

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 –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de génie électrique



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commandes Electriques
Thème

Optimisation du système d'isolation d'un transformateur
électrique de traction

Présenté Par :

- 1) M. Maarouf Houssef Eddine
- 2) Melle. Benchorfi Fatima Zahra

Devant le jury composé de :

| | | | |
|-------------------------|-------|--------------------------|-----------|
| Dr. BERRACHED Djelloul | M C B | UAT.B.B (Ain Temouchent) | Président |
| Dr. BENZAZZA Baghdadadi | M C B | UAT.B.B (Ain Temouchent) | Examineur |
| Pr. ZELMAT Samir | Pr | UAT.B.B (Ain Temouchent) | Encadrant |

Année Universitaire 2020/2021

Dédicace

A ma très chère mère

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit.
Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a
toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.*

A ma très chère grand-mère

*Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail
traduit ma gratitude et mon affection.*

À ma famille

*Pour tout l'amour, sa tendresse et ses conseils qu'elle n'a pas cessé de me les
donner.*

À mes amis

Pour leur aide et leur soutien et encouragement continu.

*À Mon Encadrant, qui doit voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis
grâce à lui.*

À tous ceux que j'aime et qui m'estiment et pensent à moi.

MAAROUF HOUSSEM EDDINE

Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurais point te remercier comme il se doit ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à ma cotes a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon très cher père

Ma précieuse offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite. Tu as toujours été à mes cotes pour me soutenir et m'encourager.

A mes chers frères Ahlem Donia zed et Tesnim et Amir Abdelkader e et Mariam Elbatoul.

A toi mon grand-père Miloud, A ma grand-mère Zahra, mes oncles et mes tantes. Que dieu leur donne une longue et joyeuse vie.

A tous les cousins, les voisins, merci pour leurs amours et leurs encouragements.

A mes amis et surtout Djaber merci de me motiver lorsque j'en ai besoin.

Sans oublier mon binôme Housseem pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

FATIMA ZAHRA

Remerciements

Qu'il nous soit d'abord permis de remercier et exprimer notre gratitude envers ALLAH, qui nous a donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

*Nous adressons nos grands remerciements au **Pr ZELMAT Samir** pour la qualité de son encadrement exceptionnelle, pour sa patience, sa rigueur, et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

Nous tenons à lui exprimer nos grands respects et nos admirations pour sa personnalité.

Nous remercions très sincèrement, les membres de jury d'avoir bien voulu accepter de faire la commission d'examineurs.

Nous remercions s'adresse également à tous nos familles et amis qui nous ont toujours soutenu et encouragés au cours de la réalisation de ce travail, ainsi qu'à nos prof qui ont contribué à la réussite de cette formidable année universitaire.

Enfin, Nous adressons aussi nos sincères remerciements à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, aux personnes qui, malgré que leurs noms ne figurent pas dans ce travail, étaient toujours prêtes à aider et à contribuer dans le bon déroulement de ce travail.

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières

| | |
|------------------------------|--|
| LISTE DES ABRÉVIATIONS | |
| LISTE DES FIGURES..... | |
| LISTE DES TABLEAUX..... | |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE..... | |

I. Généralités sur les transformateurs

| | |
|--|----|
| I.1.Introduction | 1 |
| I.2.Définition | 1 |
| I.3. Symboles électriques du transformateur..... | 1 |
| I.4.Principe de fonctionnement..... | 2 |
| I.5.les enroulements..... | 3 |
| I.5.1. Enroulement basse tension..... | 4 |
| I.5.2. Enroulement haute tension..... | 4 |
| I.6. technologie de bobinage..... | 5 |
| I.6.1. Transformateur Cuirassé..... | 5 |
| I.6.2. Transformateur à colonnes..... | 6 |
| I.7 Matériaux isolants utilisés dans les transformateurs de puissance..... | 7 |
| 1.7.1. Isolants liquides..... | 7 |
| 1.7.1.1. Rôle des isolants liquides..... | 7 |
| 1.7.1.2 Principaux types des isolants liquides..... | 8 |
| 1.7.1.3 Huiles minérales..... | 9 |
| 1.7.1.4 Liquides de synthèse..... | 10 |
| I.7.1.5. Choix du liquide isolant..... | 11 |
| I.7.2. Isolants solides..... | 12 |
| I.7.2.1. Rôle et principaux types des isolants solides..... | 12 |
| I.7.2.2. Les isolants inorganiques | 13 |
| I.7.2.3.Les isolants organiques..... | 13 |
| I.7.2.4.Cartons et le papier..... | 13 |
| I.8 Conclusion..... | 14 |

II. Essais diélectriques et méthode de calcul

| | |
|---|----|
| II.1. Introduction..... | 15 |
| II.2.Choc de foudre en onde pleine..... | 15 |
| II.3. Choc de foudre en onde coupée..... | 16 |
| II.4.Calcul des contraintes électriques dans l'huile..... | 17 |
| II.4.1. Méthode de calcul de « Weidmann »..... | 17 |
| II.4.2. Exemple de calcul avec la méthode « Weidmann »..... | 18 |
| I.5.Conclusion..... | 23 |

III. Présentation de l'étude de simulation

| | |
|--|----|
| III.1. Introduction..... | 24 |
| III.2. Logiciel de résolution..... | 25 |
| III.3. Géométrie du model..... | 26 |
| III.4. Maillage de la géométrie..... | 29 |
| III.5. Physique du model..... | 30 |
| III. 6. Configurations d'isolation étudiées..... | 31 |
| III.7. Conclusion..... | 33 |

IV. Calculs et analyse des résultats

| | |
|---|----|
| IV.1.Introduction | 34 |
| IV.2. Exploitation des résultats..... | 34 |
| IV.3. Configuration N°1 | 35 |
| IV.3.1. Répartition des lignes équipotentielles..... | 35 |
| IV.3.2. Dégradé du champ électrique..... | 36 |
| IV.3.3. Calcul des contraintes électriques..... | 37 |
| IV.4. Configuration N°2..... | 39 |
| IV.5. Configuration N°3..... | 42 |
| IV.6. Configuration N°4..... | 44 |
| IV.7 .Comparaison entre les différentes configurations..... | 46 |
| IV.8. Conclusion..... | 48 |

LISTE DES ABREVIATIONS

Les abréviations

Les abréviations

CA : courant alternatif.

Fém : La force électromotrice.

HT : haut tension.

PCB : les polychlorobiphényles.

OP: onde pleine.

BIL: Basic Insulation Level.

ç-à-d: c'est-à-dire.

t: temps.

CEI : commission électrique internationale.

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

| | | |
|--------------------|---|----|
| Figure. I.1 | Symboles électriques du transformateur monophasé | 1 |
| Figure. I.2 | Symboles du transformateur triphasé | 2 |
| Figure I.3 | Schémas de principe d'un transformateur. | 2 |
| Figure I.4 | la loi de lenz | 3 |
| Figure I.5 | Les enroulements d'un transformateur triphasé | 4 |
| Figure I.6 | Transformateur cuirassé | 6 |
| Figure I.7 | Transformateur à colonnes. | 7 |
| Figure I.8 | Processus de raffinage pour les huiles brutes. | 9 |
| Figure I.9 | Principaux constituants de l'huile minérale issue du pétrole brut. | 10 |
| Figure 1.10 | Structure de l'ester synthétique, R : chaîne saturée. | 11 |
| Figure I.11 | Formule de la cellulose. | 14 |
| Figure II.1 | Forme normalisée d'un choc de foudre à onde pleine..... | 15 |
| FigureII.2 | Forme normalisée d'un choc de foudre hachée..... | 16 |
| Figure II.3 | Variation du champ électrique « Epd » en fonction de la distance pour différentes configurations (courbes Weidmann)..... | 17 |
| Figure II.4 | A) Configuration géométrique du model. B) Répartition uniforme des lignes équipotentielles..... | 18 |
| Figure II.5 | Champ électrique uniforme dans l'huile..... | 19 |
| Figure II.6 | Comparaison entre la valeur moyenne et la valeur admissible du champ électrique dans l'huile (configuration avec A=14,5)..... | 20 |
| Figure II.7 | Subdivision du volume d'huile en trois canaux à l'aide des barrières carton..... | 21 |

Liste des figures

| | | |
|----------------------|---|----|
| Figure II.8 | Marges positives dans les trois canaux d'huile..... | 21 |
| Figure II.9 | Modification de l'emplacement des barrières carton..... | 22 |
| Figure II.10 | Optimisation des marges de sécurité sur les trois canaux d'huile..... | 22 |
| Figure III.1 | Autotransformateur 400/220kv- Transformateur de traction TGV..... | 24 |
| Figure III.2 | Vue générale sur le transformateur de traction étudié..... | 24 |
| Figure III.3 | Schéma des différents modules du logiciel Flux-2D..... | 26 |
| Figure III.4 | Vues 3D en coupe du bobinage (bobines en rouge – cartons isolants en vert..... | 27 |
| Figure III.5 | A) Coupe 2D du bobinage. B) Géométrie utilisée dans Flux 2D..... | 28 |
| Figure III.6 | Vue sur le maillage global de la géométrie et zoom sur le maillage le plus fin..... | 29 |
| Figure III.7 | Répartition en % de la tension d'essai OP à $t = 0,5\mu s$ (100% = 147kV).... | 30 |
| Figure III.8 | instants « t » dans l'onde OP considérés dans l'étude ($t=0,5\mu s$)..... | 31 |
| Figure III.9 | Repérage de la zone la plus contrainte du bobinage..... | 31 |
| Figure III.10 | Vue agrandie sur les quatre configurations d'isolation autour de la bobine HT..... | 32 |
| Figure IV.1 | Instants « t » de l'onde OP considérés dans l'étude ($t=0,5\mu s$)..... | 34 |
| Figure IV.2 | Vue agrandie sur l'isolation autour de la bobine HT dans la configuration N°1..... | 35 |
| Figure IV.3 | Répartition des lignes équipotentiellles dans le bobinage..... | 36 |
| Figure IV.4 | Dégradé du champ électrique dans le bobinage..... | 36 |
| Figure IV.5 | Vue agrandie de la zone la plus contrainte dans le bobinage..... | 37 |
| Figure IV.6 | Chemins étudiés pour le calcul des contraintes électriques..... | 38 |
| Figure IV.7 | Vue agrandie sur la configuration N°2 (la flèche indique le carton rajouté). | 40 |

Liste des figures

| | | |
|---------------------|---|----|
| Figure IV.8 | Vue agrandie de la zone la plus contrainte dans le bobinage..... | 40 |
| Figure IV.9 | Chemins étudiés pour le calcul des contraintes électriques..... | 41 |
| Figure IV.10 | Vue agrandie sur la configuration N°3 (la flèche indique le carton rajouté)..... | 4 |
| | 2 | |
| Figure IV.11 | Vue agrandie de la zone la plus contrainte dans le bobinage. | 43 |
| Figure IV.12 | Chemins étudiés pour le calcul des contraintes électriques..... | 43 |
| Figure IV.13 | Vue agrandie sur la configuration N°4 (la flèche indique le carton rajouté). | 44 |
| Figure IV.14 | Vue agrandie de la zone la plus contrainte dans le bobinage..... | 45 |
| Figure IV.15 | Chemins étudiés pour le calcul des contraintes électriques..... | 45 |
| Figure IV.16 | Chemins utilisés pour la comparaison des marges de sécurité..... | 46 |
| Figure IV.17 | Chemin 3 avant et après la subdivision | 47 |
| Figure IV.18 | Chemin 6 avant et après la subdivision | 48 |

LISTE DES TABLEAUX

List des tableaux

| | | |
|----------------------|--|----|
| Tableau I.1 | Choix du liquide isolant pour différents types de transformateurs..... | 12 |
| Tableau II.1 | Coefficients “A” des courbes Weidman..... | 18 |
| Tableau III.1 | Matériaux affectés aux faces du model (régions surfaciques)..... | 30 |
| Tableau IV.1 | Calcul des contraintes électriques pour différents chemins (Config N°1)... | 39 |
| Tableau IV.2 | Calcul des contraintes électriques pour différents chemins (Config N°2)... | 41 |
| Tableau IV.3 | Calcul des contraintes électriques pour différents chemins (Config N°3)... | 44 |
| Tableau IV.4 | Calcul des contraintes électriques pour différents chemins (Config N°4)... | 45 |
| Tableau IV. 5 | Calcul des contraintes électriques pour différents chemin (chemin3)..... | 47 |
| Tableau IV.6 | Calcul des contraintes électriques pour différents chemins (chemin 6)..... | 48 |

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le transformateur de puissance est un composant électrique indispensable dans le fonctionnement du réseau. Il existe dans différents types d'applications : réseaux de transport d'énergie, distribution d'énergie, usines et trains. Chacun répond à des restrictions et des usages très différents.

Par conséquent, le transformateur de puissance fait partie de l'ensemble du système (réseau électrique, usines de production, sous-stations de distribution, usines, trains, tramways, etc.) et constitue un maillon sensible de l'ensemble du système. Leur échec aura un effet d'entraînement sur le reste du système. En particulier, ils doivent s'acquitter de leurs responsabilités dans la vie qui leur est confiée, et souffrent parfois de surcharges extrêmes pour assurer la continuité de service. Par conséquent, ces contraintes nécessitent une taille de transformateur correcte et optimisée pour garantir sa fiabilité et répondre à des exigences de qualité strictes.

La durée de vie d'un transformateur est généralement liée à la durée de vie de son système d'isolation. Les concepteurs de transformateurs y apporteront donc une attention particulière en menant des recherches en amont pour vérifier la rigidité diélectrique de la partie active du transformateur, notamment la rigidité diélectrique du système d'isolation de ses enroulements.

Le travail présenté dans ce mémoire est une étude de conception visant à comparer différentes configurations du système d'isolation d'un transformateurs de traction ferroviaire fabriqué avec la technologie cuirassé (25kV / 1kV) et ceci en calculant la contrainte électrique dans ses enroulements. Le but ultime est de vérifier son système d'isolation composé de composants en carton huilé et en papier. Par conséquent, ce mémoire est divisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous décrirons les principaux composants du transformateur. Nous porterons une attention particulière à leurs différentes techniques de construction, à leur description et à leur composition. En fait, le transformateur que nous avons étudié a été fabriqué selon une technologie (cuirassé), encore peu connue par rapport à la technologie colonne.

Dans le deuxième chapitre, un des plus importants essais diélectriques effectués sur le transformateur de puissance sera introduit. Un accent particulier est mis sur la méthode de calcul de la contrainte électrique utilisée pour évaluer la qualité de l'isolation des enroulements. Dans ces calculs, nous considérerons notamment l'essai au choc de foudre, qui fournit la contrainte électrique la plus élevée pour le transformateur étudié dans notre travail.

Introduction générale

Dans le chapitre 3, nous montrerons le modèle étudié à l'aide du logiciel Flux 2D. Le modèle est présenté sous la forme d'une section transversale dans l'enroulement du transformateur, où l'on peut visualiser la disposition des bobines et des plaques isolantes entre elles. Il s'agit de pouvoir calculer le champ électrique dans l'huile et de vérifier s'il ne dépasse pas un seuil critique.

Les résultats de ces calculs seront présentés et analysés au chapitre 4, où ils seront comparés aux calculs effectués à l'aide de Flux 2D et aux équations empiriques introduites au chapitre 2.

Enfin, nous conclurons notre travail par une conclusion générale résumant les principaux points des résultats de cette étude, qui permettront de vérifier et de valider le système d'isolement du transformateur de traction et d'identifier la meilleure configuration parmi les quatre configurations étudiées.

Introduction générale

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LES

TRANSFORMATEURS

I.1.Introduction :

Un transformateur est une machine électrique statique qui permet de modifier la valeur de tension et la valeur d'intensité du courant fourni par l'alimentation. Il effectue cette conversion avec une excellente efficacité dans un système où la tension et la valeur du courant sont différentes mais la fréquence est la même. Dans un transformateur statique, l'énergie est transférée du primaire au secondaire à travers le circuit magnétique formé par le boîtier du transformateur. Ensuite, les deux circuits sont couplés magnétiquement. Ceci permet de réaliser une isolation galvanique entre les deux circuits. [1]

I.2.Définition :

Le transformateur est un appareil électrique statique à induction électromagnétique qui permet de transformer une tension ou un courant d'une certaine fréquence en une autre tension ou courant de même fréquence. Il est composé d'un circuit magnétique sur lequel sont placés deux bobinages au moins.

Comme on peut l'appeler convertisseur statique à induction qui comporte deux ou plusieurs enroulements fixes, inductivement couplés et destiné à la conversion, par l'intermédiaire de l'induction électromagnétique, des paramètres (tension, intensité de courant, nombre de phases de l'énergie électrique a courant alternatif).

I.3. Symboles électriques du transformateur :

Le transformateur peut être représenté par l'un des symboles reportés sur les figures (I.1) et (I.2).

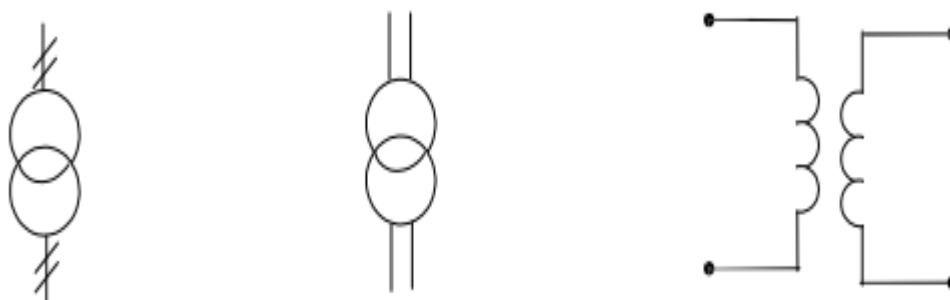


Figure. I.1. Symboles électriques du transformateur monophasé.

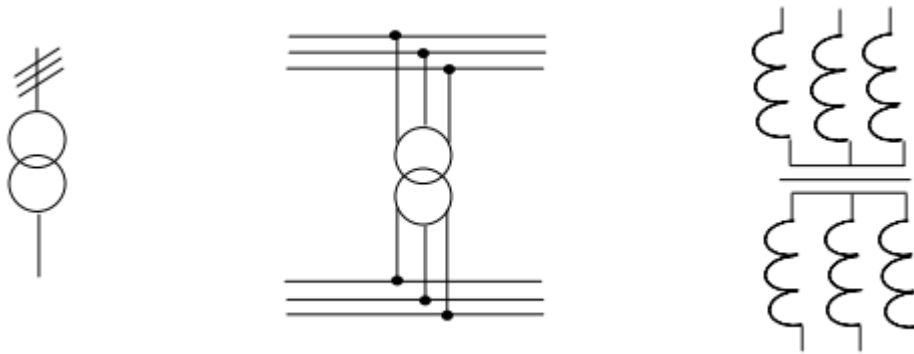


Figure. I.2 Symboles du transformateur triphasé [2].

I.4.Principe de fonctionnement :

Le principe de base sur lequel le transformateur fonctionne est la loi de Faraday sur l'électromagnétique induction ou induction mutuelle entre les deux bobines. Le transformateur est constitué de deux enroulements séparés placés sur le noyau en acier.

L'enroulement auquel est connectée l'alimentation CA est appelé enroulement primaire et auquel la charge est connectée est appelé enroulement secondaire, comme indiqué dans la figure ci-dessous. Cela fonctionne sur le courant alternatif uniquement parce qu'un flux alternatif est requis pour une induction mutuelle entre les deux enroulements.

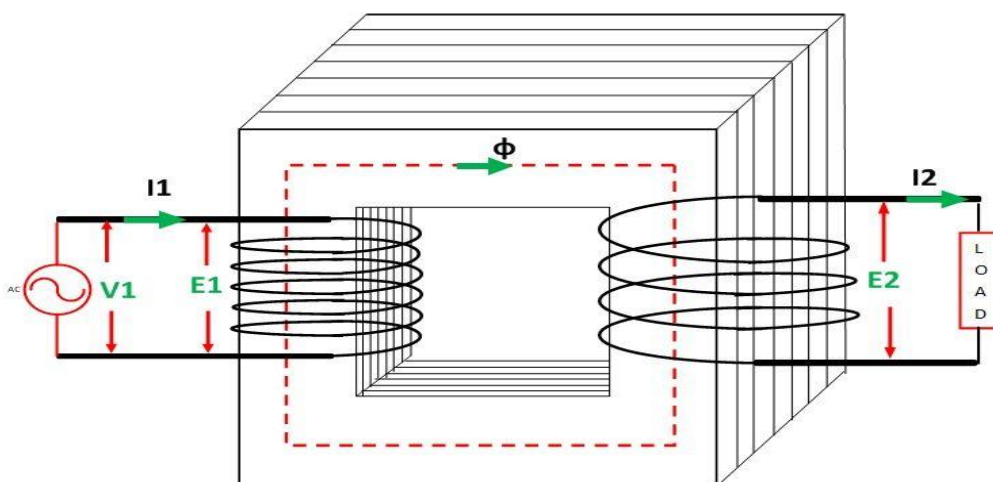


Figure I.3. Schémas de principe d'un transformateur.

Lorsque l'alimentation primaire est alimentée en courant alternatif avec une tension de V_1 , un flux alternatif ϕ s'établit au cœur du transformateur, qui relie l'enroulement secondaire et à la suite de celui-ci, une force électromotrice est induite dans celui-ci.

Le sens de cette force électromotrice induite est opposé à la tension appliquée V_1 , ceci est dû à la loi de Lenz illustrée dans la figure ci-dessous.

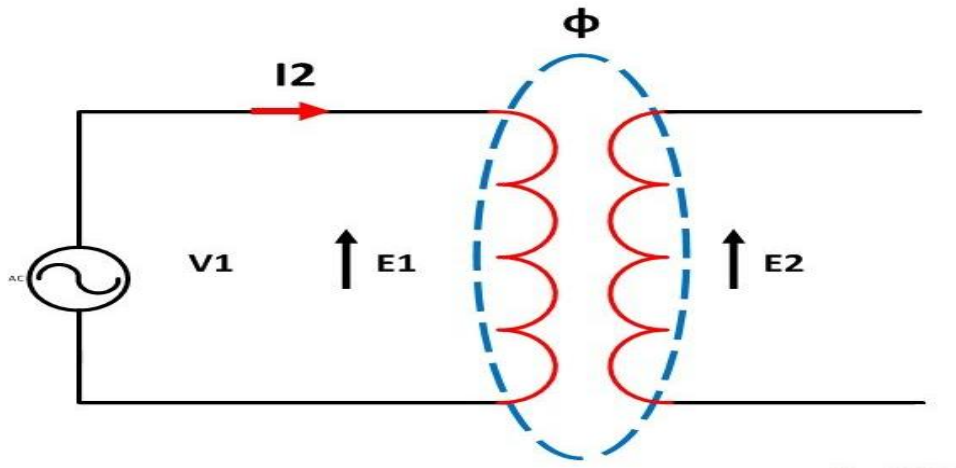


Figure I.4 La loi de Lenz [3]

Physiquement, il n'y a pas de connexion électrique entre les deux enroulements, mais ils sont connectés magnétiquement. Par conséquent, le courant électrique est transféré du circuit primaire au circuit secondaire via une inductance mutuelle. La force électromotrice induite dans les enroulements primaire et secondaire dépend du taux de changement de liaison de flux qui est $(N d\phi / dt)$.

$d\phi / dt$ est le changement de flux et est identique pour les enroulements primaire et secondaire. La FEM induite E_1 dans l'enroulement primaire est proportionnelle au nombre de tours N_1 des enroulements primaires ($E_1 \propto N_1$). De même, la force électromotrice induite dans l'enroulement secondaire est proportionnelle au nombre de tours du côté secondaire.

I.5. Les enroulements :

Le transformateur comporte deux enroulements (primaire et secondaire) montés sur les colonnes du circuit magnétique qui sert de support.

Le primaire (enroulement HT) destiné à la création d'un champ alternatif sinusoïdal et le secondaire à la création d'un courant induit par la variation du flux généré par le champ alternatif. Le primaire se comporte comme un récepteur, par contre le secondaire comme un générateur, il diffère du primaire par le nombre de spires.

Les enroulements sont réalisés à partir de conducteur en cuivre de forme circulaire ou rectangulaire selon la valeur de la tension.



Figure I.5. Les enroulements d'un transformateur triphasé.

I.5.1. Enroulement basse tension :

Le courant qui circule dans l'enroulement secondaire se caractérise par une forte intensité. Cette caractéristique impose un nombre de spires limité et une section du conducteur relativement importante.

I.5.2. Enroulement haute tension :

La tension est élevée et l'intensité du courant est de faible valeur, ce qui impose un fil conducteur de faible section et un nombre de spires plus important [4].

I.6. Technologie 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 (couches)
- une meilleure tenue au choc de foudre (couches)
- une (relative) facilité de réalisation et bonne tenue diélectrique (galettes) [5]

I.6.1. Transformateur Cuirassé :

Pour ce type de transformateur, le circuit magnétique entoure complètement le bobinage, ce qui lui confère 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.

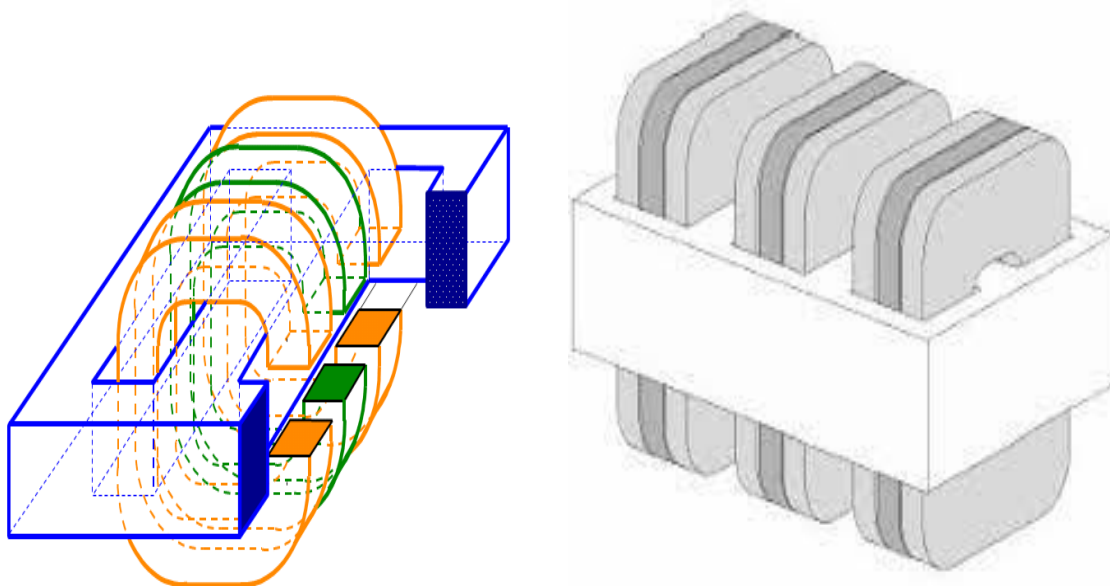


Figure I.6. Transformateur cuirassé.

Ces transformateurs sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition, où les surtensions transitoires sont fréquentes. Dans cet environnement, ils doivent se prémunir des effets néfastes, voire dévastateurs de ces surtensions sur les enroulements. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages, appelés « écrans statiques ».

I.6.2. Transformateur à colonnes :

Le transformateur à colonnes est constitué de 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 jeux. [6]

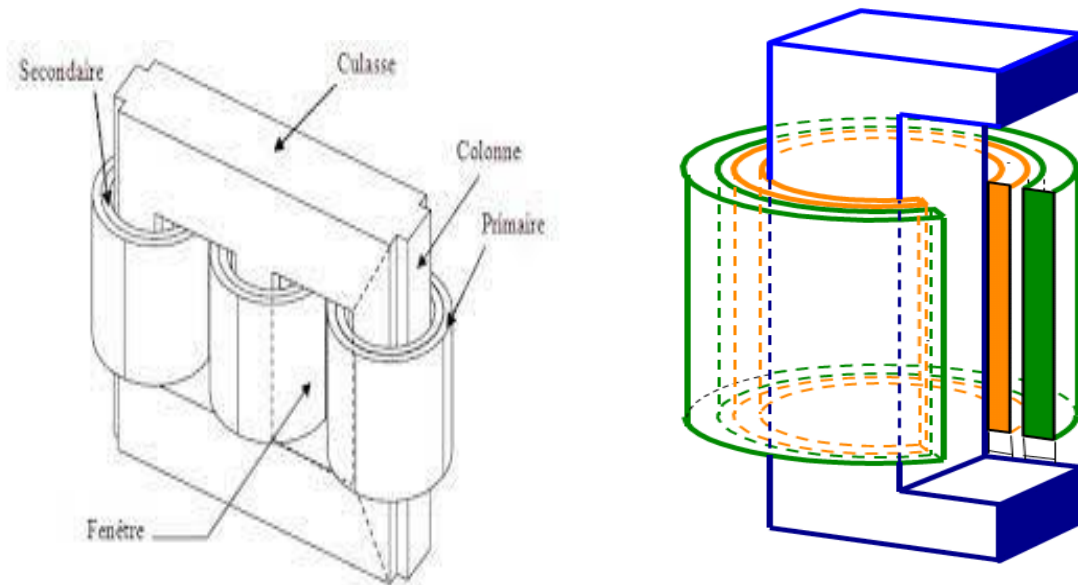


Figure I.7. Transformateur à colonnes.

1.7 Matériaux isolants utilisés dans les transformateurs de puissance :

Les matériaux isolants utilisés dans les transformateurs de puissance peuvent être divisés en deux catégories : les isolants solides et les isolants liquides.

1.7.1. Isolants liquides :

1.7.1.1. Rôle des isolants liquides :

Les huiles isolantes sont utilisées en électrotechnique comme imprégnant d'isolations cellulosiques ou comme produit de remplissage de matériels électriques très divers. Leur rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer la tenue diélectrique de l'isolation, la rigidité diélectrique des liquides étant nettement supérieure à celle des gaz.

Cependant, dans beaucoup d'applications, elles servent à la fois à améliorer les propriétés diélectriques et à évacuer la chaleur d'un assemblage.

Les transformateurs remplis d'huile ont été développés depuis plus d'un siècle. Cette technologie est toujours très utilisée dans les transformateurs de puissance contrairement aux

transformateurs de distribution, qui eux peuvent être “secs”. Aussi, différentes raisons expliquent cette préférence:

- Par rapport aux solides, les liquides refroidissent et isolent le transformateur. Ainsi, les transformateurs immergés sont plus compacts que les transformateurs secs de même puissance.
- Les solides permettent d’obtenir des performances diélectriques équivalentes aux liquides, mais à des coûts beaucoup plus élevés.
- Les isolants solides utilisés seuls présentent des risques énormes aux décharges partielles (inclusions gazeuses) pour les niveaux de tension des transformateurs de puissance.
- Les analyses d’huile (teneur en eau, analyse de gaz ...) permettent de diagnostiquer l’état du transformateur à moindre coût.
- Les transformateurs immergés sont moins bruyants que les secs et provoquent ainsi moins de nuisance sonore.

Dans un transformateur, les huiles isolantes assurent plusieurs fonctions :

1.7.1.2 Principaux types des isolants liquides :

De façon générale, il n’existe pas de liquides isolants pouvant remplir l’ensemble des propriétés requises pour une application donnée. 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.

1.7.1.3 Huiles minérales :

Les huiles minérales sont obtenues par raffinage de bruts de pétrole ; elles sont les plus utilisées dans les matériels électriques. Elles possèdent de bonnes propriétés diélectriques et de transfert de chaleur, et une bonne compatibilité avec les isolants cellulosiques. 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. Aussi, avec le développement de nouvelles techniques de traitement (séchage, purification ...), les propriétés des huiles minérales n'ont cessé de s'améliorer depuis leur première utilisation au début du siècle dernier

L'huile minérale est obtenue à partir du raffinage du pétrole brut (figure I.7).

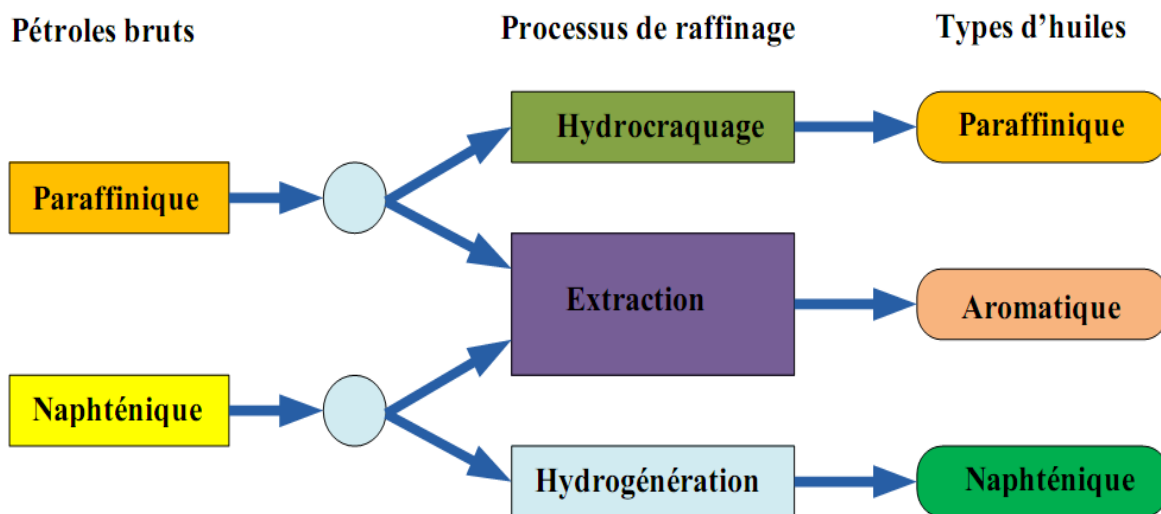


Figure I.8. Processus de raffinage pour les huiles brutes.

Les huiles minérales contiennent également un faible pourcentage de molécules d'hydrocarbures, qui comprennent dans leur structure d'autres éléments comme l'azote, le soufre et l'oxygène.

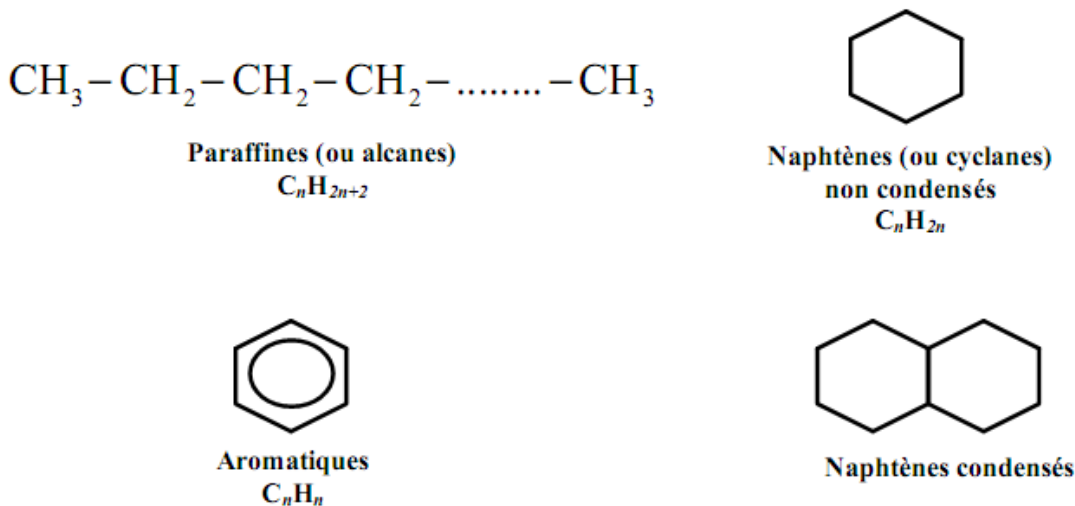


Figure I.9. Principaux constituants de l'huile minérale issue du pétrole brut.

1.7.1.4 Liquides de synthèse :

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 (transformateurs de distribution et de traction).

38 partir des différents procédés chimiques. Il en existe trois types principaux destinés aux 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 tétralcool (pétaérythriol) ou d'un mélange d'acides monocarboxyliques contenant de 7 à 9 carbones (Figure 1.9).

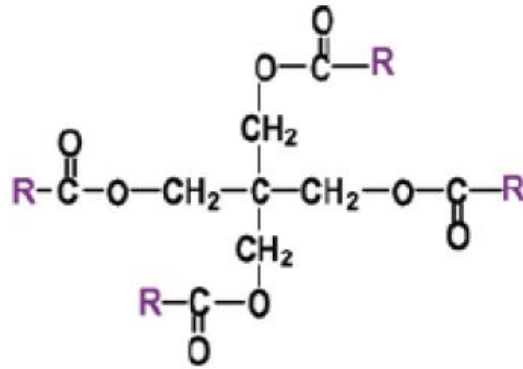


Figure 1.10. Structure de l'ester synthétique, R : chaîne saturée.[7]

I.7.1.5. Choix du liquide isolant :

Le choix des liquides pour une application donnée doit garantir la fiabilité de fonctionnement des équipements et la sécurité des opérateurs. Il y a toujours un compromis entre les performances techniques des liquides isolants et leur coût.

Les propriétés diélectriques des hydrocarbures aromatiques sont nettement meilleures que celles des huiles minérales, mais leur prix reste élevé : quatre à cinq fois plus élevé. Ils sont utilisés dans les câbles et les condensateurs, et les fabricants peuvent obtenir de meilleures performances d'imprégnation en réduisant la taille des équipements, ce qui se traduit par des équipements plus puissants et moins chers que ceux imprégnés d'huile minérale. Dans le cas d'un transformateur, Il est impossible de profiter des meilleures propriétés diélectriques des liquides synthétiques. C'est pour cette raison que l'huile minérale est couramment utilisée dans cette application. Cependant, lorsque la résistance au feu devient le paramètre principal, le transformateur est imprégné d'huile de silicone ou d'ester. Ces produits sont ininflammables, tout comme les polychlorobiphényles (PCB). En revanche, ils ont un point d'inflammation très élevé (> 300 °C), ce qui limite le risque d'inflammation des liquides. Il convient de noter que l'utilisation des PCB a été interdite il y a environ deux décennies en raison des effets nocifs sur l'environnement. Le tableau I.1 montre les différents types d'huile utilisés dans divers 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 | | | | |

Tableau I.1. Choix du liquide isolant pour différents types de transformateurs.

I.7.2. Isolants solides :

Les matériaux isolants solides appliqués tels que le papier, compressé, le cylindre isolant et le carton sont faits à partir des matériaux celluloseux qui constituent le meilleur compromis technico-économique de l'isolation du système imprégné dans les transformateurs de puissance.

I.7.2.1. 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.

Selon leur nature, les isolants solides sont regroupés en deux catégories : organique ou inorganique.

I.7.2.2. Les principaux isolants inorganiques regroupent :

Les verres : essentiellement utilisés pour l'isolement des lignes électriques aériennes et sous forme de fibres dans les isolations composites où ils améliorent les propriétés mécaniques de pièces isolantes plastiques.

Les céramiques et oxydes : largement répandus dans 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 de tension nominale comprise entre 1 et 30 kV.

I.7.2.3. Les isolants organiques :

Largement utilisés 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. Ils se subdivisent entre matériaux naturels (caoutchoucs, paraffine et papier) et synthétiques (élastomères, polymères et composites).

I.7.2.4. Cartons et le papier :

De par leur nature diélectrique, les cartons et les papiers 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.

La composition chimique du bois des cartons est complexe. La plus grande partie des substances composant le bois est constituée par des polymères. Les composants peuvent être classés suivant leur proportion dans l'ordre suivant.

- 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...[7]

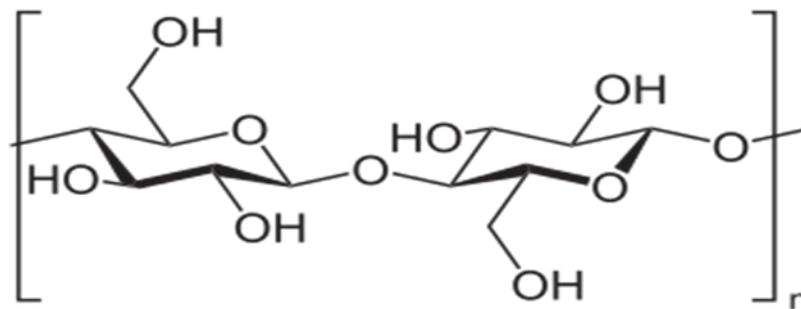


Figure I.11. Formule de la cellulose.

I.8 Conclusion :

Nous avons rappelé dans ce chapitre le principe de base concernant le transformateur. On a également présenté les différentes technologies utilisées dans la construction des transformateurs ainsi que les différents types de matériaux isolants utilisés.

CHAPITRE II

Essais diélectriques et méthodes de calcul

II.1. Introduction :

Les surtensions dans le réseau peuvent être dues aux modifications brutales des caractéristiques du transformateur tel que l'exploitation, rupture de mise à la terre. Tout transformateur neuf doit pouvoir obligatoirement subir en fin de fabrication tous les essais électriques pour vérifier qu'il peut bien tenir les surtensions de manœuvre ou celles dues aux conditions atmosphériques (choc de foudre).

Dans ce chapitre on va considérer l'essai de tenue aux chocs de foudre pour le dimensionnement du système d'isolation du transformateur, en particulier l'essai dit OP « onde pleine ».

II.2. Choc de foudre en onde pleine :

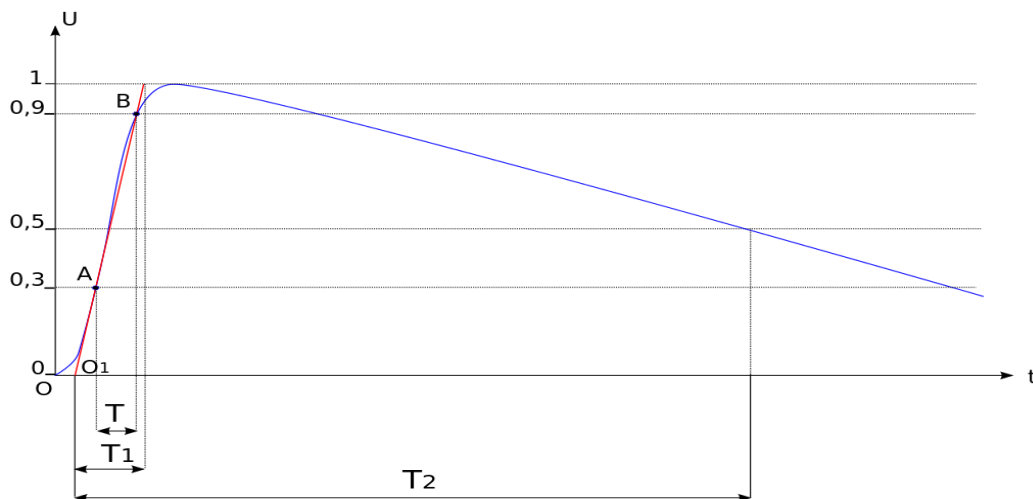


Figure II.1. Forme normalisée d'un choc de foudre à onde pleine.

L'essai de choc de foudre permet de démontrer qu'un appareil électrique résiste à la chute de la foudre dans sa proximité. Par ailleurs, des phénomènes de réflexions apparaissent dans les lignes dans ce cas, l'appareil doit également pouvoir y faire face

L'onde de choc de foudre normalisée est caractérisée par un front très rapide, le temps de montée, T_1 est égal à $1,2 \mu\text{s}$ (tolérance $\pm 30 \%$). Le temps de mi-valeur, T_2 , vaut quant à lui $50 \mu\text{s}$ (tolérance $\pm 20 \%$). Afin de permettre une mesure précise du temps de montée, on fait passer une droite entre le point correspondant à 30% de la valeur crête de la tension (A sur la

figure) et celui correspondant à 90 % (B sur la figure). L'intervalle de temps entre le point A et B est noté T. L'intersection de cette droite avec l'axe des abscisses est l'origine virtuelle, notée O1, qui généralement diffère de l'origine. Les temps T1 et T2 sont mesurés à partir de cette dernière. L'intersection de cette droite avec la valeur de crête permet de déterminer T1.

Autrement dit $T_1 = \frac{T}{0.6}$. T₁ n'est donc pas le temps de crête. T₂ correspond à la durée entre l'origine virtuelle et le moment où la tension repasse en dessous de 50 % de la valeur crête de l'onde.

II.3. Choc de foudre en onde coupée :

Lors de chute de foudre, il peut arriver qu'un arc électrique se forme entre un élément sous haute tension et la terre. La tension monte alors rapidement sous l'effet de la foudre, puis chute brutalement quand l'arc électrique apparaît. En outre, les parafoudres qui protègent les postes électriques produisent le même phénomène. Le choc de foudre en onde coupée sert à reproduire ce phénomène sur l'installation

Lors de sa phase de montée le choc de foudre en onde coupée est identique au choc de foudre en onde pleine. Lorsque la valeur d'essai est atteinte, un dérivateur est activé et la tension chute. Une droite est tracée entre le point correspondant à 70 % de la valeur crête de la tension lors de la descente (C sur la figure) et celle correspondant à 10 % (D sur la figure). La durée entre l'origine virtuelle et l'intersection de cette dernière droite avec la droite correspondant à la valeur de crête est appelée temps de coupure. Il est compris entre 2 et 5 μ s

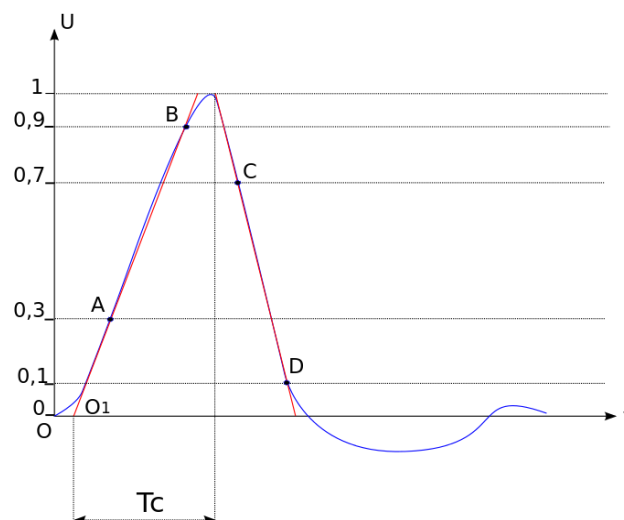


Figure II.2. Forme normalisée d'un choc de foudre à onde coupée.

II.4. Calcul des contraintes électriques dans l'huile :

Nous avons présenté dans le chapitre précédent une description des cartons utilisés dans l'isolation des bobines du transformateur. Leur rôle principal est d'assurer l'isolation des bobines entre elles, et entre bobines et masse. Ces cartons assurent également une fonction importante pour la tenue diélectrique de l'huile isolante dans laquelle ils sont immergés. Sachant que la rigidité diélectrique augmente en réduisant l'espace d'huile, les cartons sont aussi utilisés pour subdiviser les grands espaces d'huile. Pour calculer le niveau de contrainte électrique supporté par un volume ou un espace d'huile, les constructeurs de transformateur développent souvent leurs propres méthodes de calcul empirique établies suite à de nombreux essais diélectriques. Nous présenterons dans ce qui suit une méthode communément utilisée dans l'industrie du transformateur et que nous utiliserons dans notre étude (au chapitre 4) pour calculer le niveau de contraintes électriques dans l'huile.

II.4.1. 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) ont une influence non négligeable sur la tenue diélectrique.

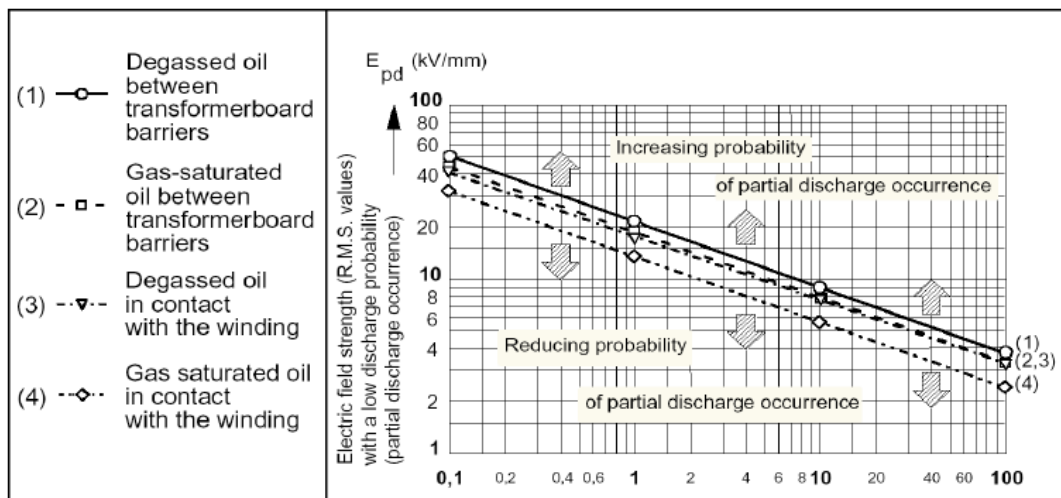


Figure II. 3. Variation du champ électrique « Epd » en fonction de la distance pour différentes configurations (courbes Weidmann)

La figure II.3 montre la variation de « Edp » en fonction de la distance dans l’huile. « Edp » étant la valeur du champ électrique correspondant à 1% de probabilité d’apparition de décharges partielles. 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:

$$E_{dp} = A d^{-0,37} \text{ (kV/mm)} \tag{2.1}$$

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.4.2. Exemple de calcul avec la méthode « Weidmann »

Pour mieux comprendre la méthode de calcul « Weidmann », on présente le modèle suivant : On considère un volume d’huile (propre) pris entre deux électrodes plan-plan, dont une est isolée avec un carton de 2mm d’épaisseur (l’électrode HT). Les électrodes sont séparées par une distance de 100mm. Appliquons en suite une tension de 350kV entre les deux électrodes.

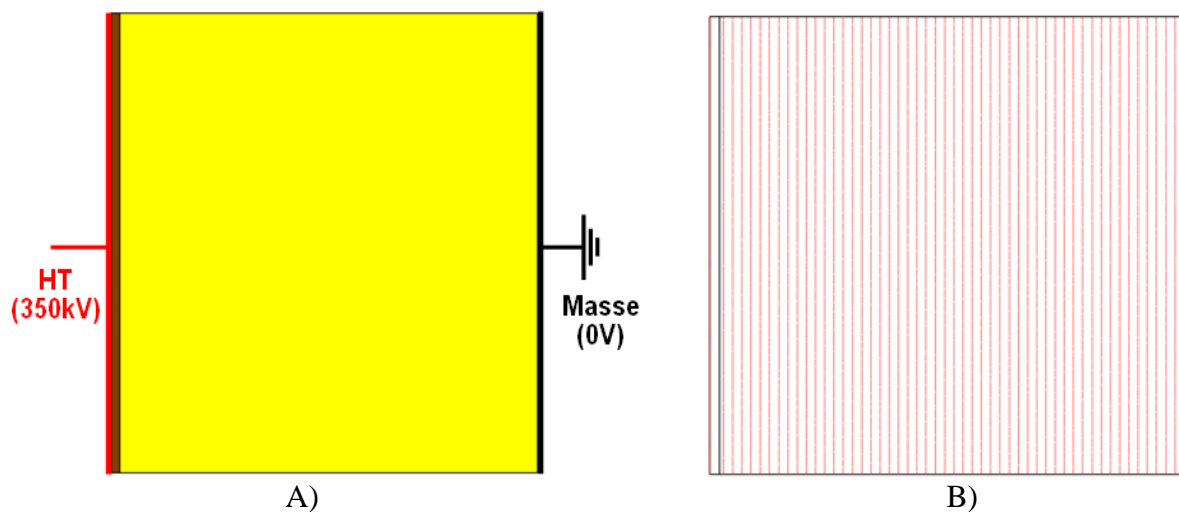


Figure II.4. A) Configuration géométrique du modèle. B) Répartition uniforme des lignes équipotentielles.

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

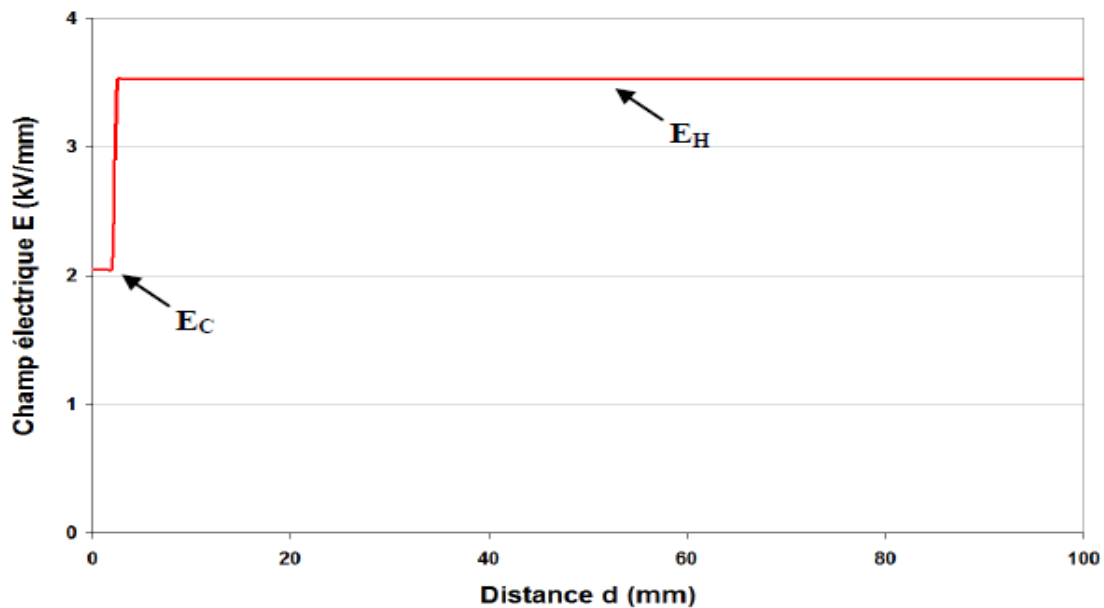


Figure II.5. Champ électrique uniforme dans l'huile.

A cause de la différence de permittivité entre le carton et l'huile, le champ électrique E_C dans le carton sera plus faible (figure II.5). Il sera égal à environ $2,1\text{kV}/\text{mm}$ selon le rapport suivant:

$$\frac{E_C}{E_H} = \frac{\epsilon_h}{\epsilon_c} \approx 0,6 \quad (2-2)$$

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

$$E_{adm} = 14,5 d^{-0,37} = 14,5 \times 98^{-0,37} = 2,66 \text{ kV}/\text{mm}$$

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).

Le champ électrique moyen dans l'huile ($3,5\text{kV}/\text{mm}$) est donc supérieur à la valeur admissible calculée par la méthode Weidmann ($2,65\text{kV}/\text{mm}$). On obtient ainsi une marge de sécurité

négative de -32% (voir figure II.6). Cette situation est inacceptable car l'espace d'huile ne peut pas tenir la contrainte électrique qui lui est imposé et pourrait éventuellement mener à l'apparition de décharges partielles, voir au claquage dans l'huile.

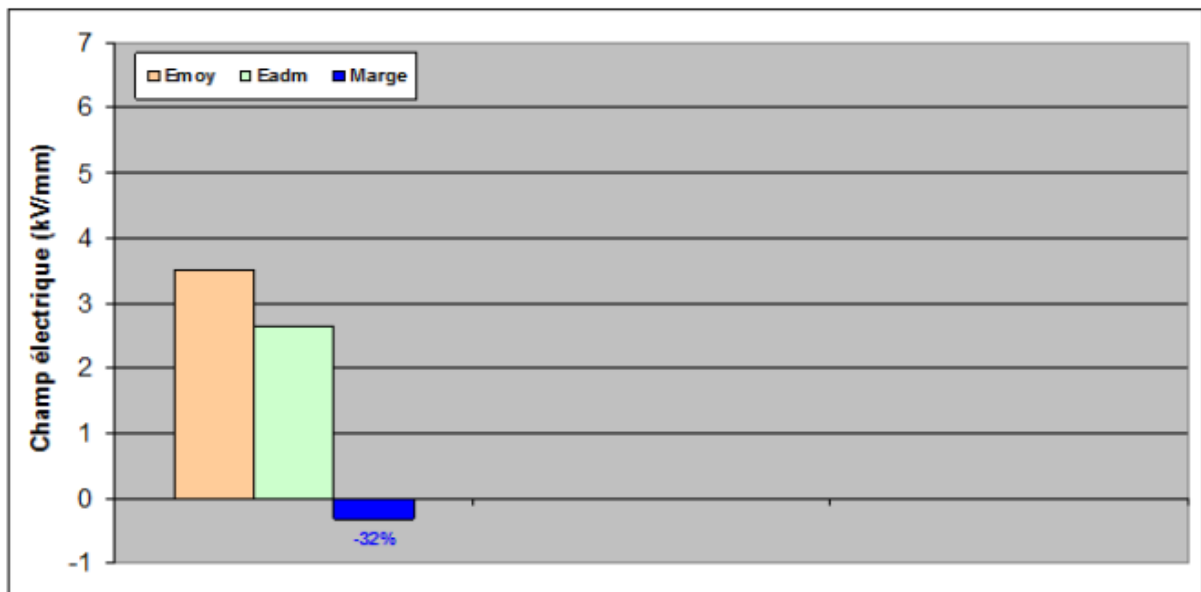


Figure II.6. Comparaison entre la valeur moyenne et la valeur admissible du champ électrique dans l'huile (configuration avec $A=14,5$).

Par conséquent, il faut donc subdiviser le volume d'huile de telle sorte à toujours garder le champ électrique dans l'huile en dessous de la valeur admissible calculée avec 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 :

-Le premier canal d'huile (coté HT) se trouve entre une électrode isolée avec du carton (la HT) et une autre barrière carton, ce qui correspond à la configuration N°2 du tableau II.2. On utilisera donc un coefficient $A=17,5$ pour calculer la valeur admissible du champ électrique dans ce premier canal ($E_{adm1} = 17,5 d_1^{-0,37}$).

-Le deuxième canal d'huile (au milieu) se trouve entre deux barrières carton, ce qui correspond à la configuration N°1 du tableau II.2. On utilisera donc un coefficient $A=21$ pour calculer la valeur admissible dans ce canal ($E_{adm2} = 21 d_2^{-0,37}$).

-Enfin, le troisième canal d'huile (coté masse) se trouve entre une barrière carton et une électrode nue (la masse), ce qui correspond à la configuration N°3. On utilisera donc un coefficient $A=14,5$ pour ce canal avec ($E_{adm3} = 14,5 d_3^{-0,37}$).

Le champ électrique moyen de chaque canal d'huile est comparé ensuite avec sa valeur admissible calculée avec les coefficients de Weidmann. On obtient ainsi des marges positives de 30% ; 41% et 11% pour respectivement le premier canal (coté HT), le second et le troisième canal (coté masse) comme le montre la figure II.8

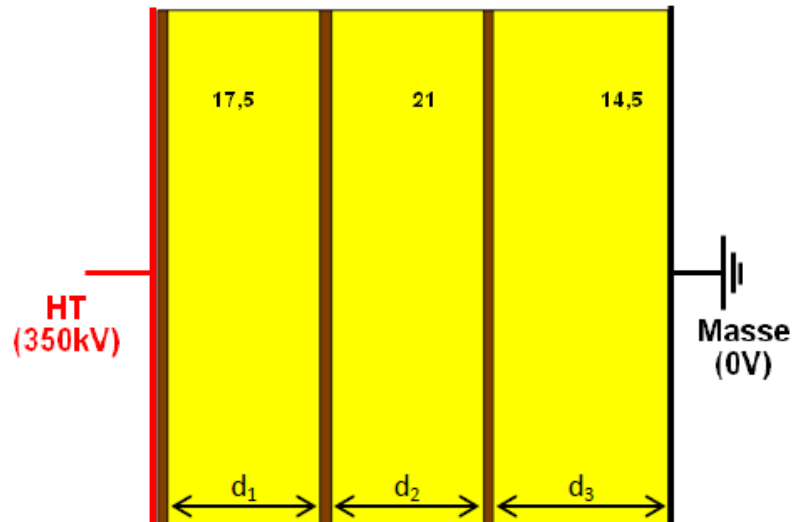


Figure II.7. Subdivision du volume d'huile en trois canaux à l'aide des barrières carton.

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

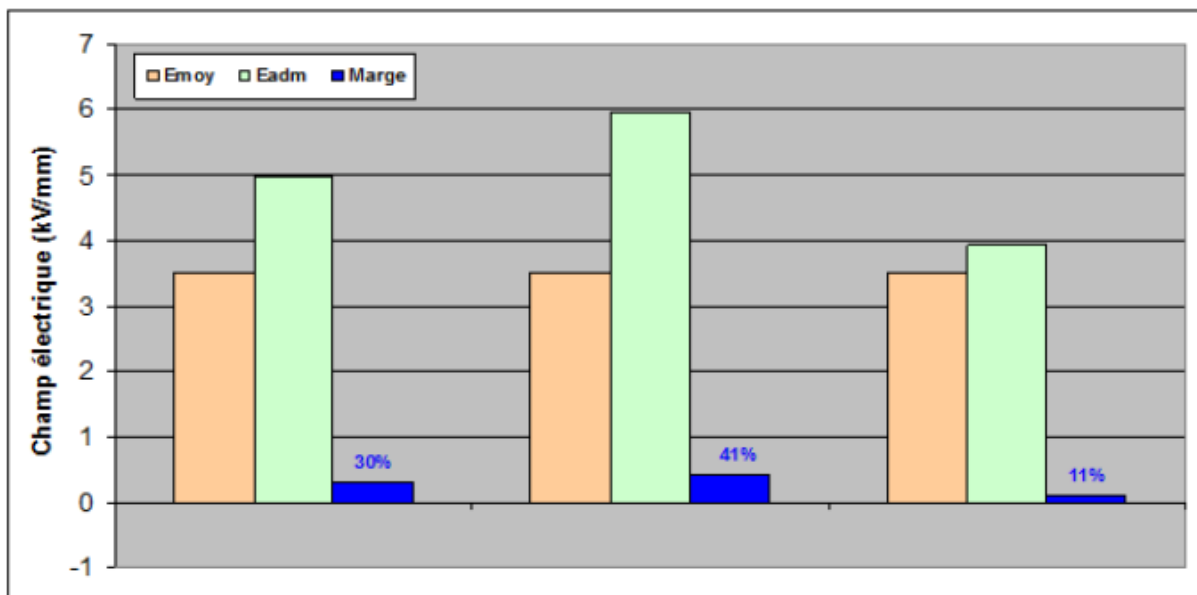


Figure II.8. Marges de sécurité positives dans les trois canaux d'huile.

On peut donc optimiser encore mieux le niveau de contraintes électriques dans les trois canaux en modifiant judicieusement l'emplacement des barrières carton dans le volume d'huile (figure II.9). 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 [8].

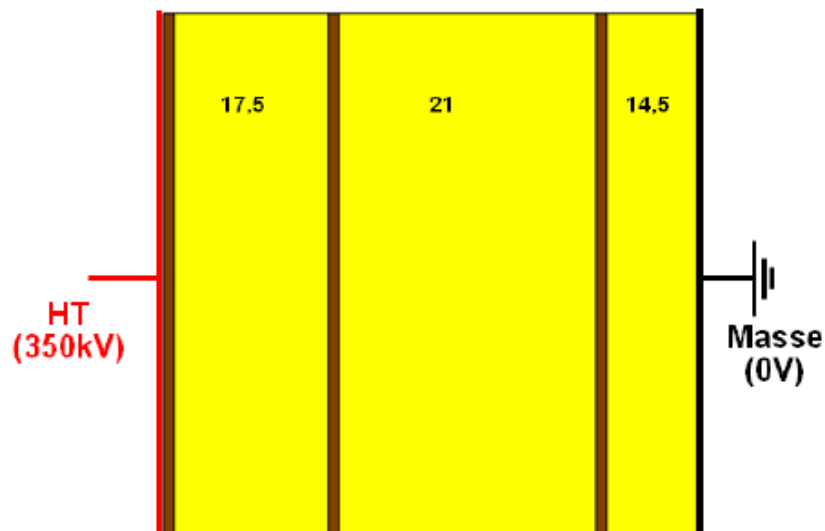


Figure II.9. Modification de l'emplacement des barrières carton.

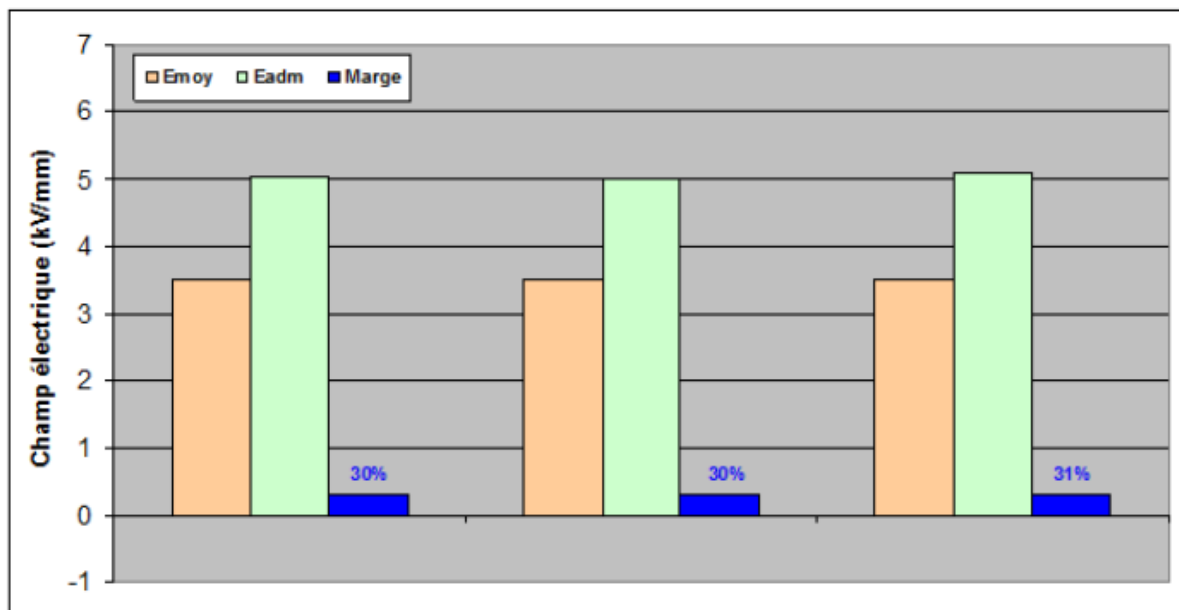


Figure II.10. Optimisation des marges de sécurité sur les trois canaux d'huile.

II.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté l'essai diélectrique réalisé sur les transformateurs de puissance pour vérifier sa tenue aux surtensions dues aux chocs de foudre.

Nous avons également présenté en détail la méthode "Weidmann" utilisée dans notre étude. Des calculs de contraintes électriques dans les enroulements d'un transformateur de traction seront présentés plus tard dans le dernier chapitre en utilisant cette méthode.

CHAPITRE III

*Présentation de l'étude de
simulation*

III.1. Introduction :

Les transformateurs de puissance sont utilisés dans différentes applications. Ils existent dans les réseaux électriques, les usines de production, les stations de distribution, les usines, les trains, etc. (Figure III.1).

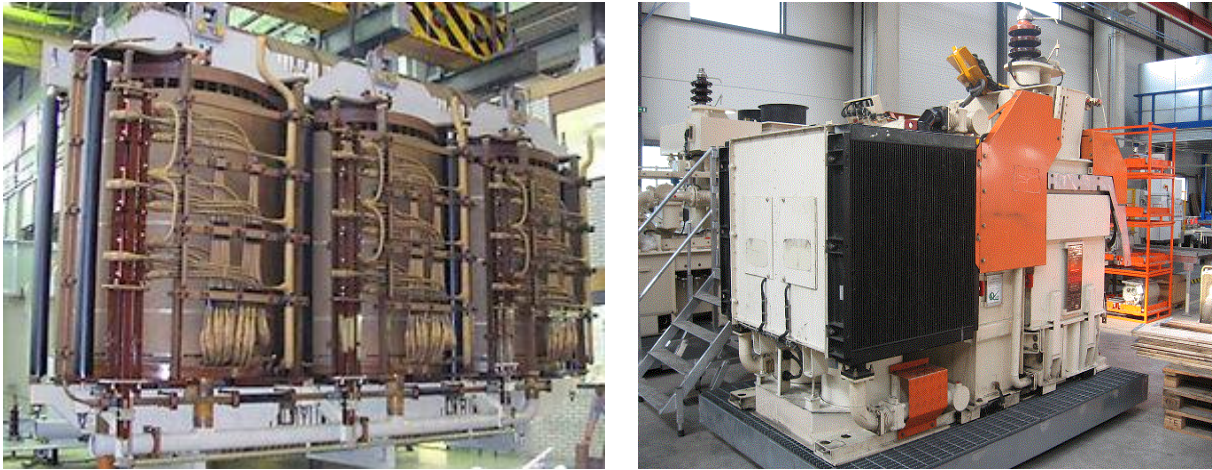


Figure III.1. -Autotransformateur 400/220kV .[9] - Transformateur de traction TGV. [9]

Ce chapitre présente la partie simulation réalisée avec le logiciel Flux 2D, du système d'isolation d'un transformateur de puissance 25kV/1kV/0,5kV. Ce dernier, fabriqué en technologie cuirassé pour la traction ferroviaire (trains électriques) est présenté dans la figure III.2. Le but étant de comparer entre quatre configurations de son système d'isolation en calculant les contraintes électriques dans le bobinage afin de choisir la plus optimale d'entre elles.

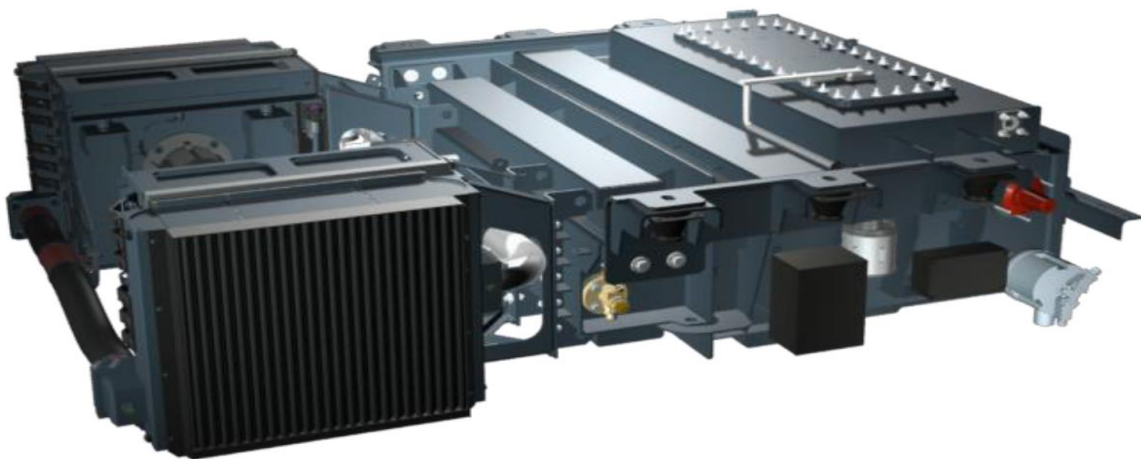


Figure III.2. Vue générale sur le transformateur de traction étudié.

III.2. Logiciel de simulation :

Les logiciels à éléments finis modernes sont souvent à structure modulaire où les différentes étapes de résolution suivantes sont séquentiellement exécutées :

- Introduction des données géométriques et des propriétés physiques.
- Maillage.
- Résolution.
- Exploitation des résultats.

Logiciel FLUX-2D :

C'est un logiciel de modélisation par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant des régimes évolutifs. Le logiciel permet de calculer et de visualiser les grandeurs utiles à l'ingénieur, pour des dispositifs bidimensionnels ou à symétrie de révolution comportant des matériaux à caractéristiques linéaires ou non, isotropes ou non.

La résolution d'un problème fait appel à des modules spécialisés:

1 – Module pré-processeur

Permet, à travers plusieurs modules, de définir la géométrie du dispositif à étudier (PREFLU), de choisir et/ou de construire une banque de matériaux (CLSMAT), d'affecter les propriétés physiques aux différentes régions géométriques prédéfinies (PROPHY) et de définir le schéma et/ou les données du circuit électrique (CIRFLU). Il permet également un maillage automatique d'une géométrie 2D prédéfinie (PREFLU).

2 – Module processeur

Constitué principalement d'un module de résolution 2D (SOLVER_2D) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques.

3 – Module post-processeur de Flux-2D (PostPro_2D)

Permet, entre autres, de tracer les équipotentielles ou les lignes de flux, le maillage, la géométrie et les courbes 2D ou 1D selon un chemin prédéfini. Il permet aussi de calculer des grandeurs globales telles que le couple ou la force appliqués à un contour fermé, les

inductions, les flux, les inductances, etc. De façon générale, l'enchaînement des programmes de Flux-2D, doté d'une interface de Windows est schématisé par la figure III.3

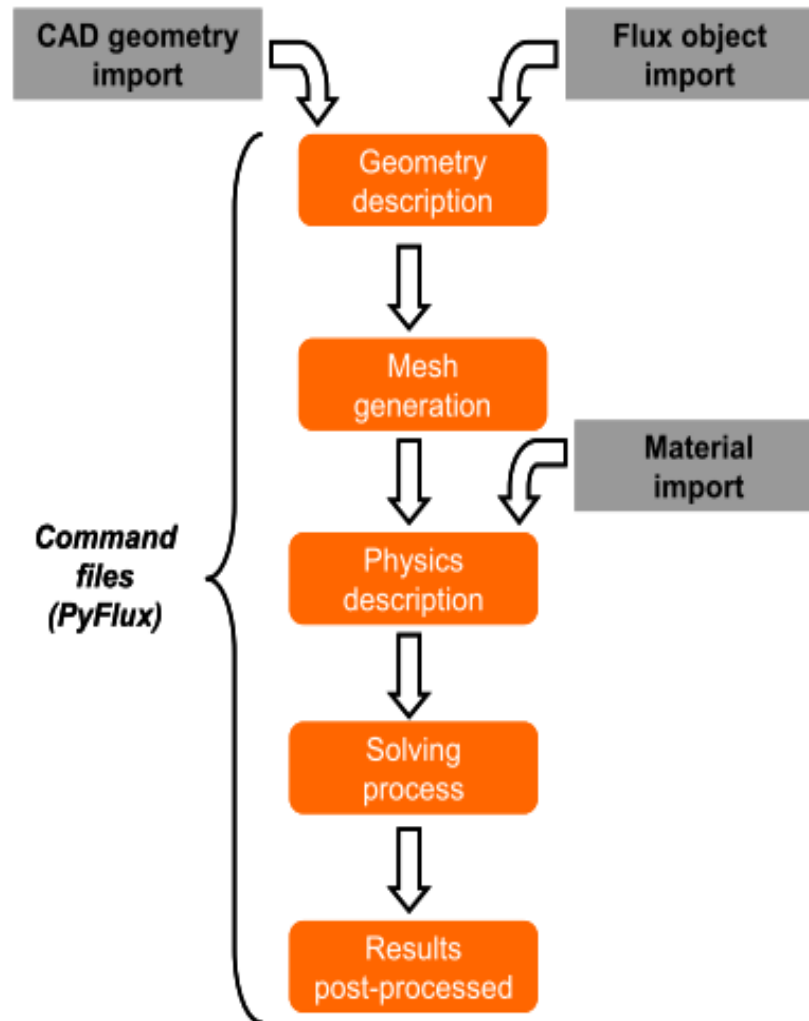


Figure III.3. Schéma des différents modules du logiciel Flux-2D. [10]

III.3. Géométrie du model :

La figure III.4 présente une vue générale du bobinage du transformateur étudié. On y voit des vues en coupe détaillées montrant l'arrangement typiquement « cuirassé » des bobines (schématisées en rouge) et des cartons isolants (en vert) qui les séparent.

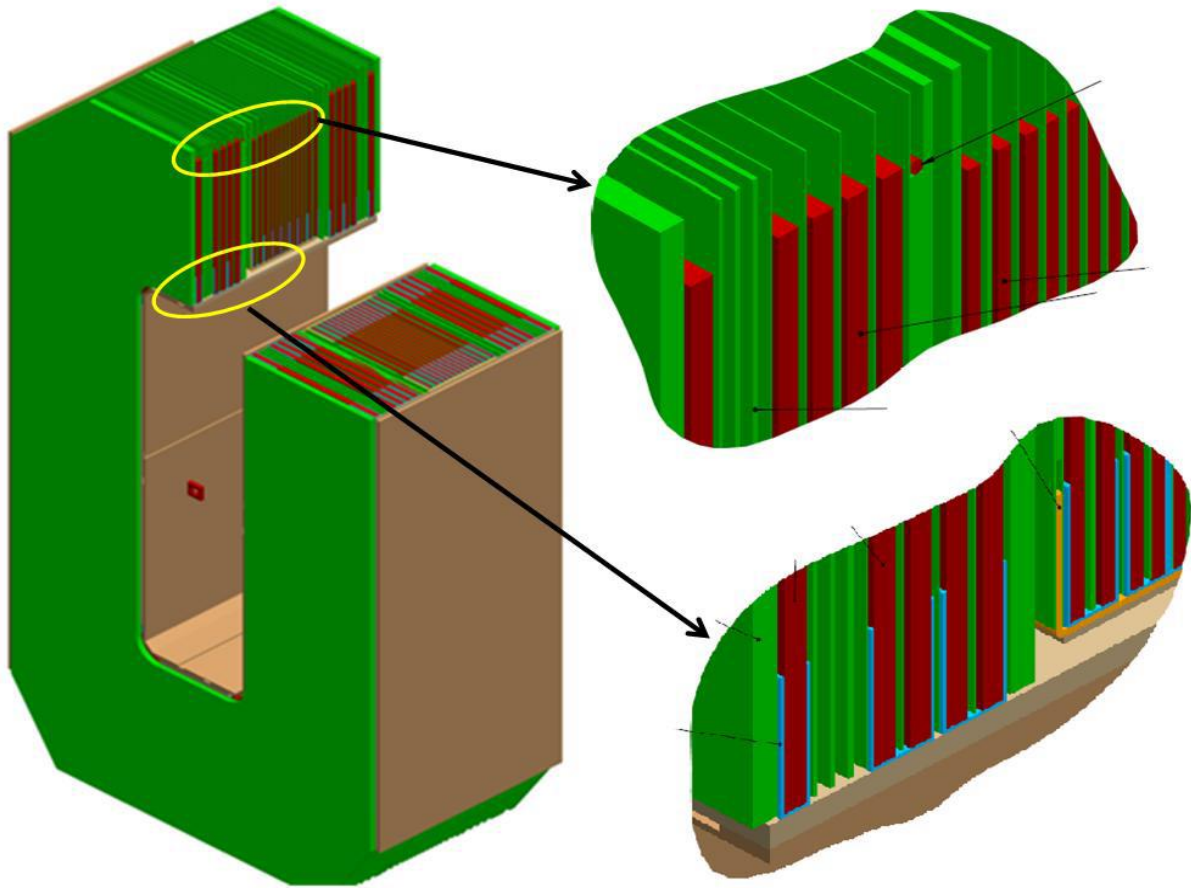
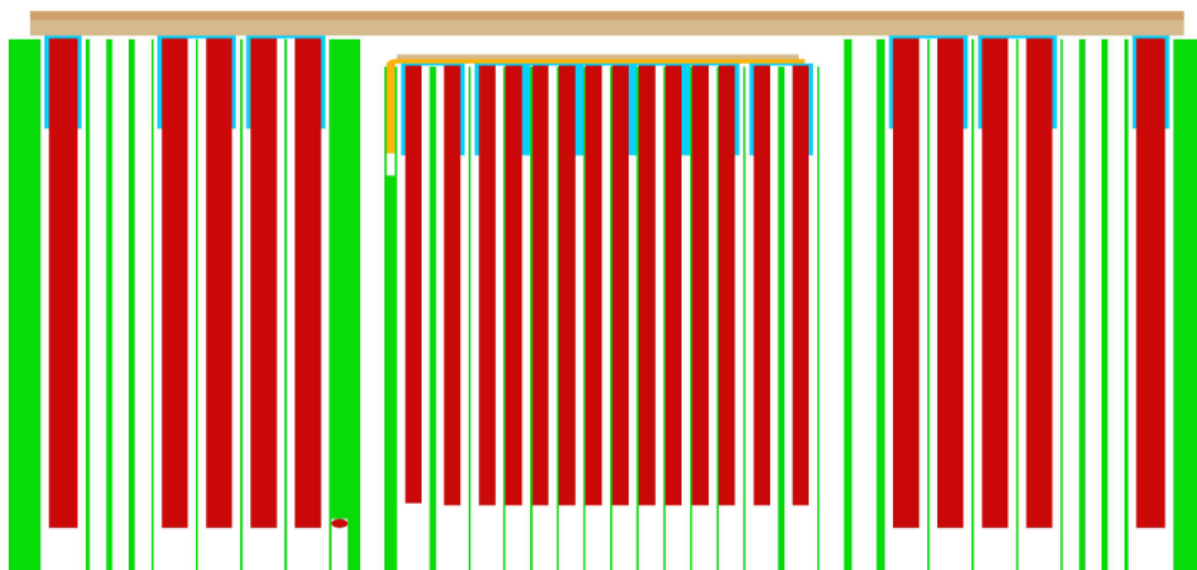
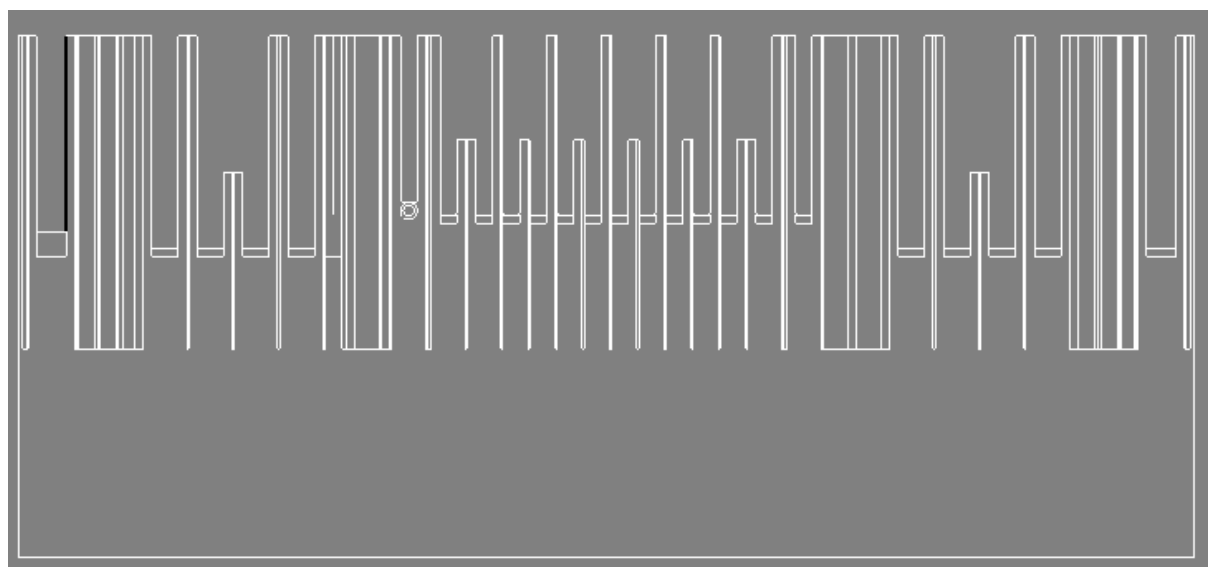


Figure III.4. Vues 3D en coupe du bobinage (bobines en rouge – cartons isolants en vert)

En réalisant une vue de coupe totale qui englobe toutes l'épaisseur du bobinage (figure III.5.A), on obtient la vue utilisée dans Flux 2D présentée dans la figure III.5.B.



-A-



-B-

Figure III.5 : A) Coupe 2D du bobinage. B) Géométrie utilisée dans Flux 2D

II.4. Maillage de la géométrie :

Les figures suivantes montrent le maillage réalisé sur la coupe de bobinage. Les zones les plus intéressantes pour nos calculs ont été maillées plus finement afin d'avoir des résultats plus précis. Ces zones se trouvent entre les bobines ainsi qu'à leurs extrémités comme le montre la figure III.6.

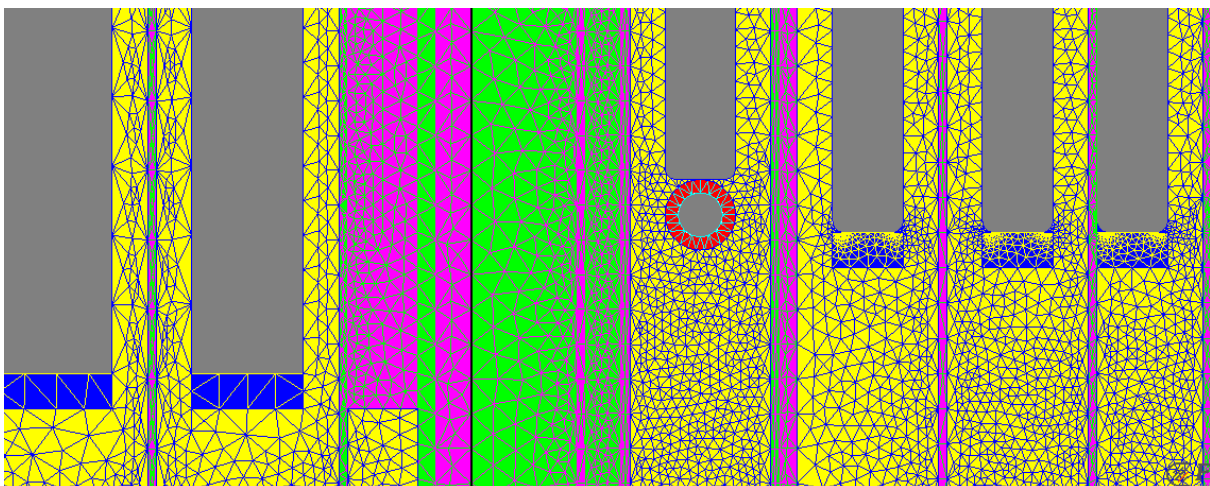
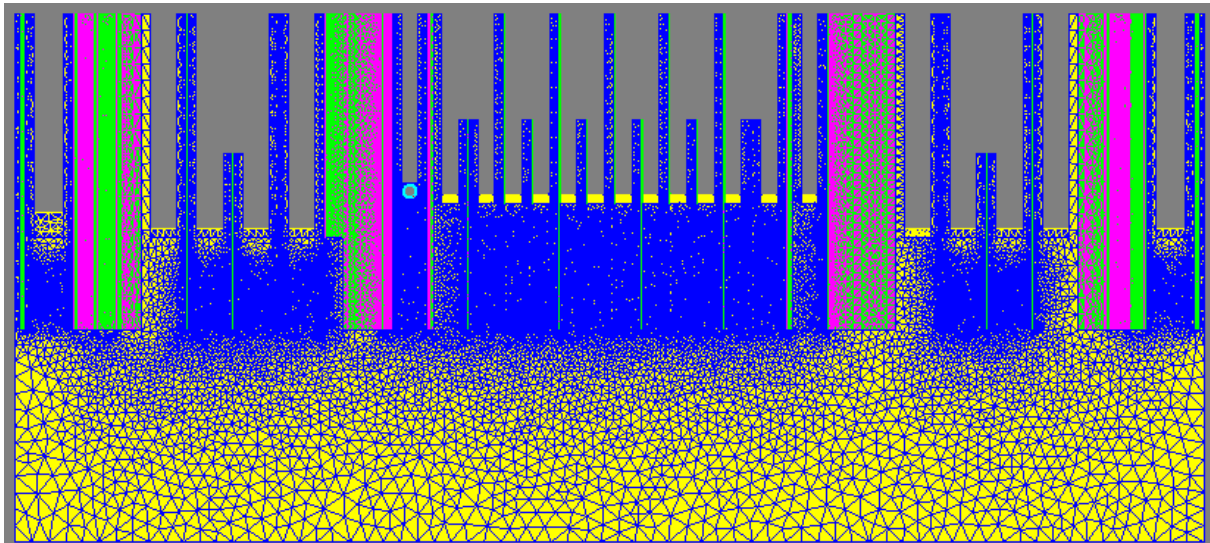


Figure III.6 : Vue sur le maillage global de la géométrie et zoom sur le maillage le plus fin.

III.5. Physique du model :

Cette partie est la dernière étape avant la résolution du model. Elle consiste à affecter des matériaux aux différentes faces du model (régions surfaciques) et des potentiels aux régions linéiques (contours des faces).

| | Matière | Matériaux | Permittivité |
|--|--------------------------|------------------|--------------|
| | Bourrage | Carton | 3.8 |
| | Pièce isolante | | |
| | Huile silicone | Xiameter PMX-561 | 2.7 |
| | Isolation spire de garde | Nomex T410 | 3.7 |

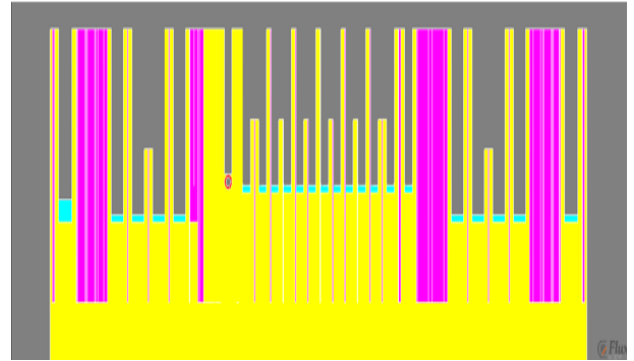


Tableau III.1. Matériaux affectés aux faces du model (régions surfaciques).

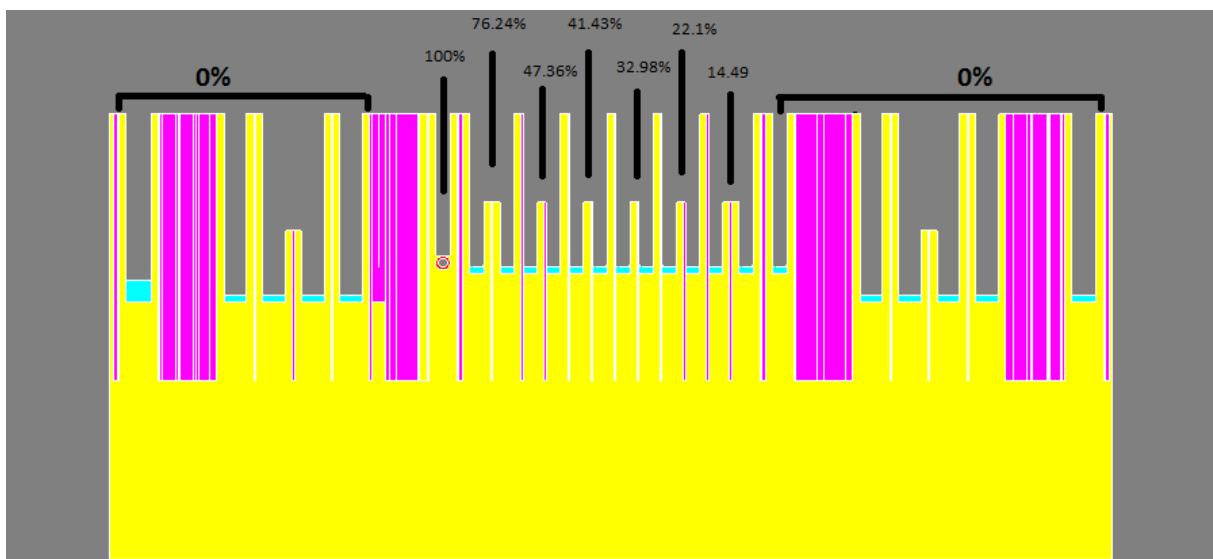


Figure III.7. Répartition en % de la tension d'essai OP à $t = 0,5\mu\text{s}$ (100% = 147kV)

Dans notre étude, on réalisera des calculs du champ électrique qui règne dans le bobinage quand il est soumis à l'essai de choc de foudre en onde pleine (OP). La valeur du BIL (Basic Insulation Level) appliquée à la bobine HT lors de l'essai OP est de 170kV, c'est-à-dire que le niveau de tension correspondant à la crête de l'onde est de 170kV à $t=1.2\mu\text{s}$.

Nous avons considéré dans notre étude un instant de l'onde de choc pendant lequel le bobinage est le plus contraint électriquement. Cet instant correspond à $t = 0,5\mu\text{s}$ de l'onde :

Essai OP à $t = 0,5\mu\text{s}$ (la tension appliquée au bobinage atteint 147kV).

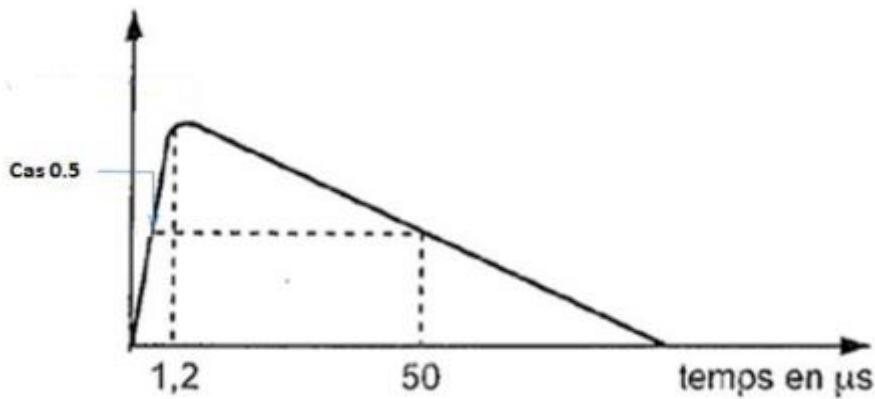


Figure III.8. Instant « t » dans l'onde OP considéré dans l'étude ($t=0,5\mu\text{s}$).

III. 6. Configurations d'isolation étudiées

Quatre configurations d'isolation ont été considérées dans notre étude. La différence entre elles réside dans le nombre de cartons placés dans la zone la plus contrainte du bobinage qui se situe autour de la bobine HT. Cette zone qui nous intéresse le plus est identifiée dans la figure III.9.

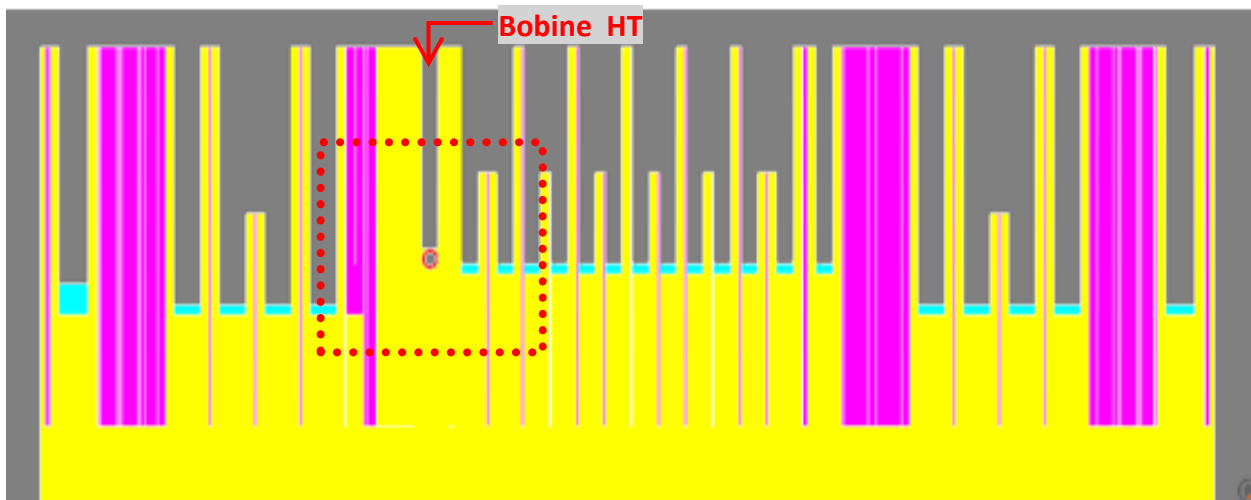


Figure III.9. Repérage de la zone la plus contrainte du bobinage

On ajoute de plus en plus de cartons en allant de la configuration N°1 à la configuration N°4.

La configuration N° 1 contient ainsi le moins de cartons et par conséquent les espaces d'huile autour de la bobine HT sont les plus grands. La configuration N°4 contient une isolation renforcée avec le plus de cartons, ce qui donne des espaces d'huile plus petits.

Les quatre configurations sont détaillées dans les figures suivantes qui montrent une vue agrandie de la zone autour de la bobine HT.

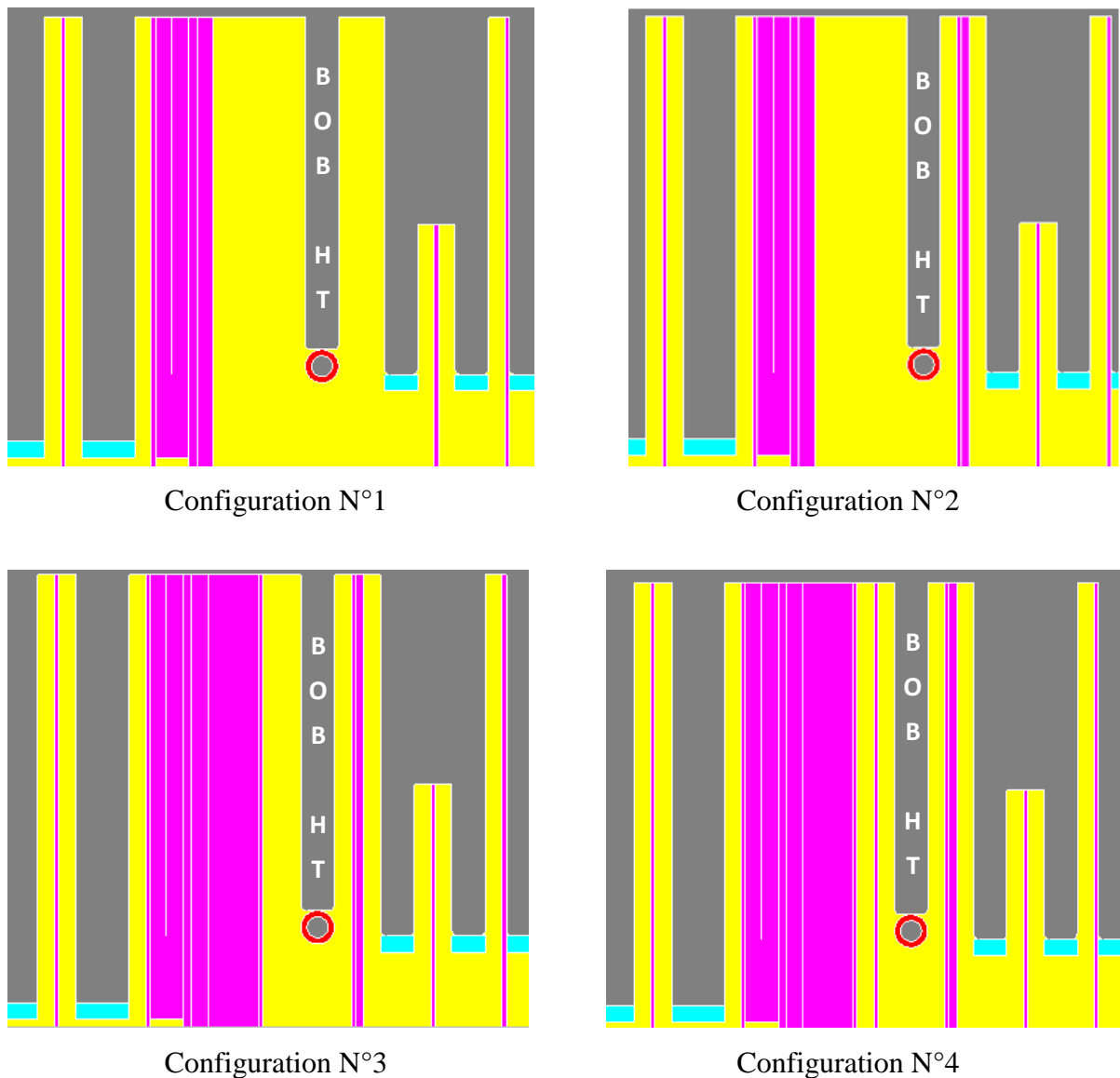


Figure III.10. Vue agrandie sur les quatre configurations d'isolation autour de la bobine HT.

III.7. Conclusion :

Nous avons introduit les informations détaillées sur l'utilisation du logiciel Flux 2D pour simuler le calcul de la contrainte électrique dans l'huile.

A l'aide des éléments introduits ici, nous pouvons facilement calculer dans le chapitre suivant la véritable contrainte qui apparaît dans les enroulements du transformateur.

Chapitre IV
Calculs et analyse des
résultats

IV.1.Introduction :

Dans ce chapitre nous décrivons les résultats des essais obtenus par simulation à l'aide du logiciel Flux 2D. On présentera leur analyse et comparaison avec les calculs basés sur la méthode de « Weidmann » détaillée précédemment dans le chapitre 2.

IV.2. Exploitation des résultats :

Nous présenterons dans ce qui suit les résultats de simulations réalisées pour le calcul du champ électrique qui règne dans le bobinage, quand il est soumis à l'essai de choc de foudre en onde pleine (OP).

La valeur du BIL (Basic Insulation Level) appliquée à la bobine HT lors de cet essai est de 170kV. Cette valeur de tension correspond à la crête de l'onde qui coïncide avec $t=1,2\mu s$. Nous avons considéré dans notre étude un instant de l'onde de choc pendant lequel le bobinage est le plus contraint à $t = 0,5\mu s$ (la tension appliquée au bobinage atteint à cet instant 147kV).

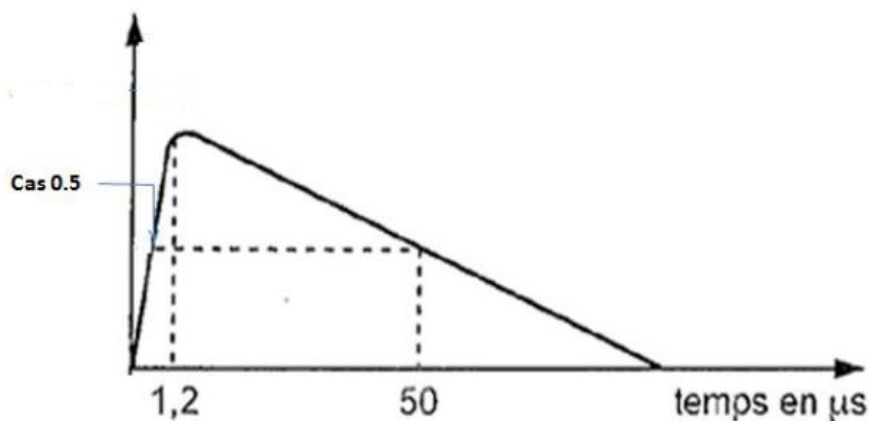


Figure IV.1. Instant « t » de l'onde OP considéré dans l'étude ($t=0,5\mu s$).

Quatre configurations d'isolation différentes ont été étudiées et détaillées dans le chapitre précédent. Nous présenterons les différents moyens d'exploitation offerts par Flux 2D pour la visualisation de la répartition des lignes équipotentielles dans le bobinage ainsi que le dégradé du champ électrique.

IV.3. Configuration N°1 :

La configuration N° 1 contient le moins de cartons autour de la bobine HT et par conséquent les espaces d'huile dans cette zone importante sont les plus grands.

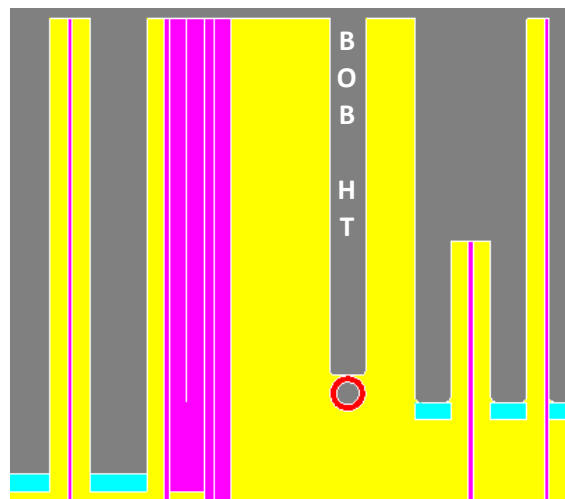


Figure IV.2. Vue agrandie sur l'isolation autour de la bobine HT dans la configuration N°1.

IV.3.1. Répartition des lignes équipotentielles :

La figure IV.3 présente une vue globale du bobinage qui montre une forte concentration des lignes équipotentielles dans les zones les plus contraintes électriquement.

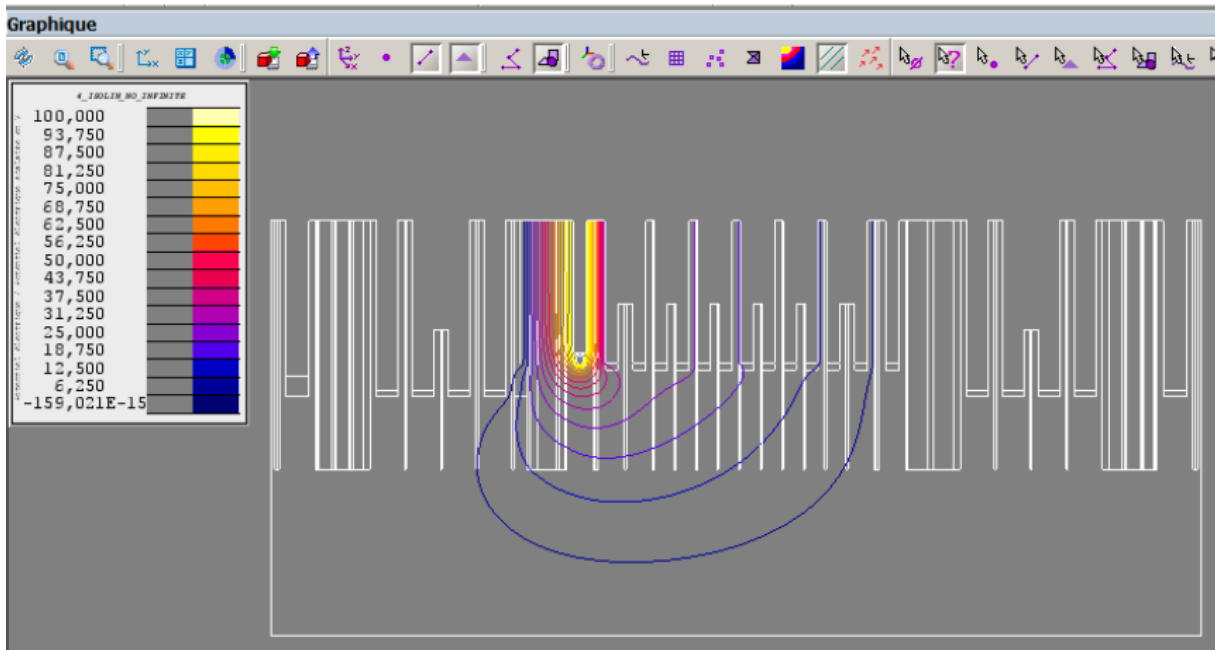


Figure IV.3. Répartition des lignes équipotentielles dans le bobinage.

IV.3.2. Dégradé du champ électrique :

Les zones du bobinage à fort champ électrique se trouvent autour de la bobine HT. Cette dernière est la première bobine par laquelle « transite » l'onde de choc de foudre. La figure IV.4 illustre bien ces zones où règne un champ électrique intense, facilement identifiable à travers les couleurs rouge du dégradé de champs. La figure IV.5 montre en particulier une vue agrandie de la zone la plus contrainte du bobinage autour de la bobine HT.

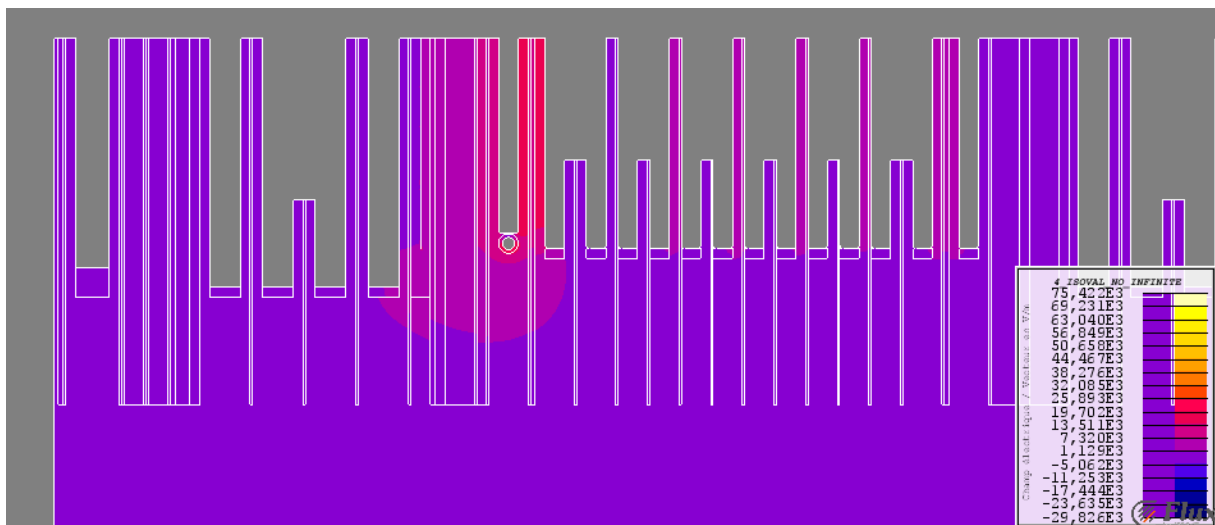


Figure IV.4. Dégradé du champ électrique dans le bobinage.

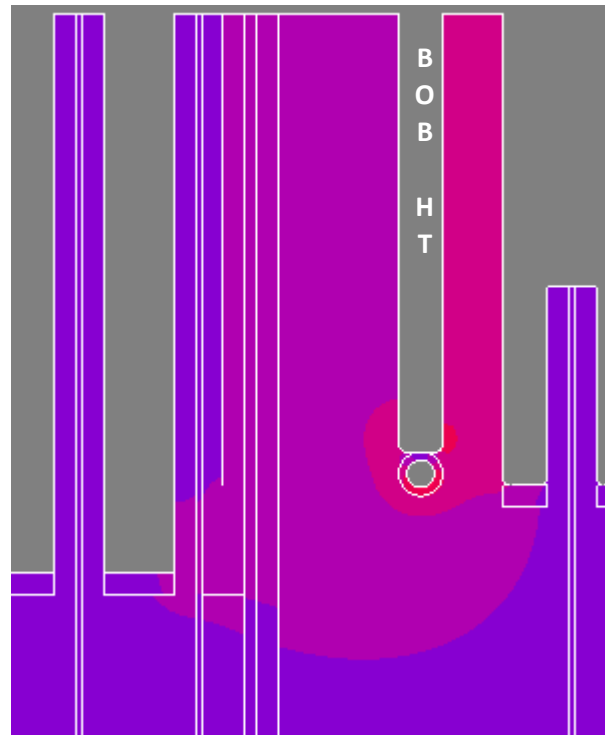


Figure IV.5. Vue agrandie de la zone la plus contrainte dans le bobinage.

IV.3.3. Calcul des contraintes électriques :

Nous allons présenter dans ce qui suit le calcul des contraintes électriques dans l'huile à l'aide de la méthode de « Weidmann » présentée précédemment dans le deuxième chapitre.

On commence d'abord par tracer des « chemins » dans l'huile dans les zones les plus contraintes du bobinage. Ces chemins se trouvent essentiellement entre les bobines dans des canaux d'huile de différente épaisseur (figure IV.6).

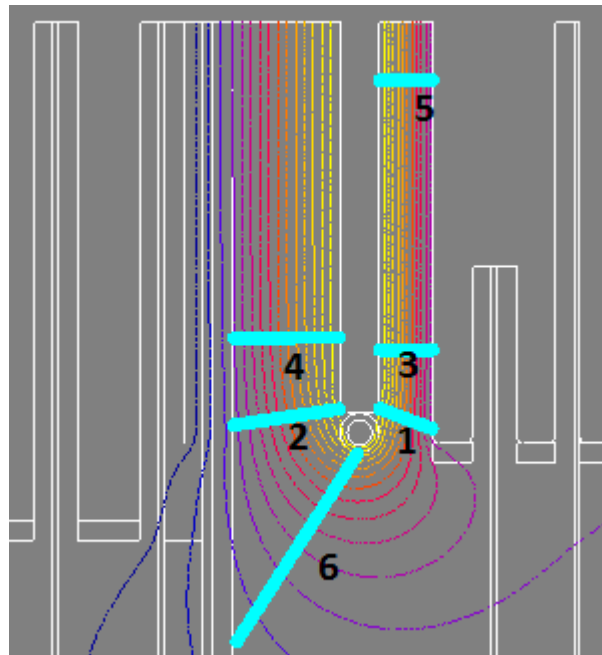


Figure IV.6. Chemins étudiés pour le calcul des contraintes électriques.

Pour un chemin donné et à l'aide du logiciel Flux 2D, on peut connaître la différence de potentiel qui existe entre ses extrémités. En mesurant ensuite sa distance, on peut ainsi calculer le champ électrique moyen. Enfin, ce dernier est comparé avec le champ admissible (à ne pas dépasser) calculé par la méthode de Weidmann.

Le tableau IV.1 résume les calculs de champ électrique réalisés pour chaque chemin de ceux présentés dans la figure IV.6.

Prenons par exemple le calcul réalisé pour le chemin N°1 (1ère ligne du tableau IV.1) :

- La distance du chemin : $d = 5,71\text{mm}$
- La tension réelle qui apparaît sur ce chemin est : $U = 40,75\text{KV}$
- Le champ électrique moyen est donc le rapport de la tension sur la distance :

$$E_{\text{moy}} = U / d = 40.75 / 5.17 = 7.12\text{kV/mm} \quad (4-1)$$

- La valeur du champ électrique admissible sur cette distance d'huile, est selon la méthode de Weidmann :

$$E_{adm} = 17,5 \times 5,71^{-0,37} = 9,17 \text{ kV/mm} \quad (4-2)$$

En comparant donc le champ moyen E_{moy} avec la valeur admissible E_{adm} pour une distance donnée dans l'huile, on peut vérifier si cet espace d'huile peut supporter, ou pas, la contrainte moyenne E_{moy} .

- Donc, pour le chemin 1, on voit bien que le champ moyen 7.12kV/mm ne dépasse pas la valeur admissible 9.18kV/mm, et par conséquent le dimensionnement diélectrique dans cette zone peut être validé.

Cette analyse peut donc être appliquée pour les autres chemins du tableau IV.1 en suivant la même démarche.

| N° | d (mm) | U (kV) | E_{moy} (U/d) | E_{adm} (kV/mm) | marge de sécurité (E_{adm}/E_{moy}) | coef |
|----|--------|--------|--------------------|----------------------|--|------|
| 1 | 5,71 | 40,75 | 7,12 | 9,17 | 1,28 | 17,5 |
| 2 | 10,87 | 44,42 | 4,08 | 7,23 | 1,77 | 17,5 |
| 3 | 5,44 | 41,96 | 7,71 | 9,34 | 1,21 | 17,5 |
| 4 | 10,79 | 44,08 | 4,08 | 7,25 | 1,7 | 17,5 |
| 5 | 5,435 | 41,91 | 7,71 | 9,35 | 1,21 | 17,5 |
| 6 | 22,78 | 40,14 | 1,76 | 5,50 | 3,12 | 17,5 |

Tableau IV. 1. Calcul des contraintes électriques pour différents chemins (Config. N°1).

IV.4. Configuration N°2 :

La configuration N° 2 est similaire à la configuration N°1 sauf qu'elle contient un carton supplémentaire de 1,5mm à droite de la bobine HT (identifié par la flèche rouge dans la

Figure 1,5IV.7). Ainsi le canal d'huile dans ce coté de la bobine HT est subdivisé en deux par l'ajout de cette nouvelle barrière de carton.

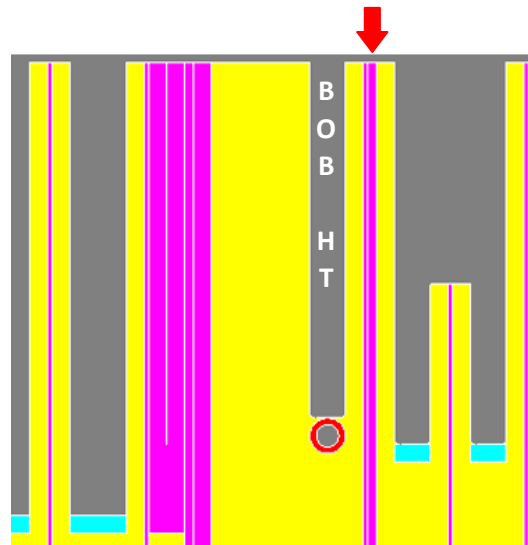


Figure IV.7. Vue agrandie sur la configuration N°2 (la flèche indique le carton rajouté).

La Figure IV.8 montre le dégradé de champ électrique dans la zone autour de la bobine HT. La répartition des lignes équipotentiellles est représentée dans la Figure IV.9.

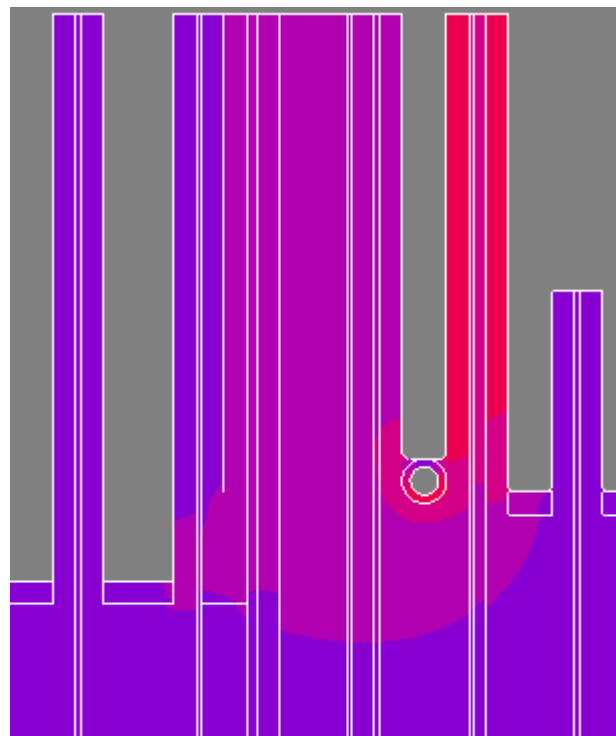


Figure IV.8. Vue agrandie de la zone la plus contrainte dans le bobinage.

De la même manière expliquée dans la configuration N°1, on calcule les contraintes électriques dans l'huile, en commençant d'abord par tracer des « chemins » dans l'huile dans les zones les plus contraintes du bobinage (figure IV.9).

Les résultats de calcul des contraintes électriques sur ces chemins sont indiqués dans le tableau IV.2.

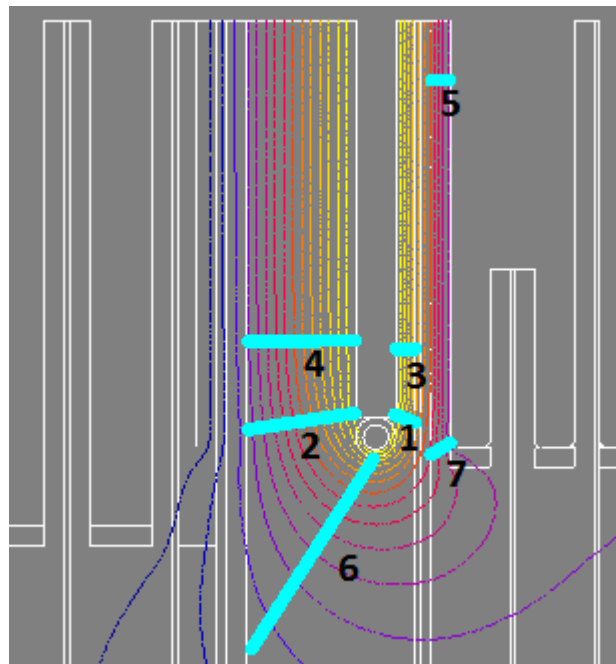


Figure IV.9. Chemins étudiés pour le calcul des contraintes électriques.

| N° | d (mm) | U (kV) | E_{moy} (U/d) | E_{adm} (kV/mm) | marge de sécurité (E_{adm}/E_{moy}) | coef |
|----|--------|--------|--------------------|----------------------|--|------|
| 1 | 2,19 | 18,89 | 8,59 | 13,07 | 1,52 | 17,5 |
| 2 | 10,87 | 44,43 | 4,08 | 7,23 | 1,77 | 17,5 |
| 3 | 1,88 | 15,86 | 8,40 | 13,83 | 1,64 | 17,5 |
| 4 | 10,79 | 44,08 | 4,08 | 7,25 | 1,77 | 17,5 |
| 5 | 1,81 | 15,21 | 8,37 | 14,02 | 1,67 | 17,5 |
| 6 | 22,78 | 39,99 | 1,75 | 5,50 | 3,13 | 17,5 |
| 7 | 2,24 | 12,15 | 5,41 | 12,97 | 2,39 | 17,5 |

Tableau IV.2. Calcul des contraintes électriques pour différents chemins (configuration N°2).

IV.5. Configuration N°3 :

La configuration N° 3 est similaire à la configuration N°2 sauf qu'elle contient un carton supplémentaire de 6,5 mm placé à gauche de la bobine HT (identifié par la flèche rouge dans la figure IV.10.). Ainsi le canal d'huile à gauche de la bobine HT devient plus petit par l'ajout de cette nouvelle barrière de carton.

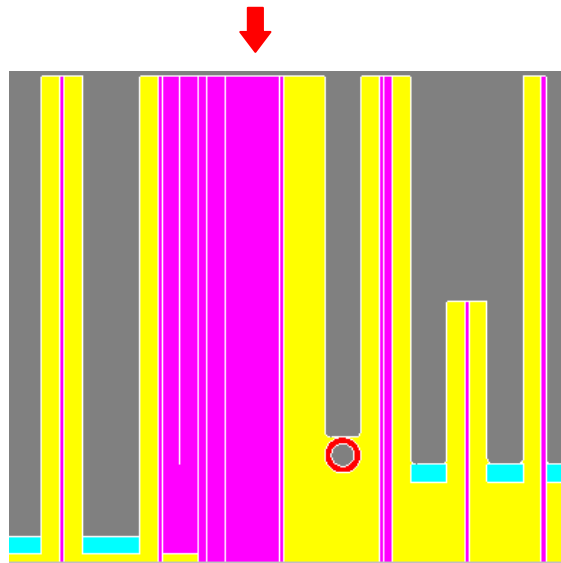


Figure IV.10. Vue agrandie sur la configuration N°3 (la flèche indique le carton rajouté).

La figure IV.11 montre le dégradé de champ électrique dans la zone autour de la bobine HT. La répartition des lignes équipotentielles est représentée dans la figure IV.12.

De la même manière expliquée dans les configurations précédentes, on calcule les contraintes électriques dans l'huile, en commençant d'abord par tracer des « chemins » dans l'huile dans les zones les plus contraintes du bobinage (figure IV.12).

Les résultats de calcul des contraintes électriques sur ces chemins sont indiqués dans le tableau IV.3.

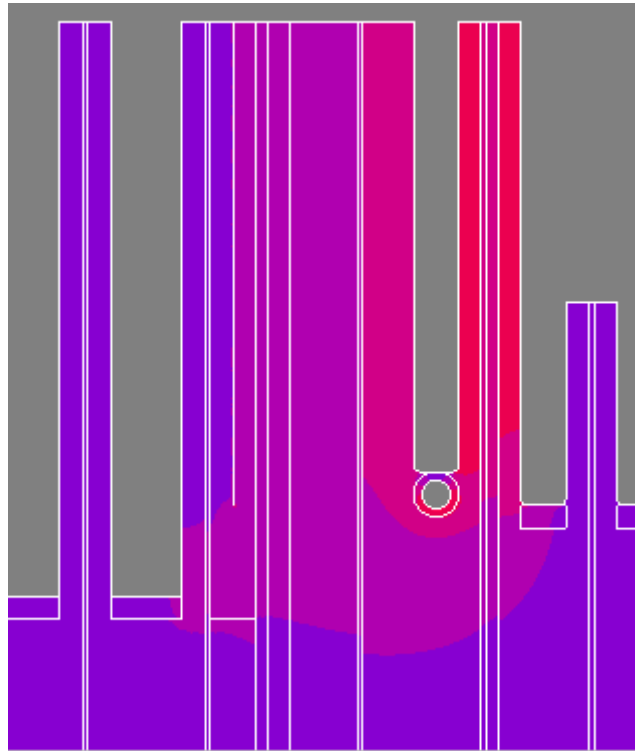


Figure IV.11. Vue agrandie de la zone la plus contrainte dans le bobinage.

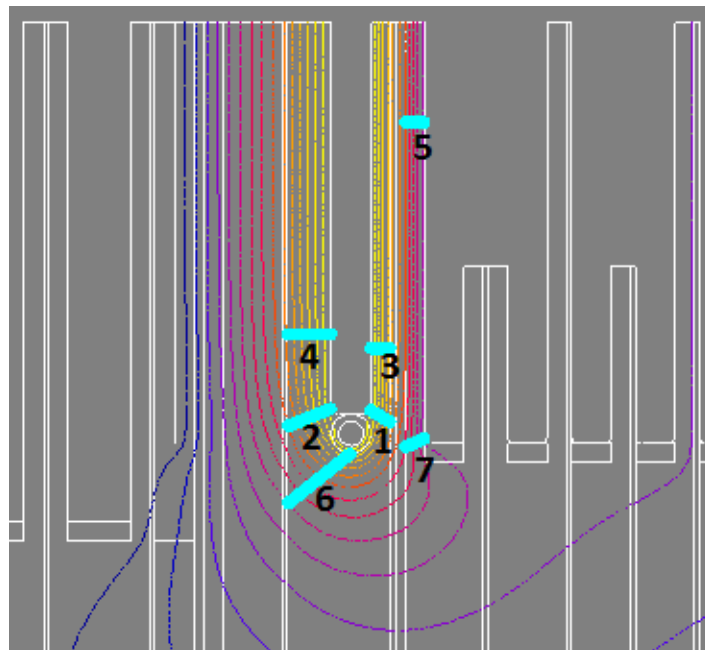


Figure IV.12. Chemins étudiés pour le calcul des contraintes électriques.

| N° | d (mm) | U (kV) | Emoy (U/d) | Eadm (kV/mm) | marge de sécurité (Eadm/Emoy) | coef |
|----|--------|--------|------------|--------------|-------------------------------|------|
| 1 | 2,26 | 18,85 | 8,34 | 12,93 | 1,55 | 17,5 |
| 2 | 4,60 | 24,73 | 5,37 | 9,94 | 1,85 | 17,5 |
| 3 | 1,93 | 16,22 | 8,40 | 13,71 | 1,63 | 17,5 |
| 4 | 4,32 | 20,74 | 4,80 | 10,18 | 2,12 | 17,5 |
| 5 | 1,89 | 15,85 | 8,37 | 13,81 | 1,65 | 17,5 |
| 6 | 8,01 | 27,79 | 3,46 | 8,10 | 2,33 | 17,5 |
| 7 | 2,24 | 12,15 | 5,41 | 12,97 | 2,39 | 17,5 |

Tableau IV. 3. Calcul des contraintes électriques pour différents chemins (Config. N°3).

IV.6. Configuration N°4 :

La configuration N 4 contient une isolation renforcée de la bobine HT avec le plus de cartons, ce qui donne des espaces d'huile plus petits. Elle est similaire à la configuration N°3 sauf qu'on a subdivisé encore le canal d'huile à gauche de la bobine HT en rajoutant un autre carton de 0,5mm (identifié par la flèche rouge dans la figure VI.13.). Ainsi le canal d'huile à gauche de la bobine HT est subdivisé en deux petits canaux par l'ajout de cette nouvelle barrière de carton.

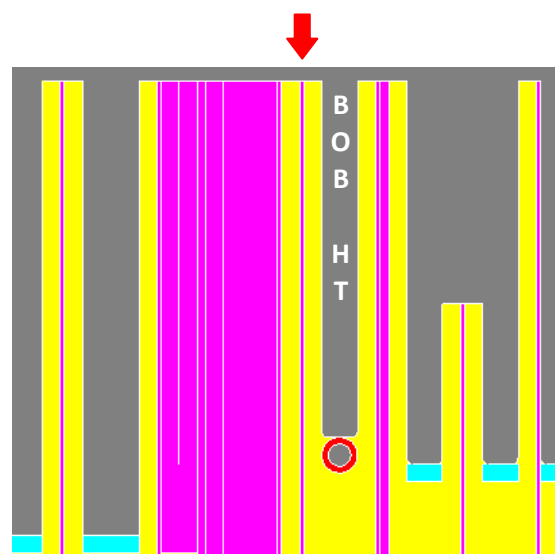


Figure IV.13. Vue agrandie sur la configuration N°4 (la flèche indique le carton rajouté).

La figure VI.14 montre le dégradé de champ électrique dans la zone autour de la bobine HT. La répartition des lignes équipotentielles est représentée dans la figure IV.15. On calcule les contraintes électriques dans l'huile, en commençant d'abord par tracer des « chemins » dans l'huile dans les zones les plus contraintes du bobinage (figure IV.15.). Les résultats de calcul des contraintes électriques sur ces chemins sont indiqués dans le tableau IV.4

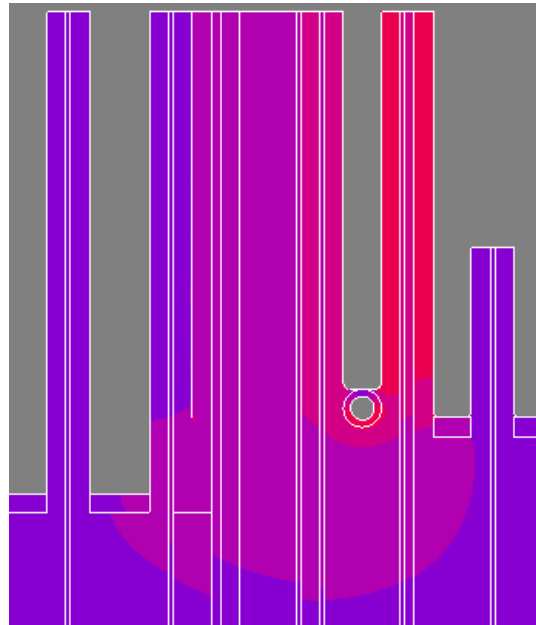


Figure IV.14. Vue agrandie de la zone la plus contrainte dans le bobinage.

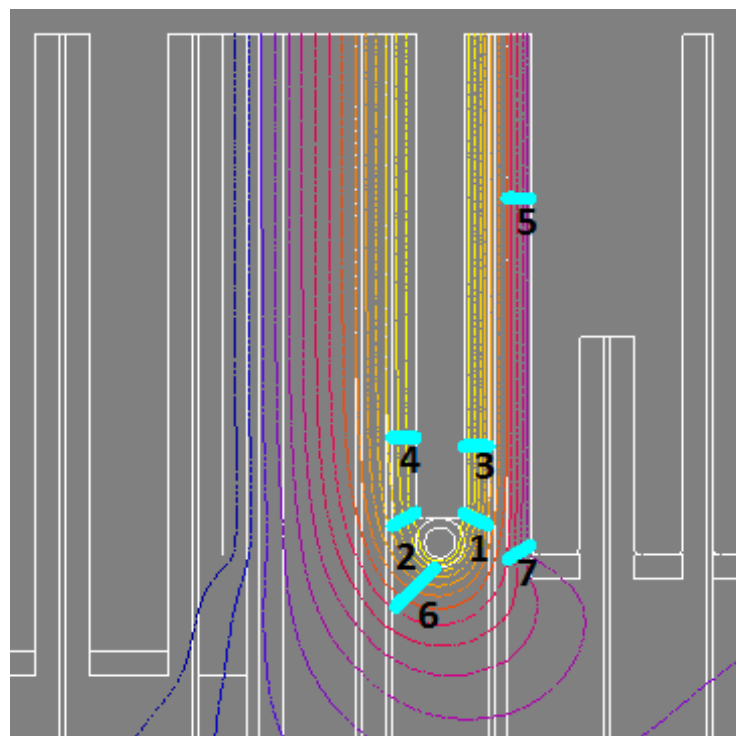


Figure IV.15. Chemins étudiés pour le calcul des contraintes électriques.

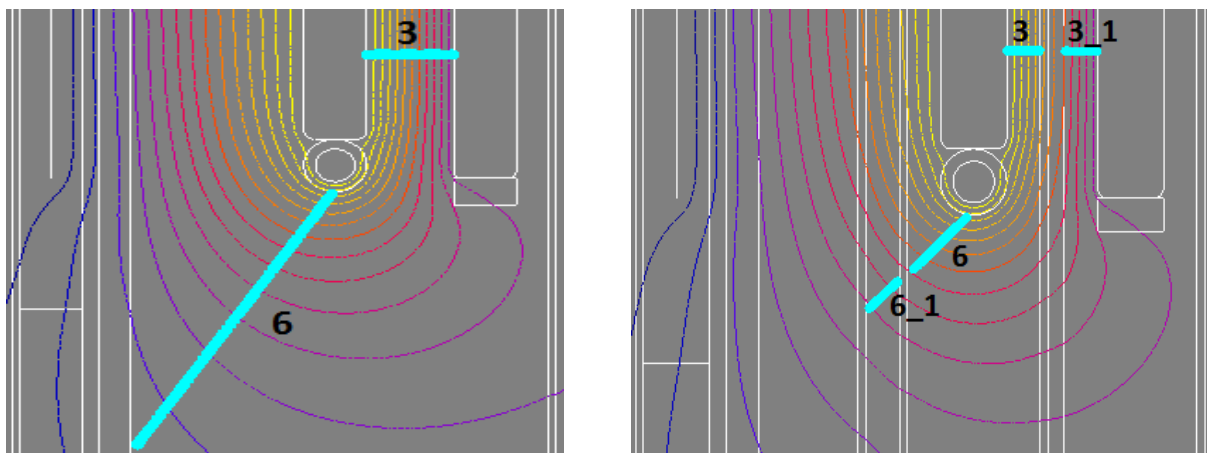
| N° | d (mm) | U (kV) | Emoy (U/d) | Eadm (kV/mm) | marge de sécurité (Eadm/Emoy) | coef |
|----|--------|--------|------------|--------------|-------------------------------|------|
| 1 | 2,15 | 18,59 | 8,61 | 13,16 | 1,56 | 17,5 |
| 2 | 2,15 | 13,15 | 6,10 | 13,17 | 2,15 | 17,5 |
| 3 | 1,96 | 16,56 | 8,41 | 13,62 | 1,61 | 17,5 |
| 4 | 1,90 | 9,459 | 4,96 | 13,78 | 2,77 | 17,5 |
| 5 | 1,85 | 15,50 | 8,37 | 13,93 | 1,66 | 17,5 |
| 6 | 4,48 | 19,03 | 4,24 | 10,04 | 2,36 | 17,5 |
| 7 | 2,19 | 12,36 | 5,64 | 13,08 | 2,32 | 17,5 |

Tableau IV.4. Calcul des contraintes électriques pour différents chemins (Config. N°4).

IV.7 .Comparaison entre les différentes configurations :

Afin de mettre en évidence l’amélioration des marges de sécurité obtenue par l’ajout de cartons, on va comparer ces marges de sécurité entre les configurations N°1 et la configuration N°4.

Cette comparaison est faite dans les espaces d’huile du coté droit et du coté gauche de la bobine HT.



Configuration N°1

Configuration N°4

Figure IV.16. Chemins utilisés pour la comparaison des marges de sécurité.

A droite de la bobine HT, il y a un seul canal d'huile d'environ 5,5mm dans la configuration N°1. Ce canal est subdivisé en deux canaux d'environ 2mm dans la configuration N°4. Le calcul des contraintes électriques dans l'huile a été calculé pour les deux configurations dans le tableau IV.5 On observe ainsi que la marge de sécurité passe de 21% (configuration N°1) à 62% et 98% dans la configuration N°4.

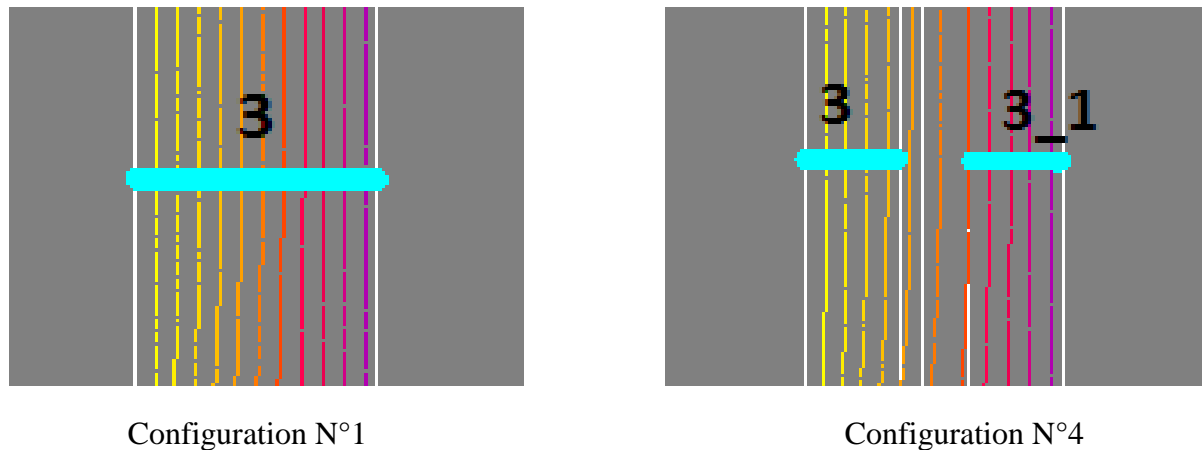


Figure IV.17. Chemin 3 avant et après la subdivision.

| | N° | d (mm) | U (kV) | Emoy (U/d) | Eadm (kV/mm) | marge de sécurité (Eadm/Emoy) | coef |
|----------|-----|--------|--------|------------|--------------|-------------------------------|-------|
| config 1 | 3 | 5,44 | 41,96 | 7,71 | 9,35 | 1,21 | 17,50 |
| config 4 | 3 | 1,97 | 16,56 | 8,42 | 13,62 | 1,62 | 17,50 |
| | 3_1 | 1,91 | 15,93 | 8,32 | 16,52 | 1,98 | 21,00 |

Tableau IV. 5 : Calcul des contraintes électriques pour différents chemins (chemin3).

De la même manière à gauche de la bobine HT, il y a un seul canal d'huile assez grand d'environ 23mm dans la configuration N°1. Ce canal est subdivisé en deux petits canaux dans la configuration N°4. Le calcul des contraintes électriques dans l'huile a été calculé pour les deux configurations dans le tableau IV.6. On observe ainsi qu'en moyenne, la marge de sécurité augmente considérablement dans la configuration N°4.

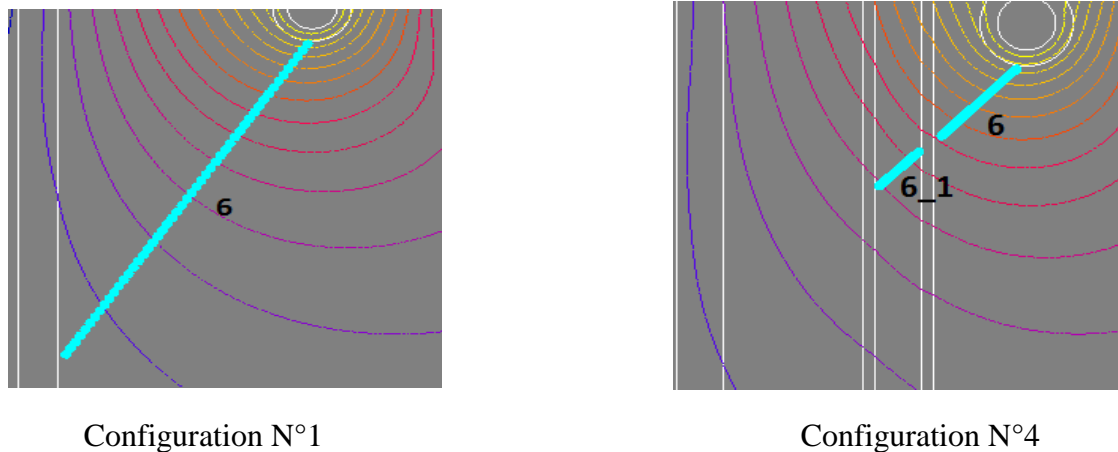


Figure IV.18.Chemin 6 avant et après la subdivision.

| | N° | d (mm) | U (kV) | Emoy (U/d) | Eadm (kV/mm) | marge de sécurité (Eadm/Emoy) | coef |
|----------|-----|--------|--------|---------------|-----------------|----------------------------------|------|
| config 1 | 6 | 22,78 | 40,15 | 1,76 | 5,50 | 3,12 | 17,5 |
| config 4 | 6 | 1,97 | 16,56 | 8,42 | 13,62 | 1,62 | 17,5 |
| | 6_1 | 2,35 | 5,33 | 2,27 | 15,31 | 6,75 | 21 |

Tableau IV. 6. Calcul des contraintes électriques pour différents chemins (chemin 6).

IV.8. Conclusion :

On a présenté dans ce chapitre l'analyse qui a été faite des résultats des simulations réalisées à l'aide du logiciel Flux 2D.

Afin de valider le bon dimensionnement diélectrique du bobinage parmi les quatre configurations étudiées, on a calculé les contraintes électriques appliquées aux bobines quand celles-ci sont soumises à l'essai de choc de foudre en OP à l'instant $t = 0,5\mu s$.

Le calcul des contraintes électriques pour les configurations a montré que les volumes d'huile doivent être séparés avec des cartons d'isolations pour améliorer les marges de sécurité.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

La forte corrélation qui existe entre la durée de vie des transformateurs et celle de son système d'isolation, fait que le travail de conception doit être réalisé minutieusement. La tenue diélectrique dans le bobinage du transformateur doit être correctement calculée afin d'assurer une meilleure fiabilité de l'appareil face aux différentes contraintes issues des essais diélectriques, ou subies pendant son fonctionnement sur site.

On a présenté dans ce mémoire une étude de comparaison entre différentes configurations pour calculer les contraintes électriques dans le bobinage d'un transformateur de traction ferroviaire réalisé en technologie cuirassée.

Après avoir établi quatre configurations pour avoir un modèle de simulation avec le logiciel Flux 2D, on a présenté le cas considérés dans notre étude. Ce cas correspond aux contraintes électriques subies par le bobinage quand il est soumis à l'essai de l'onde de choc de foudre (onde plane OP). On a considéré un instant de l'onde qui fait apparaître les contraintes les plus élevées à $0,5\mu\text{s}$.

On a ensuite mis particulièrement l'accent sur la méthode de calcul des contraintes de Weidmann qui nous a permis de comparer le champ électrique dans le bobinage avec les valeur admissibles pour les quatre configurations étudiées.

Enfin, on a démontré dans le dernier chapitre que le dimensionnement diélectrique du transformateur de la quatrième configuration est le plus fiable car aucune contrainte électrique ne dépasse les valeurs admissibles et il présente les marges de sécurité les plus élevées.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

[1] Site web:

http://lycees.acrouen.fr/maupassant/Melec/co/Reseau_HTABT/Couplage_transfo_tri/webMob/co/module_Couplage_transformateur.html

[2] Ammar Beneddine et Flora Mamer « *Etude des essais normalisés des transformateurs de puissance MT/BT* » PFE M2, Université Tizi-Ouzou, juin 2016.

[3] Site web: <https://illustrationprize.com/fr/685-working-principle-of-a-transformer.html>

[4] Site web: <https://dl.ummtto.dz/>

[5] Site web <https://www.tsv-transfo.com/fr/fonction-transformateur-electrique/enroulements-transformateur-electrique/>

[6] François BEAUCLAIR, Jean-Pierre DELVINQUIER, Jean-Pierre GROS « *Transformateurs et inductances* », Article Techniques de l'ingénieur, Réf : E2130 v1, 10 févr. 1998

[7] 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.

[8] Mini ould ISSELMOU et Sidi LEHBIB « *Calcul Des Contraintes Electriques Dans Le Bobinage D'un Transformateur Electrique* » PFE M2, Centre Universitaire Ain temouchent 2013/2014.

[9] Site web : <https://lesiteferroviaire.pagesperso-orange.fr/Chaine%20d-alimentation%20des%20MT.htm?hcb=1>

[10] Site web : [:https://lesiteferroviaire.pagesperso-orange.fr/Chaine%20d-alimentation%20MT.htm](https://lesiteferroviaire.pagesperso-orange.fr/Chaine%20d-alimentation%20MT.htm)

[11] Zorig Assam « *Méthode globale de diagnostic de la machine asynchrone à cage d'écureuil* », PFE M2 Université de M'SILA, 2015/2016.