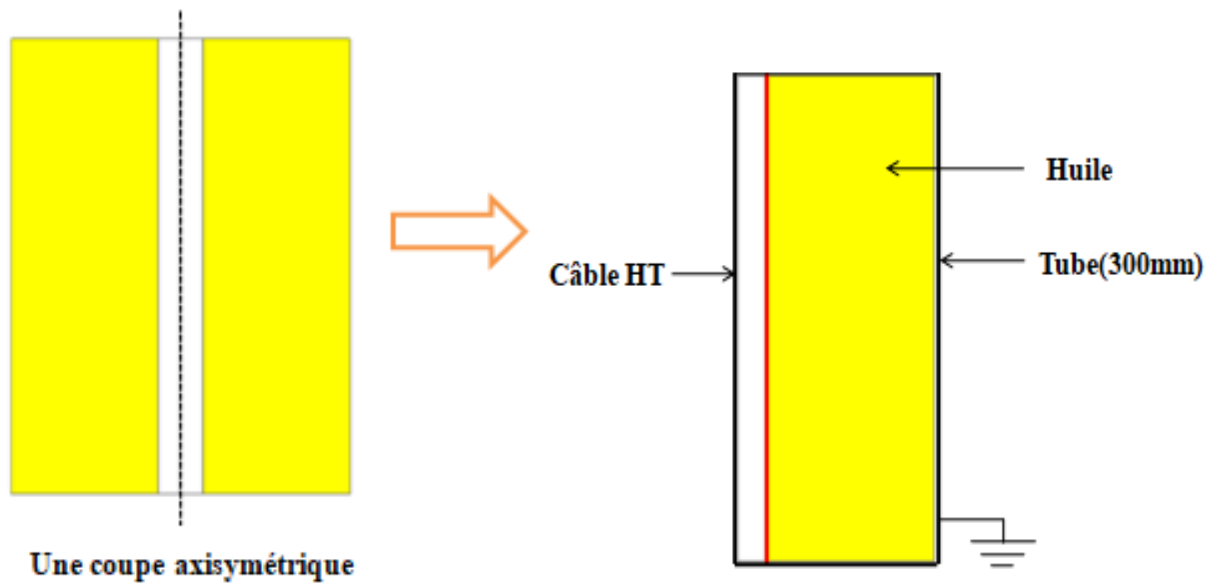


Figure III.6 : Coupe axisymétrique du modèle étudié dans le cas 3.

III.3 Présentation du logiciel FLUX 2D :

Flux 2D est un logiciel de simulation par éléments finis spécialisé dans l'analyse des phénomènes électromagnétiques, électrothermiques et électromécaniques. Il permet de modéliser avec précision des dispositifs tels que les moteurs électriques, les transformateurs, les capteurs, les bobines ou encore les actionneurs.

Grâce à une interface intuitive et des outils de simulation puissants en 2D, 3D et axisymétrique, Flux offre aux ingénieurs et chercheurs la possibilité de concevoir, tester et optimiser leurs systèmes sans recourir systématiquement aux prototypes physiques.

Il est largement utilisé dans les secteurs de l'énergie, de l'automobile, de l'aéronautique, et dans les milieux académiques pour son efficacité, sa fiabilité et ses capacités de couplage multi physique.

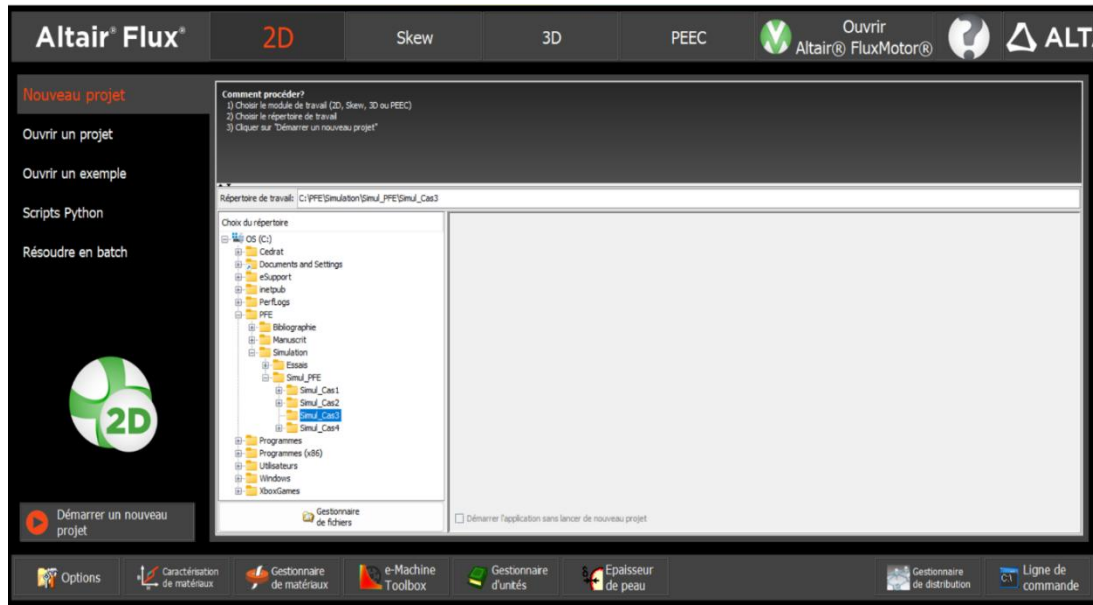


Figure III.7 : Fenêtre principale du logiciel flux-2D.

Les différentes étapes du processus de modélisation :

- Définir la géométrie.
- les propriétés matériaux.
- Le maillage.
- les physiques.
- Résoudre et afficher les résultats.

III.4 Les étapes de calcul du champ électrique sous Flux 2D:

III.4.1 Choix du modèle d'étude :

Le problème présenté dans notre exemple a été résolu en utilisant un modèle électrostatique, afin de calculer le champ électrique dans différents cas.

III.4.2 Géométrie :

La première chose à faire une fois le programme est ouvert, est de dessiner la géométrie de notre système ; pour les trois cas.

III.4.2.1 Premier cas :

La géométrie est 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 600mm . Deux cas ont été considérés en suite :

Cas1-20: Le diamètre du câble est égal à 20mm.

Cas1-80: Le diamètre du câble est égal à 80mm.

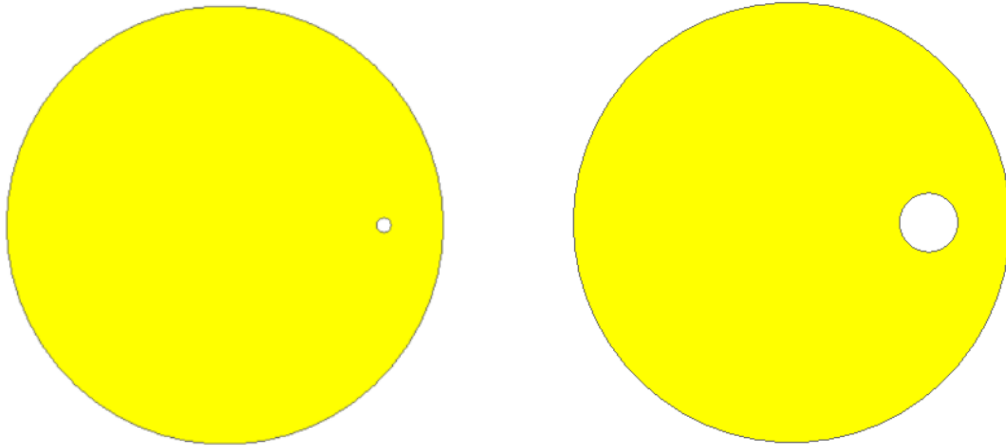


Figure III.8 : Géométrie du modèle en 2D pour le cas1 (φ 20- φ 80).

III.4.2.2 Deuxième cas :

Composé de deux cercles concentriques. Le tube possède un diamètre inchangé d'une valeur de 600mm. Deux cas ont été considérés en suite :

Cas2-20: Le diamètre du câble est égal à 20mm.

Cas2-80: Le diamètre du câble est égal à 80mm.

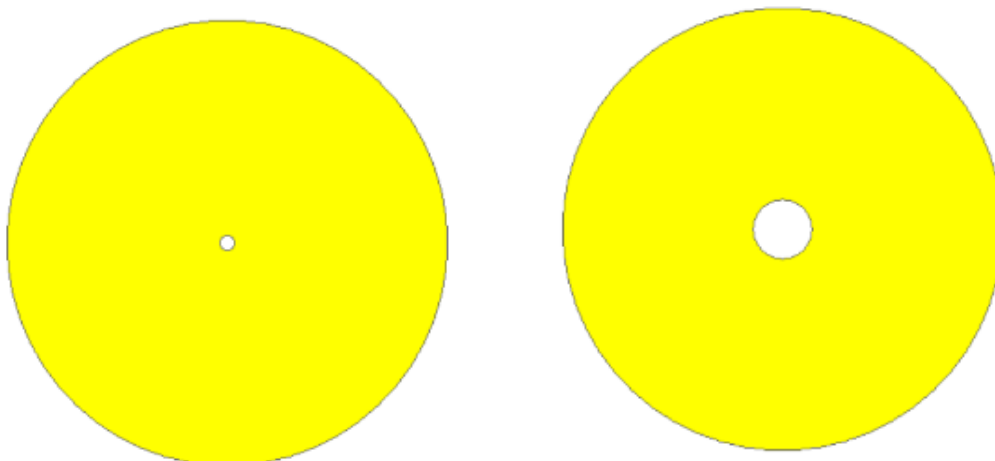


Figure III.9: Géométrie du modèle en 2D pour le cas2 (φ 20- φ 80).

III.4.2.3 Troisième cas :

C'est la même chose que le deuxième cas mais sur ce cas avec un modèle axisymétrique.

Deux cas ont été considérés en suite :

Cas3-20: Le diamètre du câble est égal à 20mm.

Cas3-80: Le diamètre du câble est égal à 80mm.

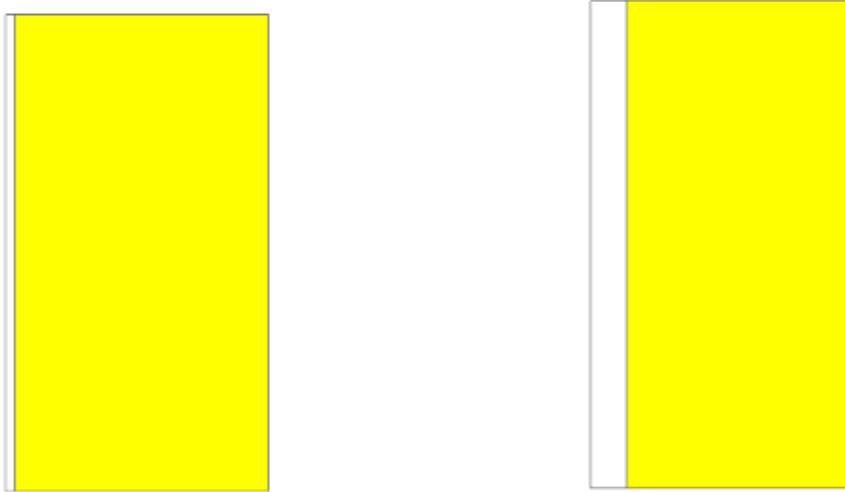


Figure III.10 : Géométrie du modèle en axisymétrique pour le cas3 (ϕ 20- ϕ 80).

III.4.3 Modélisation de la physique :

Cette étape consiste à introduire les matériaux utilisés dans la simulation ainsi que leurs propriétés physiques. Il est nécessaire de choisir le paramètre physique pour préciser la valeur de permittivité relative ϵ_r de l'huile diélectrique qui est égale à $\epsilon_r = 2,2$.

Dans cette partie, on affecte les potentiels électriques aux différentes lignes constituant la géométrie du modèle. Ainsi, un potentiel de 100kV est affecté aux cercles (ou lignes pour le cas 3) représentant le câble HT. De même, un potentiel de 0V est affecté aux cercles (ou lignes pour le cas 3) représentant le tube qui est mis ainsi à la masse.

III.4.4 Choix du maillage :

Le maillage permet de diviser le domaine d'étude en un certain nombre de nœuds ou les valeurs des différentes grandeurs électriques (V, E,...) seront calculées.

Dans le logiciel Flux-2D, il est possible de générer un maillage automatique en cliquant sur le bouton dédié au maillage du domaine. Le logiciel se charge alors de cette opération sans

intervention manuelle. Dans notre cas, on a utilisé un maillage manuellement adapté aux besoins de calcul de chaque cas.

III.4.4.1 Les effets de maillage :

Afin de vérifier l'effet du maillage sur la précision des résultats de calculs, nous avons réalisé un essai avec trois types de maillage différents ; fin, moyen et grossier.

La différence entre ces trois maillages est illustrée dans la figure III- 11.

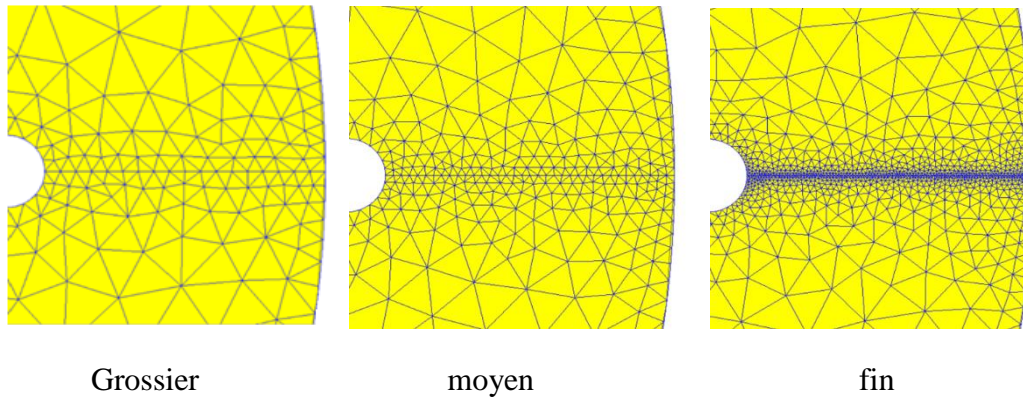


Figure III.11: Différence entre les trois maillages testés.

Les résultats de simulations ont montré que le maillage fin donne une meilleure précision dans les calculs. C'est donc ce maillage fin qui a été utilisé pour les six configurations étudiées.

III.4.4.2 Maillage du premier cas :

Les figures suivantes montrent le maillage fin utilisé dans cette configuration pour les deux câbles de diamètre 20mm et 80mm.

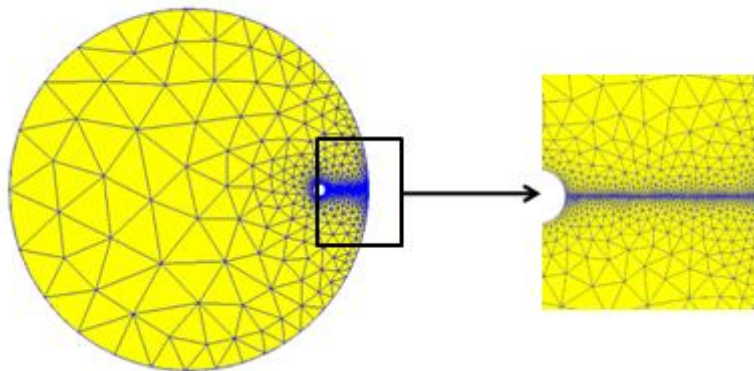


Figure III.12: Vue sur le maillage global avec un zoom de la partie encadrée cas1- ϕ 20.

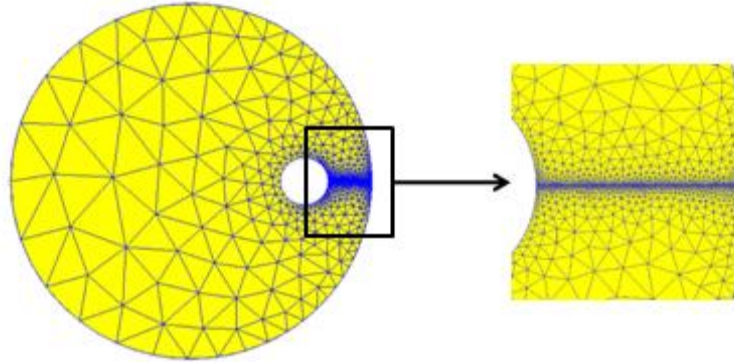


Figure III.13: Vue sur le maillage global avec un zoom de la partie encadrée cas1- ϕ 80.

III.4.4.3 Maillage du deuxième cas :

Les figures suivantes montrent le maillage fin utilisé dans cette configuration pour les deux câbles de diamètre 20mm et 80mm.

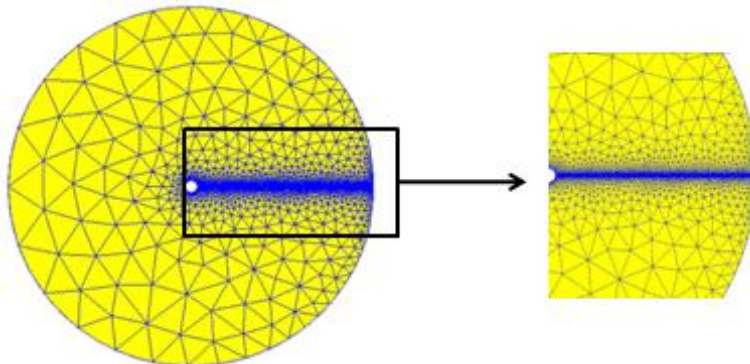


Figure III.14: Vue sur le maillage global avec un zoom de la partie encadrée cas 2- ϕ 20.

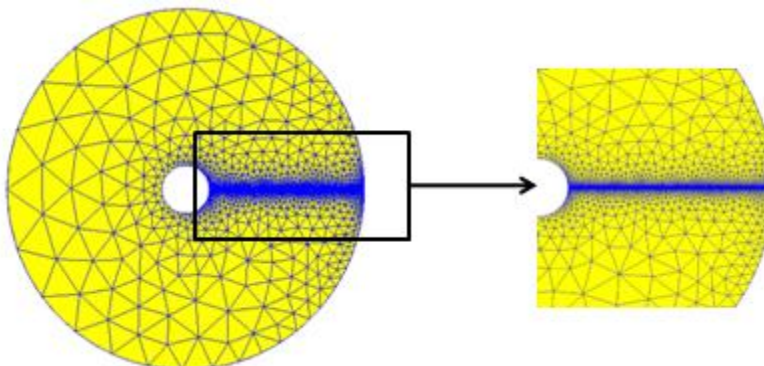


Figure III.15: Vue sur le maillage global avec un zoom de la partie encadrée cas 2- ϕ 80.

III.4.4.4 Maillage du troisième cas :

Les figures suivantes montrent le maillage fin utilisé dans cette configuration pour les deux câbles de diamètre 20mm et 80mm.

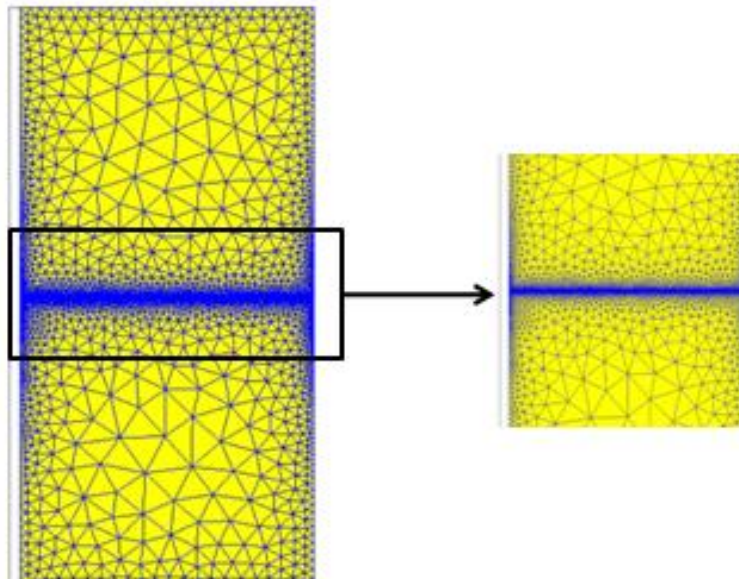


Figure III.16: Vue sur le maillage global avec un zoom de la partie encadrée cas 3- ϕ 20.

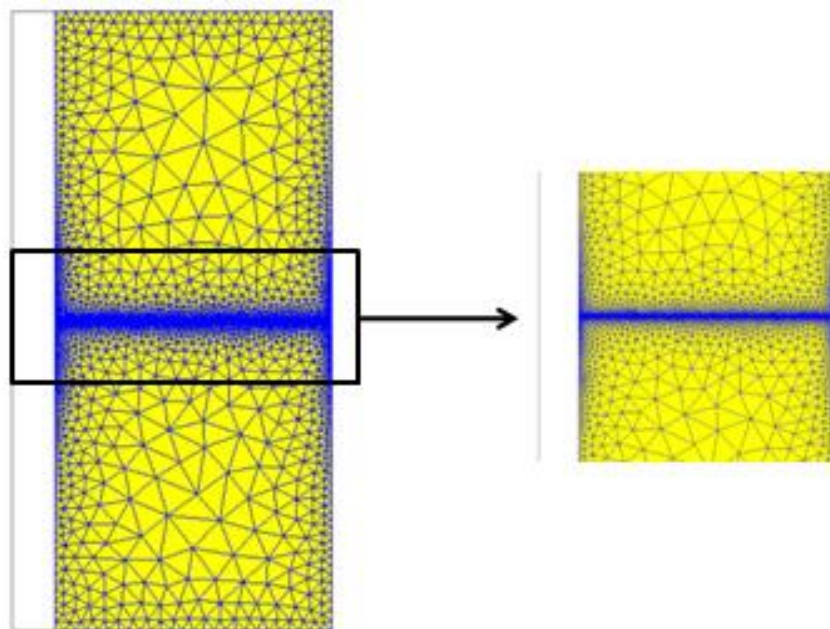


Figure III.17: Vue sur le maillage global avec un zoom de la partie encadrée cas 3- ϕ 80.

III.4.5 Résolution du problème :

Une fois le problème entièrement défini, il ne reste plus qu'à le résoudre. Cette étape intervient immédiatement après le maillage et permet de choisir le paramètre physique qu'on souhaite calculer.

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes étapes de la simulation effectuée à l'aide du logiciel « FLUX-2D » dans le but de calculer le champ électrique entre le tube et le câble. Les résultats obtenus ainsi que les calculs seront détaillés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV







Analyse de l'étude de simulation

IV.1 Introduction :

L'objectif de ce chapitre est d'analyser et de comparer les résultats des simulations des six configurations étudiées dans notre travail. Pour chaque configuration nous donnerons la répartition des lignes équipotentiels ainsi que le dégradé du champ électrique. Nous tracerons également différentes courbes pour calculer les contraintes électriques dans l'huile selon la méthode de Weidmann décrite précédemment dans le deuxième chapitre.

Un résumé des différents paramètres ainsi que les détails de chaque configuration est donné le tableau suivant :

Tableau IV.1:Détails des configurations étudiées.

	Cas étudiés	Φ Tube (mm)	Φ Câble (mm)	Distance HT-Masse (mm)	Coupe : 2D/Axisymétrique	Aperçu
1	Cas1- Φ 20	600	20	72	2D	
2	Cas1- Φ 80	600	80	72	2D	
3	Cas2- Φ 20	600	20	290	2D	
4	Cas2- Φ 80	600	80	260	2D	
5	Cas3- Φ 20	600	20	290	Axisymétrique	
6	Cas3- Φ 80	600	80	260	Axisymétrique	

IV.2 Distribution des équipotentiels et dégradé du champ électrique :

Nous observons à travers les figures suivantes une forte concentration des lignes équipotentiels dans les zones où les contraintes électriques sont les plus élevées. Cette concentration se traduit par une intensification du champ électrique autour du câble HT. Les lignes équipotentiels sont serrées et rapprochées autour du câble HT et plus espacées près du tube (la masse). Ceci indique que le champ électrique est non uniforme entre la HT et la masse.

Flux2D permet également de visualiser l'intensité du champ électrique à travers une variation de couleurs. Les couleurs « chaudes » indiquent une zone avec un champ électrique élevé, les couleurs « froides » une zone avec un champ plus faible. Les figures suivantes illustrent bien les zones où règne un champ électrique intense autour du câble HT (100kV). On constate que le

champ est plus élevé autour du câble 20mm que dans le cas avec un câble 80mm à cause d'un « effet de pointe » dû au faible diamètre du câble 20mm par rapport à celui du 80mm.

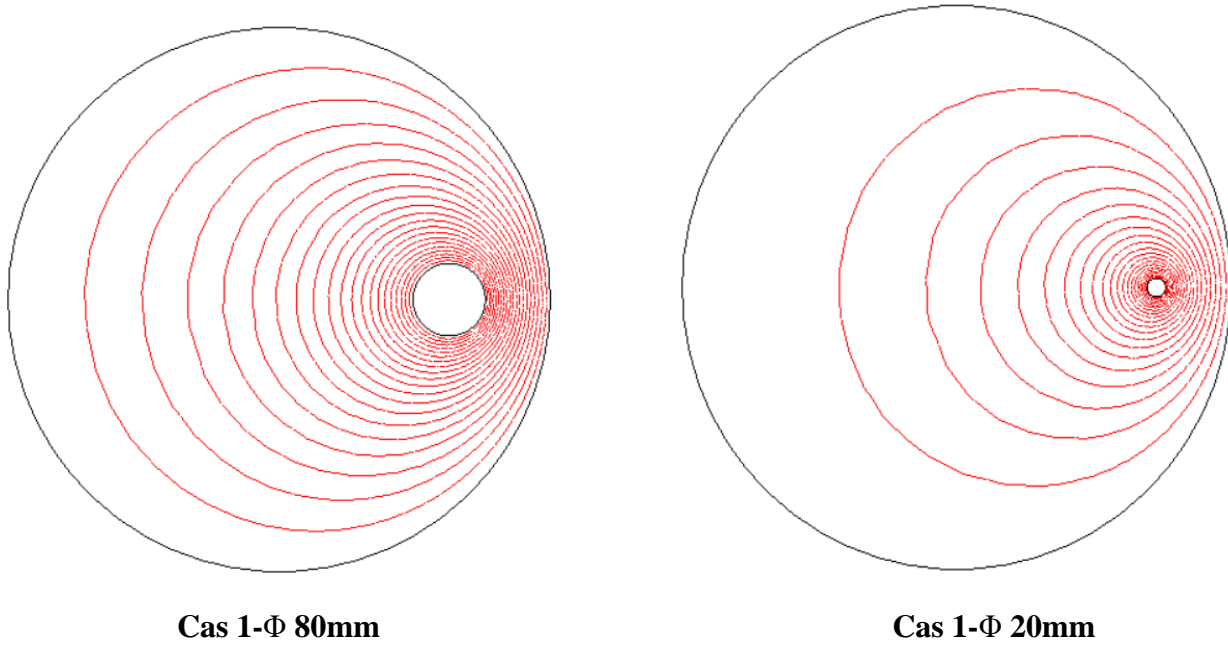


Figure IV.1: Répartition des équipotentielles pour les deux diamètres du câble HT (Cas1).

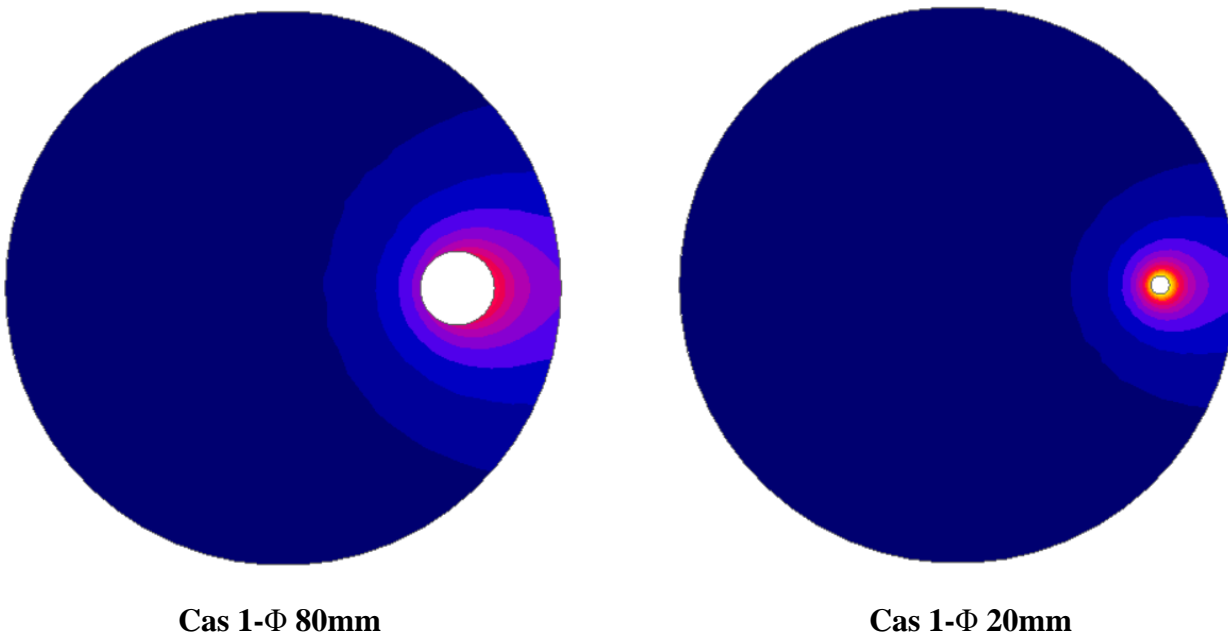


Figure IV.2: Dégradé du champ électrique les deux diamètres du câble HT (Cas1).

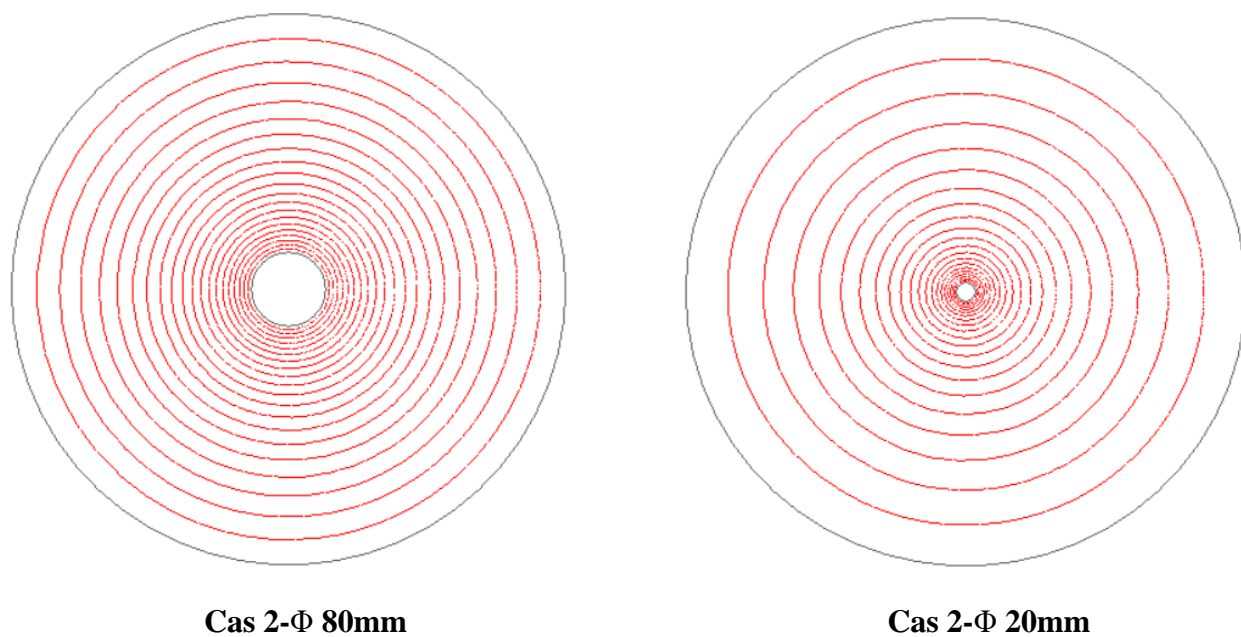


Figure IV.3: Répartition des équipotentielles pour les deux diamètres du câble HT (Cas2).

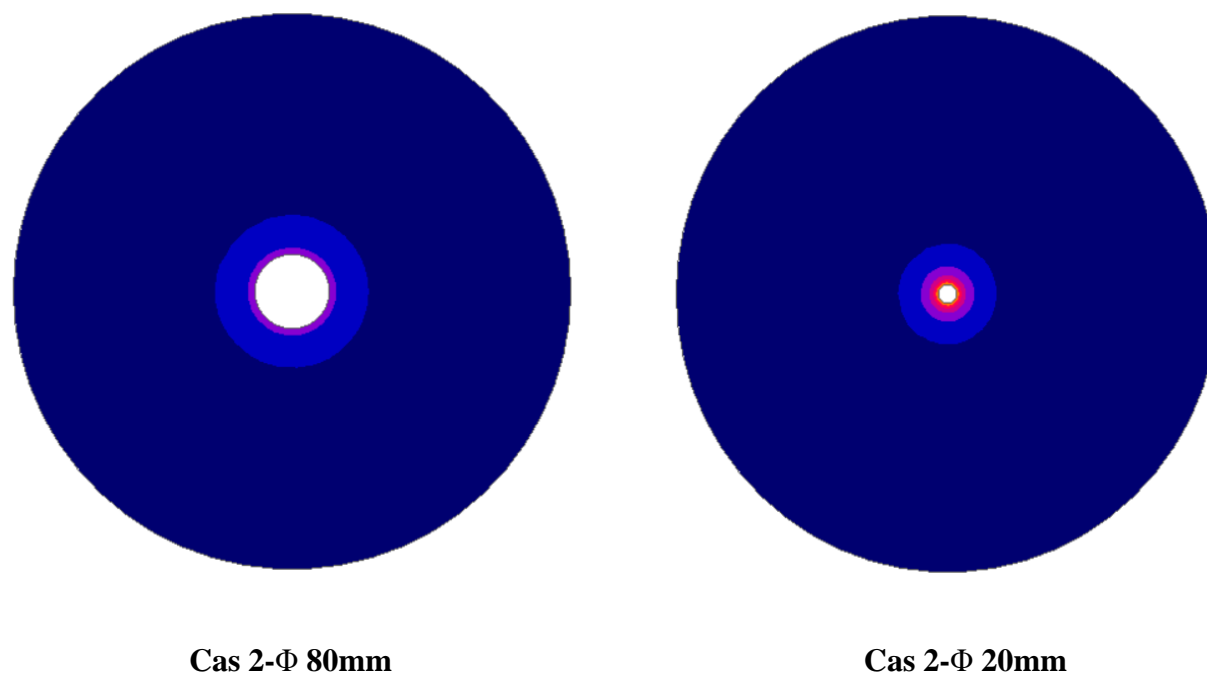
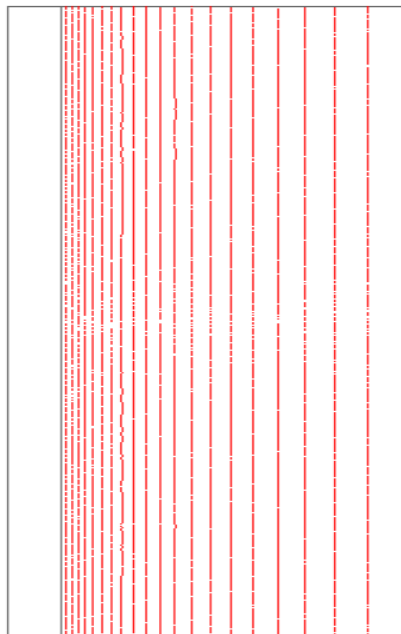
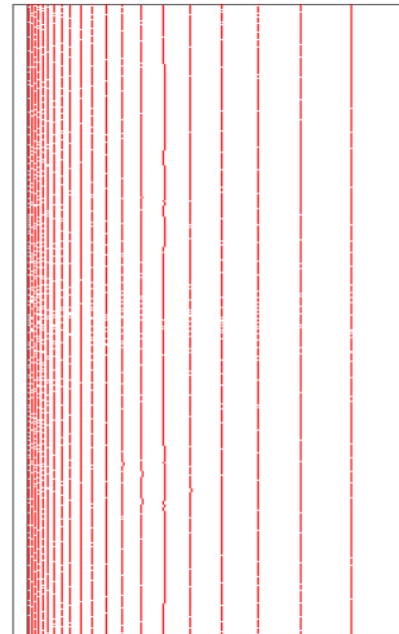


Figure IV.4: Dégradé du champ électrique les deux diamètres du câble HT (Cas2).

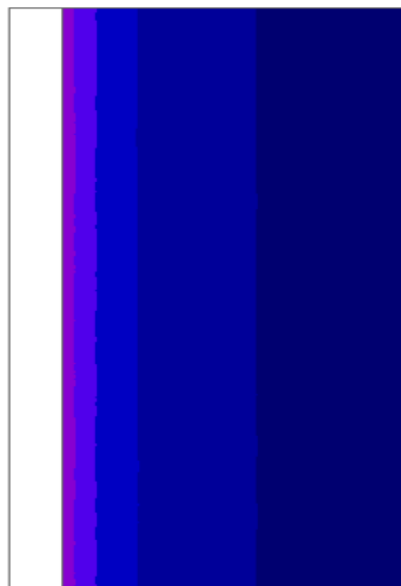


Cas 2- Φ 80

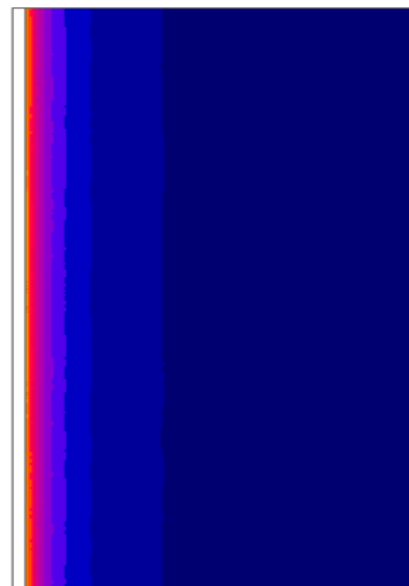


Cas 2- Φ 20

Figure IV.5: Répartition des équipotentiels pour les deux diamètres du câble HT (Cas3).



Cas 3- Φ 80



Cas 3- Φ 20

Figure IV.6: Dégradé du champ électrique les deux diamètres du câble HT (Cas3).

IV.3 Méthode d'analyse des résultats de simulation :

Pour calculer le champ électrique dans la zone qui nous intéresse, on trace dans Flux2Dun chemin (une ligne droite) entre le câble HT et le tube à la masse. Les figures suivantes montrent le chemin qui sera utilisé pour suivre la variation de champ électrique entre le câble HT et le tube et ce pour les deux diamètres du câble étudiées (Φ 80mm et Φ 20mm).

- **Premier cas:**

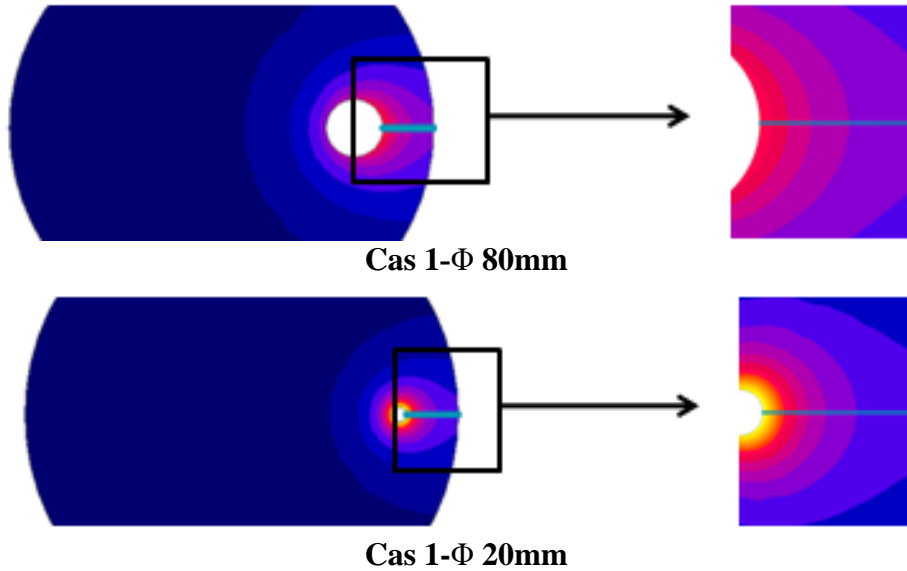


Figure IV.7: Chemins utilisés pour le calcul des contraintes électriques dans l'huile (cas1).

- **Deuxième cas:**

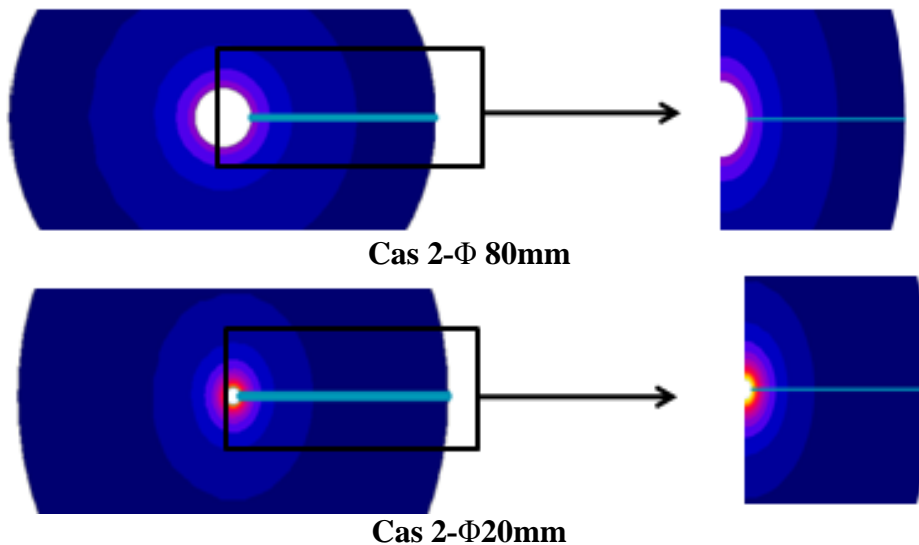


Figure IV.8: Chemins utilisés pour le calcul des contraintes électriques dans l'huile (cas2).

- Troisième cas:

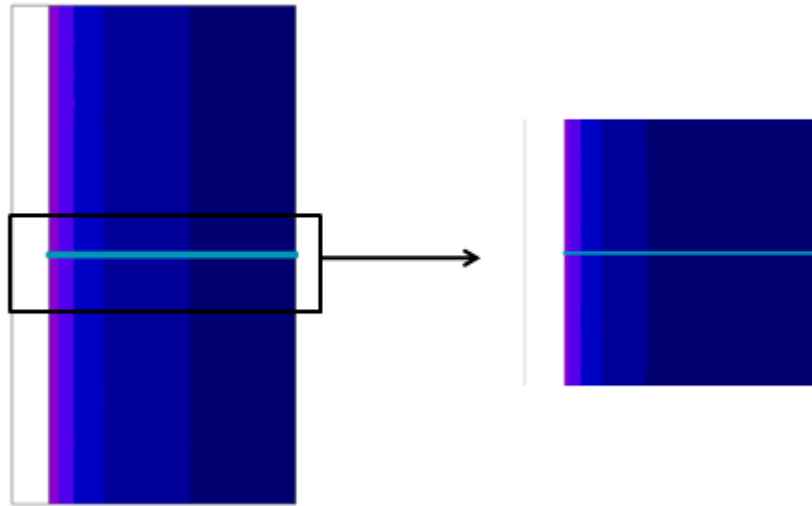
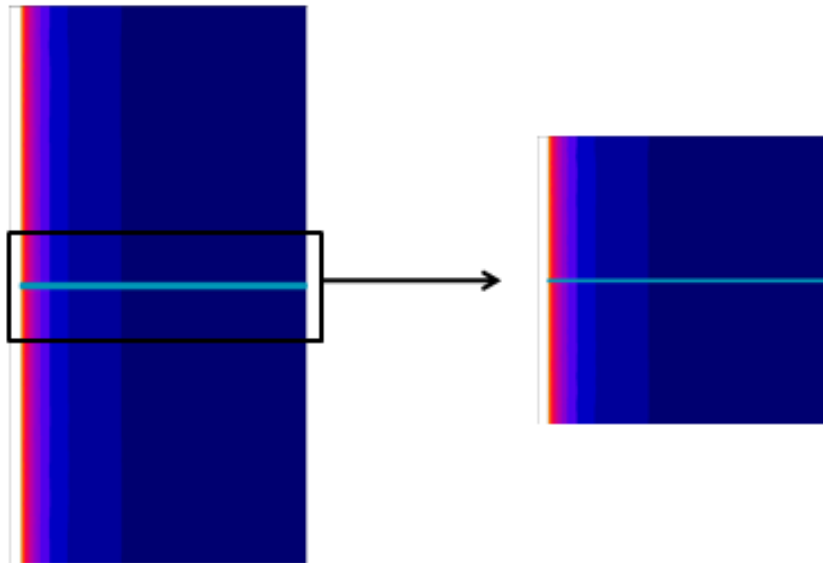
Cas 3- Φ 80mmCas 3- Φ 20mm

Figure IV.9: Chemins utilisés pour le calcul des contraintes électriques dans l'huile (cas3).

IV.4 Effet du maillage

Dans le chapitre 3, nous avons présenté trois types de maillage qui diffèrent selon leur niveau de finesse et largeur de mailles. Afin de vérifier un éventuel effet du maillage sur la précision des calculs, on a pris l'exemple de la configuration cas1- Φ 20mm que l'on a maillé avec les trois types de maillage ; grossier, moyen et fin.

La figure IV.10 présente les dégradés de champ électrique pour chacun des trois maillages. Bien que cela ne soit pas très « flagrant » mais on arrive comme même à remarquer que plus le maillage est fin (taille de la maille plus petite) plus le contour des couleurs devient plus régulier. Ceci se traduit par des limites plus précises entre les différentes zones de couleurs synonymes de frontières plus marquées entre les variations du champ électrique.

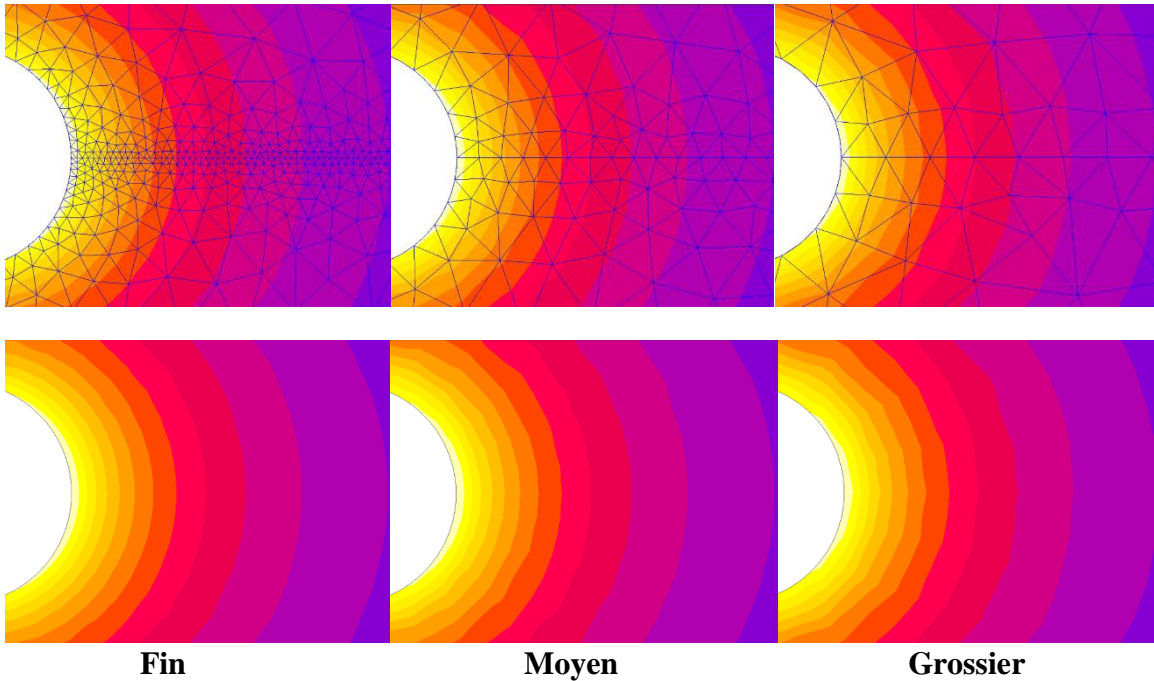


Figure IV.10: Effet du maillage sur le dégradé de champ électrique (cas1- Φ 20mm).

Par ailleurs, en traçant la variation du champ électrique dans l'huile entre le câble et le tube pour les trois maillages, on remarque que les trois courbes se superposent bien hormis quelques écarts non significatifs relevé dans les premiers millimètres.

En conclusion, on n'a pas relevé un effet notable entre les trois maillages bien que le maillage fin donne des résultats légèrement plus meilleurs. C'est donc ce maillage fin qui a été appliqué à toutes les six configurations étudiées dans notre travail.

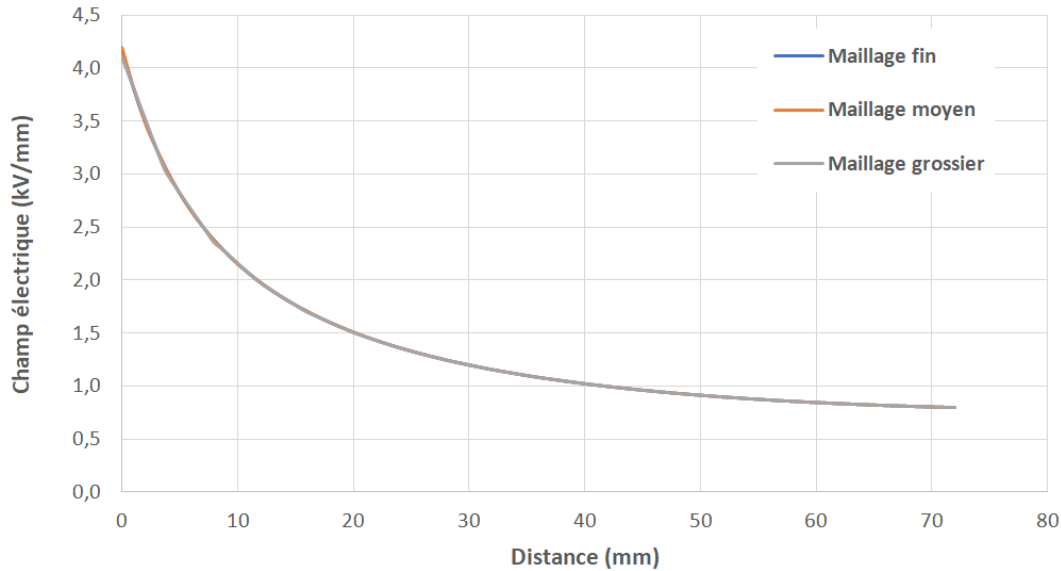


Figure IV.11: l'effet des maillages en trois (cas1- Φ 20).

IV.5 Comparaison entre coupe 2D et coupe axisymétrique

Le dispositif étudié dans le cas 2 et le cas 3 consiste à un tube rempli d'huile dans lequel on a placé un câble HT au centre. Pour modéliser une telle configuration, Flux2D offre deux possibilités en fonction de la géométrie considérée :

- Une géométrie 2D issue d'une coupe horizontale dans le dispositif et qui se présente sous la forme de deux cercles concentriques (le câble et le tube). C'est le Cas 2.
- Une géométrie issue d'une coupe verticale du dispositif dont on ne prendra que la demi vue appelée « axisymétrique » car symétrique par rapport à l'axe central du dispositif. C'est le cas 3.

En prenant l'exemple avec un câble diamètre 80mm, on a comparé la variation du champ électrique en fonction de la distance entre le câble et le tube pour les deux coupes 2D et axisymétrique (c'est-à-dire, on a comparé cas2- Φ 80mm et Cas3- Φ 80mm).

On remarque que les deux courbes se superposent parfaitement ce qui signifie que les deux types de coupes 2D ou axisymétrique mènent à des résultats identiques.

C'est la raison pour laquelle, on ne présentera par la suite que les résultats du Cas 2 afin d'éviter les redondances avec les résultats similaires du cas 3.

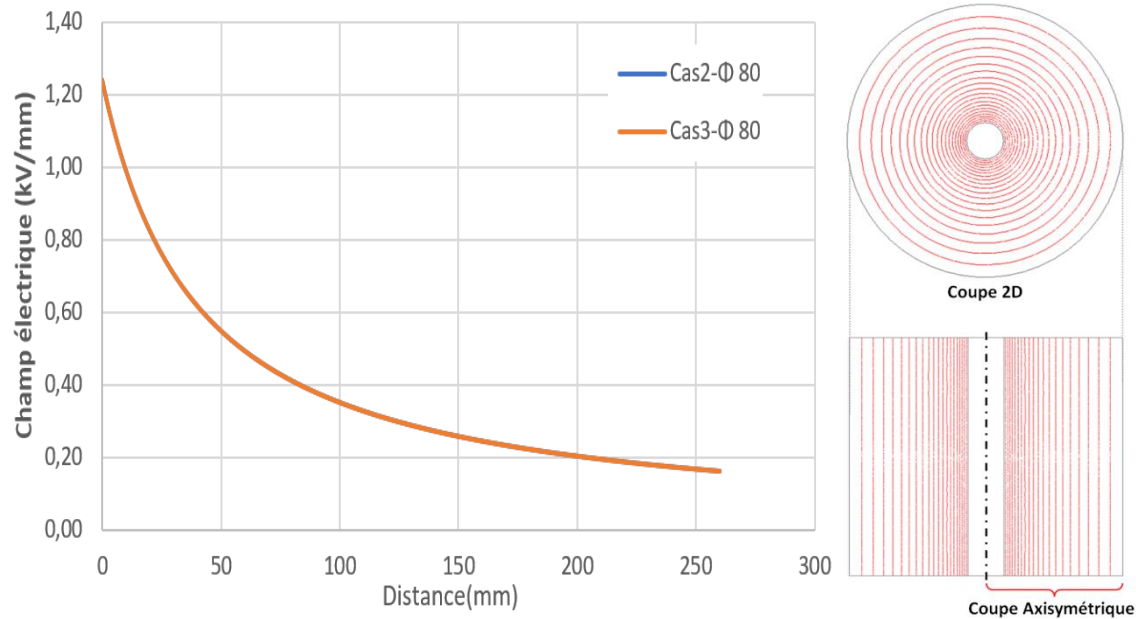


Figure IV.12: Comparaison entre 2D et axisymétrique (Φ 80mm).

IV.6 Méthode de calcul des contraintes électriques dans l'huile :

- **Premier cas :**

Dans cette configuration, la distance entre le câble HT et le tube (72mm) est la même pour les deux diamètres de câble 20 et 80mm. La figure IV.11 montre la variation du champ électrique le long de cette distance tel que indiqué précédemment dans la Figure IV.7. On observe que le champ diminue progressivement en allant du câble haute tension (HT) vers le tube ce qui indique un champ non uniforme. La valeur maximale du champ électrique est atteinte dans l'huile à la surface du câble. Cette valeur est plus élevée dans le cas 1- Φ 20, où le câble présente un diamètre plus réduit (20 mm) conduisant ainsi à un effet de pointe plus marqué.

Les valeurs maximales calculées pour les deux diamètres sont donc :

- Cas1- Φ 20 : $E_{max} = 4.18$ [kV/mm] pour le câble dont le diamètre est égal à 20mm.
- Cas1- Φ 80 : $E_{max} = 2.24$ [kV/mm] pour le câble dont le diamètre est égal à 80mm.

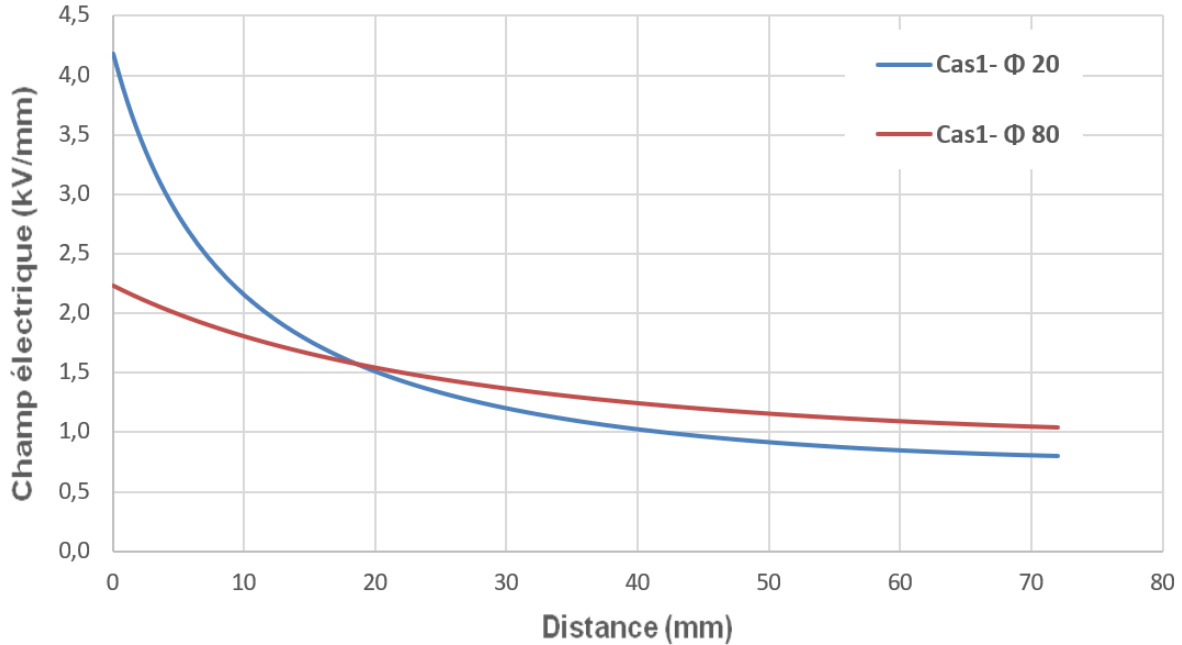


Figure IV.13: Variation du champ électrique dans l’huile en entre le câble HT et le tube (cas1).

Par ailleurs, on peut également calculer le champ moyen appliqué réellement à la distance de 72mm d’huile entre le câble HT et le tube avec la formule suivante :

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

Avec : d=72mm et V=100kV

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

En appliquant la méthode de Weidmann présentée dans le chapitre 2, on peut calculer la contrainte admissible que peut supporter une distance d’huile de 72 mm en procédant de la manière suivante :

On détermine la valeur du champ électrique admissible dans l’huile entre le câble et le tube :

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

Ici d=72mm donc $E_{adm} = 14.5 \cdot 72^{-0.37} = 2.98$ [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 » :

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

Ainsi, selon cette méthode d'analyse, la distance de 72mm d'huile entre le câble et le tube peut supporter un champ électrique allant jusqu'à 2,98 kV/mm. Étant donné que le champ moyen réel appliqué est plus faible (1,39 kV/mm), on peut conclure qu'il n'existe aucun risque car la marge de sécurité est de 2,14. C'est-à-dire, l'huile peut supporter un champ électrique 2,14 fois supérieur à celui effectivement appliqué.

Cette conclusion reste valable pour les deux cas étudiés ($\Phi 20\text{mm}$ et $\Phi 80\text{mm}$), indépendamment du diamètre du câble, bien que le champ électrique maximal diffère entre les deux configurations (voir Figure IV.4).

A noter que ces résultats sont cohérents et quasiment identiques avec ceux obtenus dans une précédente étude qui a modélisé la même configuration mais en utilisant un autre logiciel de simulation (Comsol) [21].

- **Deuxième cas :**

Dans cette configuration, la distance d'huile qui sépare le câble HT et le tube est différente selon le diamètre du câble considéré. Elle est égale à 290mm dans le cas du câble $\Phi 20\text{mm}$ et 260mm dans le cas du câble $\Phi 80\text{mm}$.

C'est la raison pour laquelle, on a décalé de 30mm la courbe de variation du champ électrique du cas avec un câble $\Phi 80\text{mm}$ (voir figure VI- 14). Ceci afin de pouvoir comparer la valeur du champ électrique à la même position dans l'huile.

Là aussi, le champ diminue progressivement du câble haut tension (HT) au tube, indiquant un champ divergeant dans les deux cas. La valeur maximale du champ électrique pour les deux cas :

- Cas2- $\Phi 20$: $E_{\text{max}} = 2.94$ [kV/mm] pour le câble dont le diamètre est égal à 20mm.
- Cas2- $\Phi 80$: $E_{\text{max}} = 1.24$ [kV/mm] pour le câble dont le diamètre est égal à 80mm.

A noter que bien que localement, le champ électrique est plus élevé à la surface du câble $\Phi 20\text{mm}$ (à cause de son faible diamètre) mais il reste cependant plus faible que celui du câble $\Phi 80\text{mm}$ sur le reste de la distance d'huile.

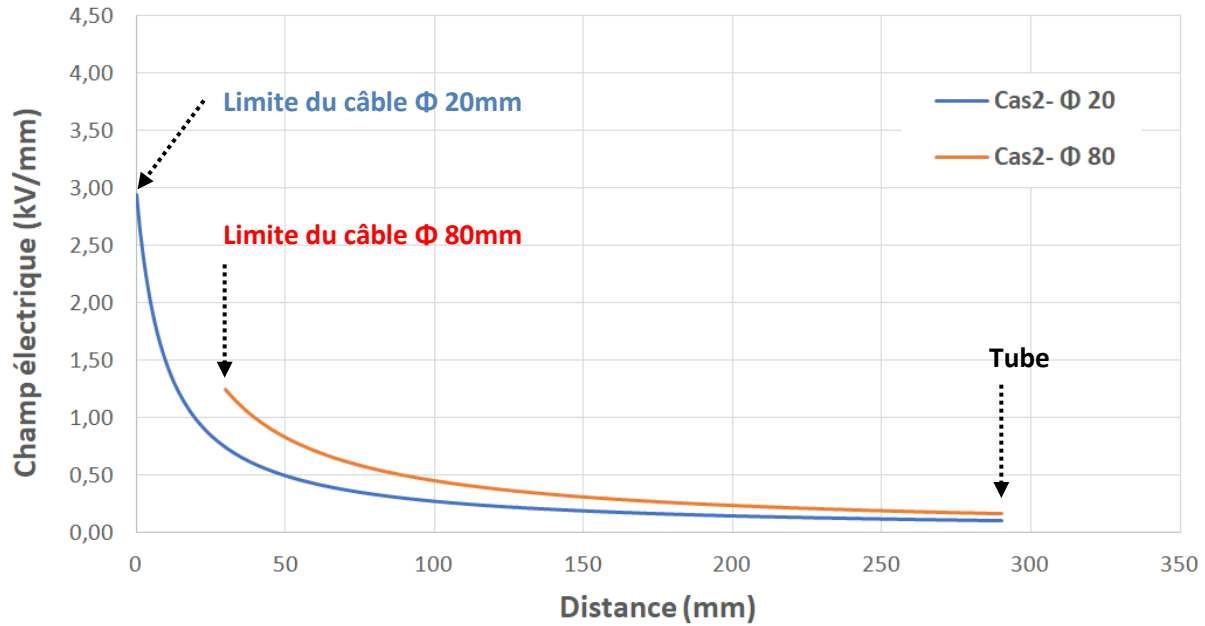


Figure IV.14: Variation du champ électrique dans l’huile entre le câble HT et le tube (cas2).

Le champ moyen est également plus faible pour le cas du câble Φ 20mm car le câble est relativement plus éloigné de la masse. On obtient ainsi les valeurs moyennes suivantes :

- Cas2-Φ 20mm: d=290mm et V=100kV Donc : $E_{moy} = 0.34$ [kV/mm]
- Cas2-Φ 80mm : d=260mm et V=100kV Donc : $E_{moy} = 0.38$ [kV/mm]

On calcule la contrainte admissible de l’huile sur les deux distances de 290 mm et 260 mm :

Pour d=290mm donc $E_{adm} = 14.5 * 290^{-0.37} = 1.77$ [kV/mm]..... (IV-4)

Pour d=260mm donc $E_{adm} = 14.5 * 260^{-0.37} = 1.85$ [kV/mm]..... (IV-5)

On obtient ainsi « la marge de sécurité » suivante :

- Cas2-Φ 20mm (d=290mm) : $E_{adm} / E_{moy} = 1.77 / 0.34 = 5.20$
- Cas2-Φ 80mm (d=260mm) : $E_{adm} / E_{moy} = 1.85 / 0.38 = 4.86$

Pour les deux cas, les deux distances peuvent supporter la valeur admissible calculée selon les courbes Weidmann. A noter que bien que le champ électrique atteint localement une valeur maximale plus élevée avec le câble Φ 20mm, on obtient malgré tout une marge de sécurité supérieure.

IV.7 Méthode Weidmann pour l'analyse d'un champ non uniforme :

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, la méthode de Weidmann est basée sur des équations établies à partir d'expérimentations réalisées en configuration plan-plan et donc en champ uniforme et constant partout dans l'huile. Or en pratique, il existe plusieurs situations dans lesquelles le concepteur du système d'isolation se retrouve confronté à des configurations où le champ électrique est non uniforme.

La valeur maximale du champ électrique n'est donc pas prise en compte car la méthode simplifiée est basée uniquement sur le champ moyen appliqué à une distance donnée d'huile.

Nous l'avons vu dans la configuration « Cas1- Φ 20mm » et « Cas 1- Φ 80mm » qui donne une marge de sécurité identique pour les deux cas alors la valeur maximal du champ électrique est différente. Elle présente donc une vision optimiste, car elle néglige le risque de décharges partielles voir un claquage dans l'huile à proximité immédiate du câble, là où le champ atteint sa valeur maximale.

Weidmann a développé donc une autre méthode pour analyser les contraintes électriques dans les situations où le champ n'est pas uniforme comme c'est les cas dans notre étude. La section suivante présente cette méthode pour analyser les contraintes électriques dans les trois cas.

- **Cas 1- Φ 80 (diamètre de 80mm) :**

Une nouvelle courbe est tracée à partir de la moyenne cumulée des valeurs du champ réel appliqué à la distance d'huile entre le câble et le tube. Ainsi, la figure IV.15 présente deux courbes déférentes :

- La première courbe représente la variation du champ réel le long des 72 mm séparant le câble du tube.
- La seconde représente la moyenne cumulée des valeurs de la première courbe.

A noter que le dernier point de cette dernière courbe, correspond à la valeur du champ moyen calculé précédemment par la formule IV-1 ($E_{\text{moy}} = U/d = 1,39\text{kV/mm}$).

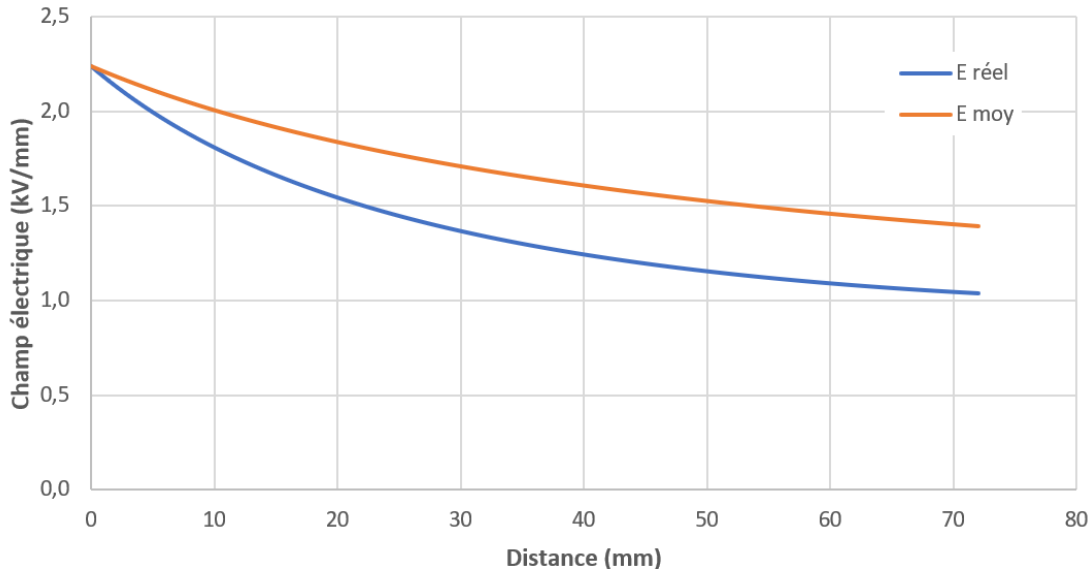


Figure IV.15: Courbe du champ électrique réel et de sa moyenne cumulée (cas1-Φ 80).

Cette nouvelle courbe est ensuite comparée à une autre courbe tracée à partir du champ admissible calculé selon la méthode simplifiée de Weidmann. Cette dernière notée « Eadm » dans la figure IV-16 correspond à l'équation ($E_{adm}=14.5*d^{-0.37}$) appliquée à chaque distance dans l'huile ($d = 1, 2, 3, \dots, 72$ mm). Le critère de validation consiste à vérifier que les valeurs de la courbe moyenne cumulée restent systématiquement inférieures à celles données par la méthode de Weidmann (courbe Eadm).

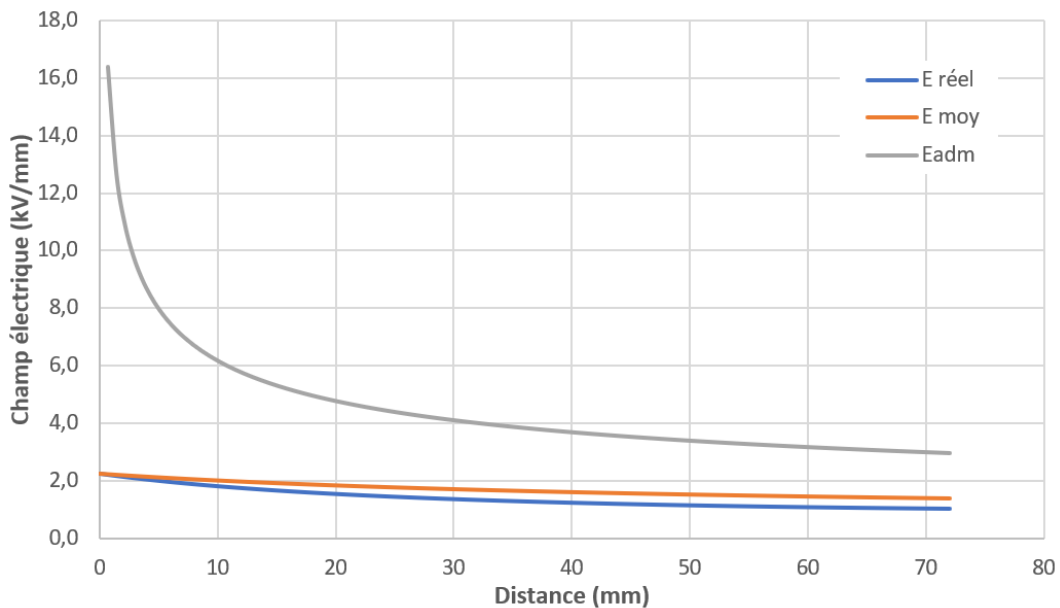


Figure IV.16: Comparaison entre la courbe Weidmann avec le champ moyen cumulé.

On observe que le champ moyen cumulé demeure inférieur à la valeur admissible. Cela se traduit par des marges de sécurité, notées « q » supérieures à 1 pour chaque distance dans l'huile, comme le montre la figure IV.17 (courbe « $q = E_{adm}/E_{moy}$ » sur l'axe à droite).

La valeur q correspondent au rapport entre le champ admissible et le champ moyen cumulé E_{adm}/E'_{moy} pour chaque point. Par conséquent, on peut conclure que le dimensionnement diélectrique dans cette zone est conforme et peut être validé.

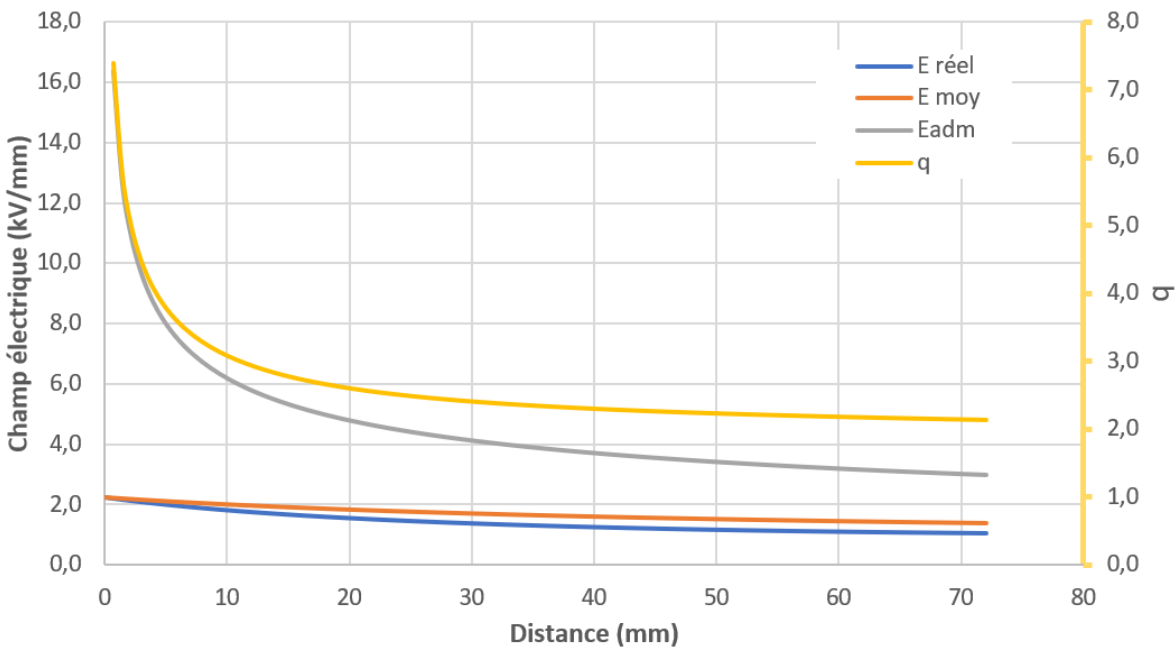


Figure IV.17: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le cas 1-Φ80.

- **Cas 1-Φ 20 (diamètre de 20mm) :**

En suivant les mêmes étapes que pour le cas 1-Φ80, la courbe du champ moyen cumulé est tracée (figure IV.18) puis comparée à celle du champ admissible de Weidmann, E_{adm} . On vérifie ensuite que les valeurs de la marge de sécurité q demeurent supérieures à 1, comme le montre la figure IV.19.

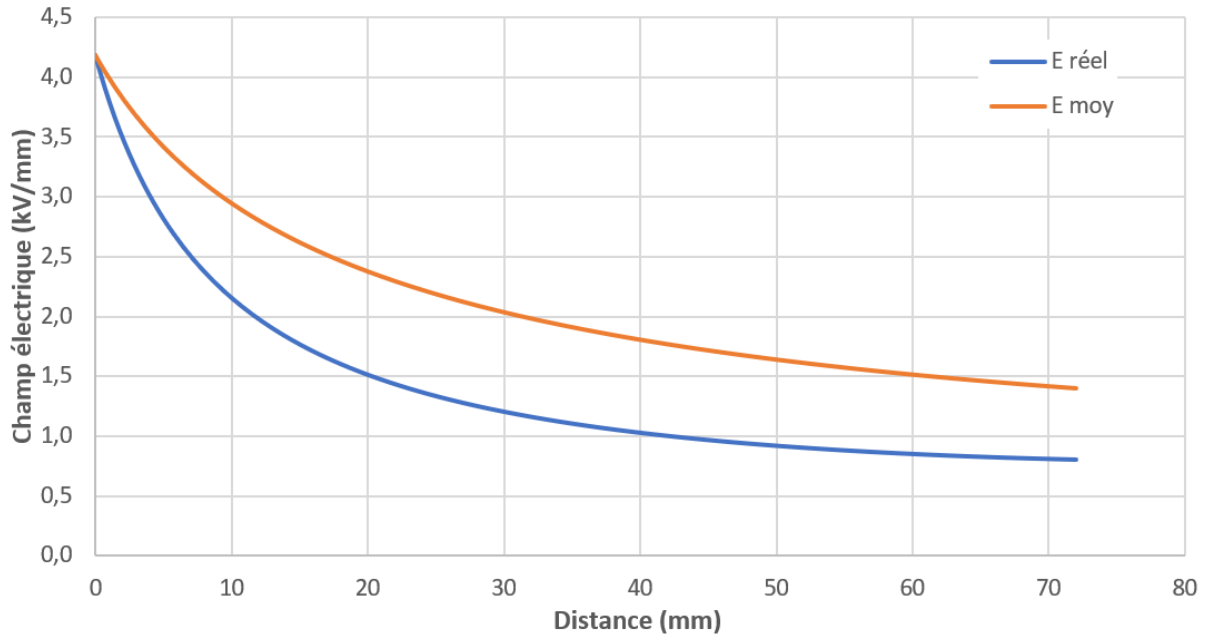


Figure IV.18: Courbe du champ électrique réel et de sa moyenne cumulée (cas1- Φ 20).

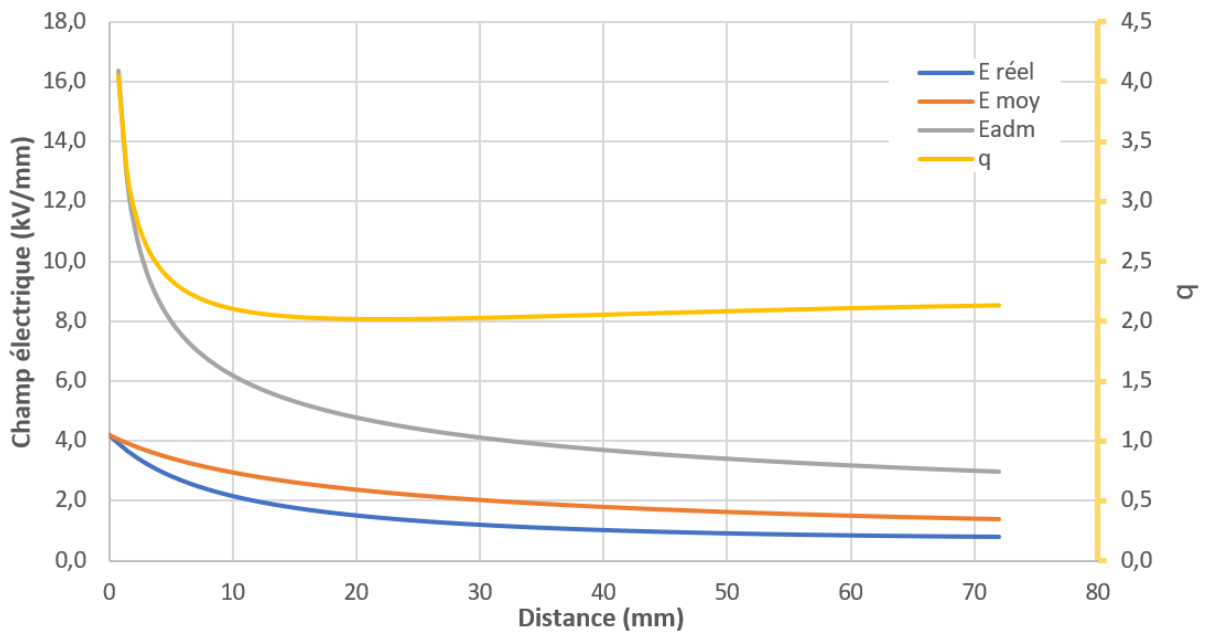


Figure IV.19: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le cas 1- Φ 20.

• Cas 2- Φ 80 (diamètre de 80 mm) :

En suivant les mêmes étapes que le Cas1, on trace la courbe du champ moyen cumulé (Figure IV.20) 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.21).

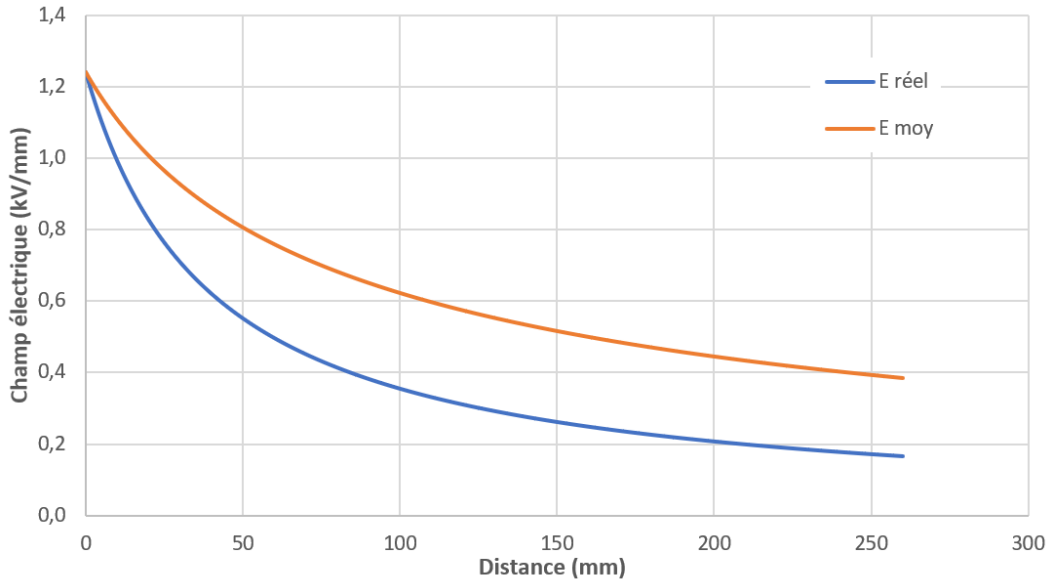


Figure IV.20: Courbe du champ électrique réel et de sa moyenne cumulée (cas2- Φ 80).

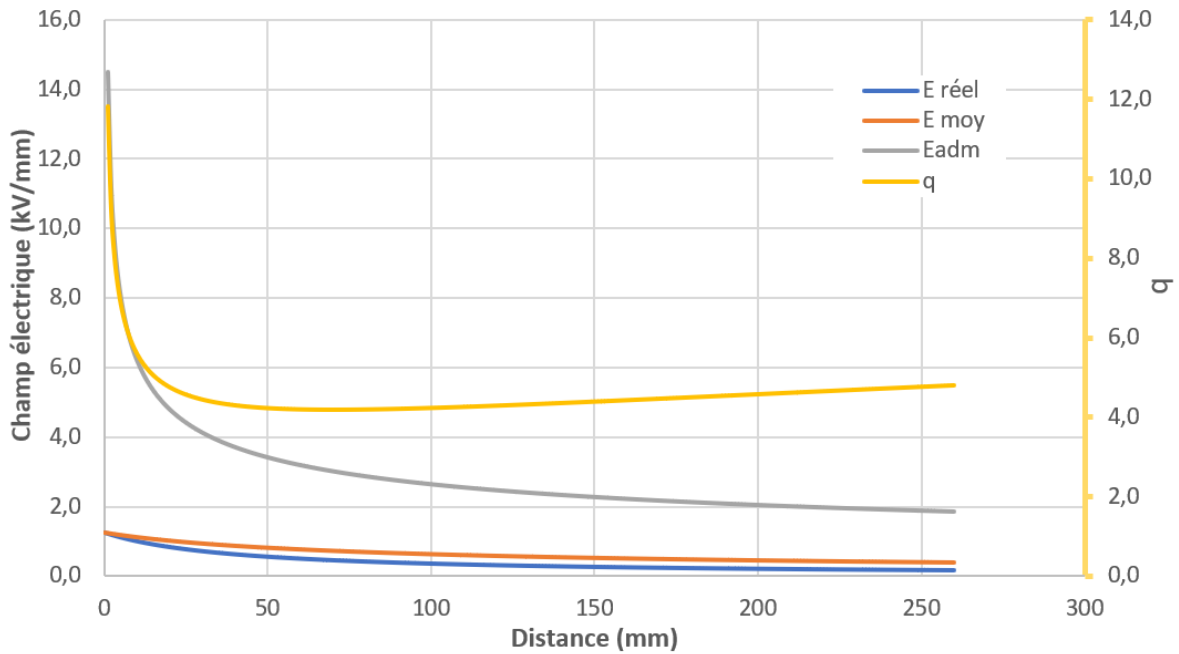


Figure IV.21: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le cas 2- Φ 80.

• Cas 2- Φ 20 (diamètre de 20 mm) :

Toujours en appliquant le même principe, on trace la courbe du champ moyen cumulé (Figure IV.22) 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 restent supérieures à 1 (Figure IV.23).

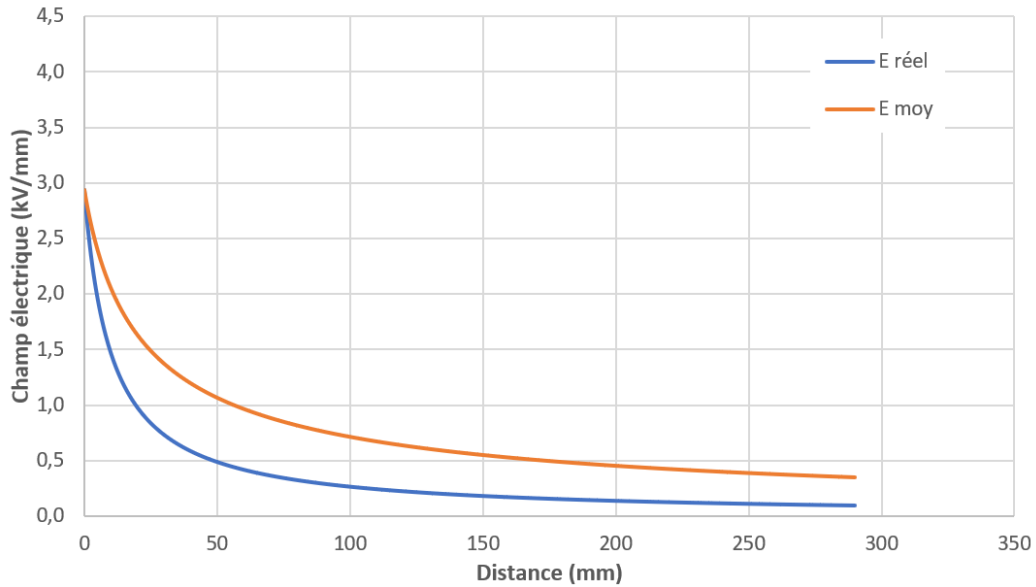


Figure IV.22: Courbe du champ électrique réel et de sa moyenne cumulée (cas2- Φ 20).

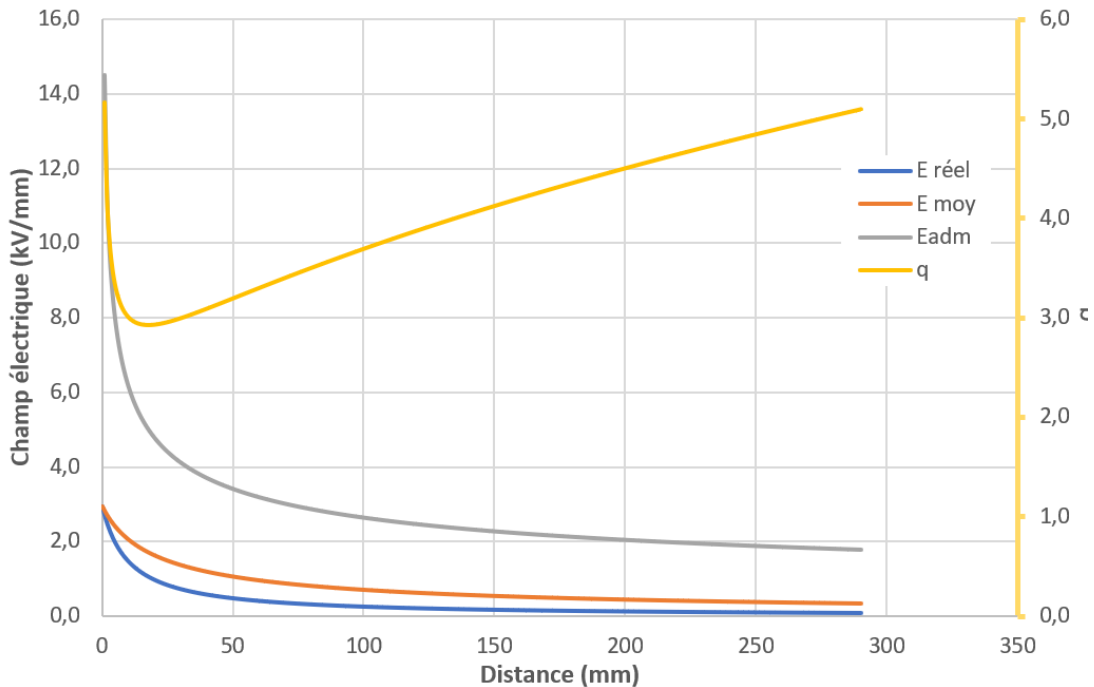


Figure IV.23: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le cas 2- Φ 20.

IV.8 Limite de la méthode d'analyse simplifiée :

L'utilisation de la méthode d'analyse simplifiée conduit à une même valeur de marge de sécurité pour les deux configurations Cas1- Φ 80mm et Cas1- Φ 20mm. Alors que la variation du champ électrique ainsi que sa valeur maximale sont différentes selon le diamètre du câble.

Tableau IV.2 : Résultats d'analyse avec la méthode simplifiée.

	d (mm)	E_{\max}	$E_{\text{moy}}=V/d$	$E_{\text{adm}}=14.5*d^{-0.37}$	$q = E_{\text{adm}}/E_{\text{moy}}$
Cas1- Φ 80	72	2.24	1.39	2.98	2.14
Cas1- Φ 20	72	4.18	1.39	2.98	2.14
Cas2- Φ 80	290	1.24	0.34	1.77	5.20
Cas2- Φ 20	260	2.94	0.38	1.85	4.86

Afin d'illustrer les limites (inconvenients) de la méthode d'analyse simplifiée, considérons l'exemple du cas 1 avec une même distance 72mm et deux diamètres du câble.

Dans cet exemple, la tension appliquée au câble est portée à 215 kV au lieu de 100 kV. En appliquant la méthode de Weidmann pour analyser les contraintes électriques avec cette nouvelle tension, on obtient les courbes présentées dans les figures IV.24 et IV.25 respectivement pour le diamètre 80mm et 20mm.

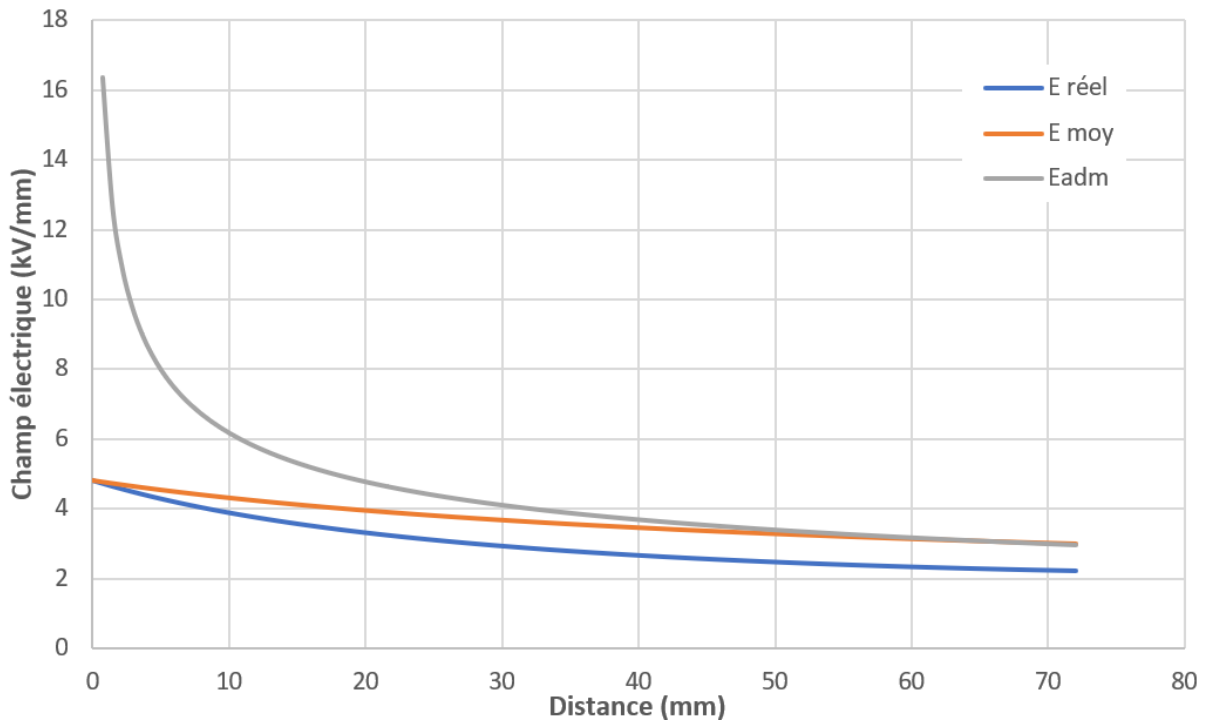


Figure IV.24: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le Cas 1- Φ 80mm – U =215kV.

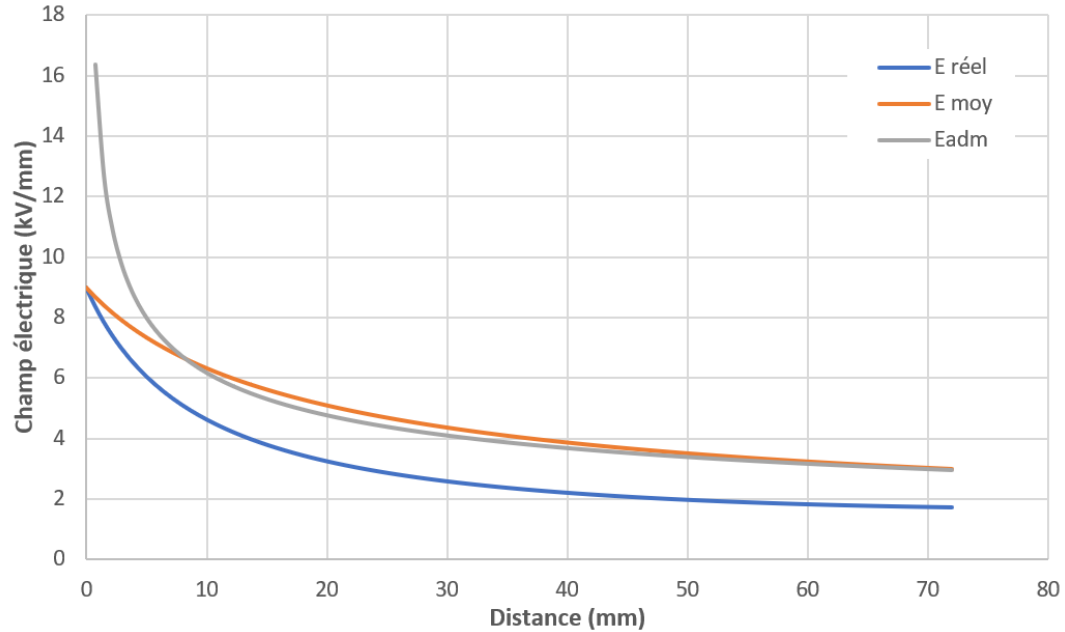


Figure IV.25: Récapitulatif des courbes d'analyse pour le Cas 1- Φ 20mm – $U = 215$ kV.

On constate que, si l'on considère uniquement la valeur moyenne du champ appliquée à la distance totale de 72 mm entre le câble et le tube, la marge de sécurité $q=1$ est respectée dans les deux cas. Cependant, dans le cas 1- Φ 20mm, la valeur de q devient inférieure à 1 et atteint un minimum à une distance critique d_{crit} de 22 mm du câble de diamètre 20 mm. Cela indique que cette zone est critique et ne peut pas supporter le champ électrique appliqué. Il serait donc nécessaire, par exemple, d'installer une barrière isolante à cette distance afin de subdiviser le volume d'huile.

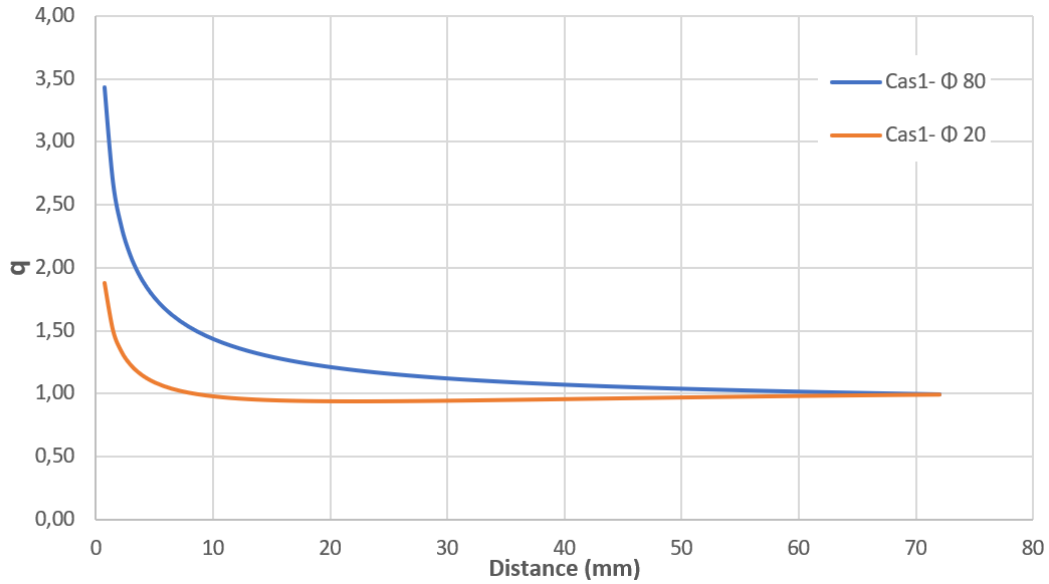


Figure IV.26: Variation de la marge de sécurité en fonction de la distance dans l'huile.

IV.9 Conclusion :

L'analyse des résultats de simulation du logiciel Flux 2D a montré que les régions proches du câble en particulier dans les configurations à petit diamètre, présentent localement des contraintes électriques plus élevées. La méthode d'analyse simplifiée a permis de valider les marges de sécurité dans toutes les configurations quand la tension est égale à 100 kV.

Par contre, en augmentant la tension appliquée (215 kV), certaines zones critiques sont apparues, nécessitant des solutions d'isolation supplémentaires comme la subdivision des espaces d'huile.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale :

Au terme de ce travail, nous avons vu l'importance critique de l'analyse diélectrique dans la conception des transformateurs de puissance. À travers une série de simulations numériques effectuées sur différentes configurations géométriques, nous avons mis en évidence le rôle déterminant d'une méthode d'analyse appropriée pour déterminer les contraintes électriques dans l'huile.

Nous avons étudié l'effet de la finesse du maillage sur les résultats de simulation et l'importance d'avoir un bon maillage pour des résultats plus précis.

Vu la particularité du dispositif étudié qui permet une modélisation en 2D ou en axisymétrique, une comparaison a été faite entre les deux types de modélisation ainsi que les résultats obtenues qui ont permis de vérifier que les deux méthodes sont finalement similaires et aboutissent aux mêmes valeurs.

L'utilisation de la méthode de Weidmann nous a permis de calculer les contraintes admissibles dans l'huile et de vérifier les marges de sécurité associées. Nous avons démontré que la méthode simplifiée peut induire en erreur le concepteur à cause des marges de sécurité relativement optimistes par rapport à la réalité.

La méthode de la moyenne cumulée semble plus fiable dans le cas des configurations avec champ électrique non uniforme. Elle permet d'obtenir des marges de sécurité pour chaque point de la distance d'huile.

Ces résultats soulignent la nécessité d'une modélisation précise et d'une prise en compte rigoureuse des détails géométriques pour garantir la fiabilité des calculs.

Des solutions d'optimisation du système d'isolation peuvent s'avérer indispensables telles que l'ajout de barrières isolantes afin de subdiviser l'espace d'huile. Ce travail ouvre ainsi la voie à des recherches complémentaires portant sur l'amélioration des méthodes de calculs afin d'améliorer la fiabilité des transformateurs de puissance et allonger leur durée d'exploitation.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] Site web: <https://www.techno-science.net/definition/3227.html>
- [2] Shutterstock. (2021). Transformateur haute tension. [Numéro de l'image : 1099623926]. Récupérée de : <https://www.shutterstock.com/fr/image-photo/high-voltage-transformer-1099623926>
- [3] Ammar Beneddine et Flora Mamer « Etude des essais normalisés des transformateurs de puissance MT/BT » PFE M2, Université Tizi-Ouzou, juin 2016.
- [4] BOURGEOIS Audrey, Etude du phénomène d'électrisation 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 Procédés, Institut national polytechnique de Grenoble, 9 février 2007, p : 14.
- [5] Chapman, S. J. (2012). *Electric Machinery Fundamentals* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- [6] Roux, J.-P. (2002). *Transformateurs électriques : étude, conception et réalisation* (2e éd.). Paris : Lavoisier
- [7] BERNARD Hochart, « transformateur statique calcule. Construction », électricité licencié ès sciences, technique d'ingénieur, p : 427-6.
- [8] DJEMAOUNI, Abderafik, ALIUOA, Adem, «Etude et analyse du procédé de la maintenance du transformateur de puissance de la centrale thermique de Jijel.»Thèse de doctorat, Université de Jijel, 2020.
- [9] Sif Eddine Abdi, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile de transformateur », Thèse de doctorat en sciences, Ecole National Polytechnique, ENP, Alger, Algérie, 2012.
- [10] Viet Hung DANG « Etude des phénomènes de pré-claquage et de claquage des huiles végétales, minérales et synthétiques – caractérisation des décharges aux interfaces », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 10 mars 2011.
- [11] HE Maarouf & Benchorfi, F. Z. (2015). *Optimisation du système d'isolation d'un transformateur électrique de traction* (Mémoire de master, Université Belhadj Bouchaib d'Aïn Témouchent). p. 9
- [12] D. Cherry, "Insulating Fluids: An Overview of Dielectric Fluids Used in Transformers", Principal Consulting Scientist for Dielectric Fluids, October 29, 2009.

- [13] P. Vallette et C. De Choudens, “Le Bois, la Pâte, le Papier”, chap. 3, pp. 90–98. Centre Technique du Papier, 1992.
- [14] C. Laurent, “Diélectriques solides et charge d’espace”, Techniques de l’ingénieur, D 2305.
- [15] France Renaud, et autre, les effets des champs électriques et magnétiques sur la santé et la productivité du bétail, canada, hydro Québec, 1999,16p.
- [16] zentak. Applications des lois de la dynamique, [En ligne]. Adresse URL : http://zentak.fr/terminales/T2_Lois_modeles/P6_Mvts_Champs_Electrostatiques.pdf
- [17] chapitre2 électrostatique, « cour de haute tension master semestre1 », p : 17. www.surprises.ch/HT/chapitres/Ch-2.pps
- [18] CHERIFI mohamed el habib, chaibikouider, « 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 .
- [19] Derler.f, h.j.kirch, ch.vrause, e.schneider, Weidmann.H Ltd.ch.8640 rapperswillswitzerland, « development of a desing method for insulating structuresexposed to electric stress in long oil gaps and along oil transformerboard interfaces », 1992,p:110 .
- [20] Altair. (2023). *Flux - Electromagnetic and Thermal Simulation Software*. Altair Engineering Inc. <https://www.altair.com/flux/>
- [21] Megherbi, W., & Belabbes, A. (2017). *Étude de l’isolation dans les grands espaces d’huile* (Mémoire de master, Université Belhadj Bouchaib d’Aïn Témouchent).

Résumé

Résumé :

Dans ce mémoire, nous nous concentrons sur l'étude des transformateurs électriques en termes de structure, de fonctionnement, de techniques d'isolation et des contraintes électriques internes. Le logiciel de simulation **Flux 2D** a été utilisé pour analyser le champ électrique à l'intérieur du transformateur dans six configurations différentes, variant selon le diamètre du câble et la distance entre celui-ci et le tube. La méthode de Weidmann a été appliquée pour évaluer les contraintes diélectriques dans l'huile isolante, en tenant compte des effets de la géométrie, de la précision du maillage, et des différents types de modélisation (2D ou axisymétrique). Les résultats ont montré l'importance du diamètre et de la distance dans la répartition du champ électrique. Des marges de sécurité ont également été calculées afin de valider la fiabilité des conceptions du transformateur, même en cas de surtension.

Abstract:

This dissertation focuses on the study of power transformers in terms of structure, function, insulation techniques, and internal electrical stresses. The Flux 2D simulation program was used to analyze the electric field inside the power transformer under six different conditions in terms of cable diameter and distance from the tube. The Weidmann method was applied to evaluate the dielectric stress in the insulating oil, taking into account the effects of geometric shape, mesh accuracy, and different modeling types (2D or axisymmetric). The results demonstrated the importance of diameter and distance in the distribution of the electric field. Safety margins were also calculated to confirm the validity of transformer designs even under overvoltage conditions.

المخلص

نركز في هذه المذكرة على دراسة المحولات الكهربائية من حيث البنية والوظيفة وتقنيات العزل والضغوط الكهربائية الداخلية. وقد تم استخدام برنامج المحاكاة Flux 2D لتحليل المجال الكهربائي داخل المحول الكهربائي في 6 حالات مختلفة من حيث قطر الكابل والمسافة بينه وبين الأنبوب. وتم تطبيق طريقة Weidmann لتقييم الاجهاد العازل في زيت العزل مع مراعاة تأثيرات الشكل الهندسي و دقة الشبكة ومختلف أنواع النمذجة (ثنائية الأبعاد أو متماثلة المحور). أظهرت النتائج أهمية القطر والمسافة في توزيع المجال الكهربائي. كما تم حساب هوامش امان لتأكيد صلاحية تصميمات المحول حتى في حالات الجهد الزائد.