

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



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
Filière : GENIE ELECTRIQUE
Spécialité : RÉSEAUX ÉLECTRIQUES & TECHNIQUES
DE LA HAUTE TENSION
Thème

***D'ETERMINATION DU CHAMP ELECTRIQUE DANS
UN ISOLANT CHARGE AVEC UNE PARTICUL
METALLIQUE.***

Présenté Par :

- 1) **GARGOUA** Abdel Hakim
- 2) **BELHALHALI** Okacha

Devant les jurys composés de :

Mlle.TOUHAMI Aicha	MAA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr.AISSO Massinissa	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr.ZELMAT Samir	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année universitaire 2016/2017

Remerciement

*En préambule à ce mémoire nous remercions **ALLAH** qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage durant ces longues années d'étude.*

Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif de la Faculté des Sciences pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts et une grande technique pédagogique pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nous souhaitons adresser encore nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

*Nous tenons à remercier très sincèrement Monsieur **ZELMAT Samir** qui, en tant qu'encadrant de notre mémoire, s'est toujours montré à notre écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire. Ainsi nous lui devons beaucoup pour sa contribution, son aide et ses conseils en consacrant presque tout son temps pour que ce projet de fin d'étude réussisse à son optimum.*

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons encore à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Enfin, nous remercions toute personne qui a participé de près ou de loin pour l'accomplissement de ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce Modeste travail aux personnes qui me sont chers et qui m'ont soutenu tout au long des épreuves qui ont donné lumière à ce travail. Je cite particulièrement

- + Mon père, en vous je vois un père dévoué à sa famille .ta présence en tout circonstance m'a maintes fois rappelé le sens de la responsabilité.*
- + Ma mère, en vous, je vois la maman parfaite, toujours prête à se sacrifier pour le bonheur de ses enfants , merci pour tout.*
- + je remercie mes frères: **AMINE et ABEDL ILAH** et la **petite princesse chaima** pour le soutien moral et qui était toujours là pour moi.*
- + A tous ceux qui me sont chers, si mes vœux pouvaient avoir quelque pouvoirs j'en serai profondément heureux car je veux pour vous et vos familles toutes les réussites et satisfactions de ce monde.*

GARGOUA ABDEL HAKIM

sommaire

Sommaire

Introduction générale	01
Chapitre I : Présentation générale des transformateurs de puissance	
I.1. Constitution générale d'un transformateur	03
I.1.1. Circuit magnétique	04
I.1.2. Circuit électrique	05
I.1.3. La cuve	06
I.2. Principe de fonctionnement	07
I.3. Technologie de construction des transformateurs	07
I.3.1. Type cuirassé	08
I.3.1.1. Les enroulements	09
I.3.1.2. Avantages et inconvénients du transformateur cuirassé	10
I.3.2. Type Colonne	10
I.3.2.1. Les enroulements	11
I.3.2.2. Limitations des transformateurs à colonnes	11
I.4. Les isolants dans les transformateurs de puissance	12
I.4.1. Isolation liquide	12
I.4.1.1. Huiles minérales isolantes	12
I.4.1.2. Rôle des huiles minérales	12
I.4.1.3. Huiles synthétiques	12
I.4.1.4. Les esters synthétiques	13
I.4.1.5. Huiles siliconés	13
I.4.1.6. Les huiles végétales ou esters nature	13
I.4.2. Isolation solide	14
I.4.2.1. Rôle et principaux types des isolants solides	14
I.4.2.2. Papiers et cartons	14
I.4.2.2.1. Matière première	15
I.4.2.2.2. Structure chimique	15
I.4.2.3. Composition du papier	15
I.4.2.4. Procède de fabrication	16
Chapitre II : Essais Diélectriques sur les transformateurs de puissance	
II. 1. Modes de défaillances	17

II.1.1. Défaillances d'isolement dans un transformateur	17
II.2. Les contraintes électriques	17
II.2.1. Surtensions	17
II. 2.1.1. Surtensions atmosphériques	18
II.2.1.2. Surtensions de manœuvre	18
II.2.2. Surintensités /Surcharges	18
II.2.3. Décharge partielles	19
II.2.3.1. Définition	19
II.2.3.2. Conséquences des décharges partielles	19
II.3. Essais de tenue électrique	20
II.3.1. Les essais à fréquence industrielle (ou « essais à basse fréquence »)	20
II.3.1.1. Essais par tension appliquée	20
II.3.1.2. Essais par tension induite	20
II.3.2. Les essais aux ondes de choc (ou « essais à haute fréquence »)	20
II.3.2.1. Essais aux chocs de manœuvre	21
II.3.2.2. Essai aux chocs de foudre	22
II.4. Normes CEI relatives aux transformateurs de puissance	23
Chapitre III: Présentation de l'étude de simulation	
III.1. Géométrie du model étudié	26
III.2. Le Model étudié	27
III.3. Utilisation du logiciel de simulation FLUX 2D (version. 11.2)	28
III.4. Paramètres concernant la particule métallique	28
III.5. Résultats de la simulation	30
III.5.1. Création de la géométrie de dispositif	31
III.5.2. Maillage de la géométrie du model	33
III.5.3. Description du processus physique	34
III.5.3. Processus de résolution	35
Chapitre IV : Calculs et analyse des résultats	
IV.1. Équations de calcul empirique	38
IV.2. Exploitation des résultats	40
IV.2.1. Disposition horizontale de la particule(DH)	40
IV.2. Analyse des résultats (DH)	41
IV.2.2. Disposition verticale de la particule(DV)	42
IV.2. Analyse des résultats (DV)	43

IV.2.4. Disposition inclinée de la particule(DI)	44
IV.2. Analyse des résultats (DI)	45
IV.3. Comparaison des résultats de simulation avec les valeurs empiriques	45
IV.4. Tableau récapitulatif des résultats	46
Conclusion Générale	49
Bibliographie	51

Acronymes & Abréviations

DP : Décharge partielle.

CF : Essai de choc de foudre.

CM : Choc de manœuvre.

BIL : Basic Insulation Level.

SF6 : Hexafluorure de soufre.

FI-CD : Essai par tension induite de courte durée.

E : Champ électrique admissible en (kV/mm).

E_{max} : Champ électrique maximal.

E_{moy} : Champ électrique moyen.

E_v : Champ électrique maximal de la disposition verticale.

E_h : Champ électrique maximal de la disposition horizontale.

E_I : Champ électrique maximal de la disposition inclinée

E_d : Valeur admissible pour le papier type D pour une épaisseur G=0,8mm.

E_z : Valeur admissible pour le papier type Z pour une épaisseur G=0,8mm.

BF: Basse Fréquence.

OP : Onde pleine.

DV : Disposition verticale de la particule.

DH : Disposition horizontale de la particule.

G : Épaisseur du guipage en (mm).

A : Épaisseur de la particule.

B : Longueur de la particule.

ε_r : Permittivité relative.

VPS : Volts Par Spire.

PH : Papier-huile.

HT : Haute tension.

PF : Potentiel flottant.

Introduction Générale

Un transformateur électrique est un convertisseur dont la rentabilité dépend fortement de l'énergie électrique fournie, le transformateur de puissance est certainement le dispositif qui a permis l'essor puis la domination des réseaux alternatifs pour le transport, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique.

Les transformateurs de puissance constituent de ce fait, des maillons sensibles dans le système global dont ils font partie (réseaux électriques, centrales de production, poste de distribution, usines, trains, tramway, ...).

Leur défaillance peut avoir des répercussions en chaîne sur le reste du système, ils doivent donc en particulier assurer leur rôle pendant la durée de vie qui leur est assignée, tout en supportant des surcharges parfois extrêmes afin d'assurer la continuité de service. Ces contraintes imposent donc un dimensionnement correct et optimal du transformateur afin d'assurer sa fiabilité et répondre aux exigences sévères de la qualité.

L'étude réalisée ici est issue d'un cas réel qui a été rencontré chez un fabricant de transformateur suite à un incident dans son atelier de bobinage. Pendant la réalisation d'une bobine d'un transformateur de type cuirassé avec l'outillage dédié à cette opération (appelé tour à bobiner), il a été remarqué sur les conducteurs, la présence de fines particules métalliques dues au frottement accidentel de deux pièces mécaniques en métal du tour à bobiner. Cette pollution métallique pouvait sérieusement dégrader l'isolation interne du transformateur et l'endommager, soit lors des phases d'essais électriques avant sa livraison au client, soit pendant son exploitation sur site réduisant ainsi fortement sa durée de vie.

L'objectif final étant de calculer le niveau de contraintes électriques engendrées par la présence d'une particule métallique coincée entre deux spires du bobinage. Ainsi que la validation de son système d'isolation constitué de l'ensemble huile-carton-papier et de mettre en évidence la méthode de calcul du champ électrique utilisée dans les transformateurs de puissance.

Ce mémoire a été donc organisé en quatre chapitres ; dans le premier chapitre on présentera d'une manière générale les principaux éléments du transformateur, nous insisterons en particulier sur leurs différentes technologies de construction, leurs descriptions ainsi que leurs constitutions.

En effet, le transformateur objet de notre étude, est réalisé selon une technologie (cuirassé) qui reste encore peu connue par rapport à la technologie colonne. Dans le deuxième chapitre on a présenté la méthode de calcul des contraintes électriques qui sera utilisée pour évaluer la qualité de l'isolation du bobinage. Dans ces calculs on prendra spécialement en compte l'essai de choc de foudre qui présente les contraintes électriques les plus élevées pour le transformateur étudié dans notre travail.

Dans le troisième chapitre, nous montrerons le modèle étudié avec le logiciel Flux 2D. Ce modèle se présente sous forme d'une coupe 2D réalisée dans le bobinage du transformateur dans laquelle on peut visualiser l'arrangement des bobines et des cartons isolants qui se trouvent entre elles. Ceci afin de pouvoir calculer champ électrique en fonction des paramètres de la particule et du guipage.

Le quatrième chapitre contient les résultats de ces calculs qui seront exposés et analysés, où des comparaisons seront effectuées avec des calculs réalisés avec Flux 2D et ceux obtenus par des équations empiriques présentées dans le deuxième chapitre.

Enfin, nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale résumant l'essentiel des résultats de cette étude qui valideront, ou pas, le système d'isolation du transformateur de traction considéré dans notre projet de fin d'étude.

Chapitre 1
présentation générale des transformateurs
de puissance

Introduction

Le transformateur est une machine électrique statique destinée à transformer une tension (courant) alternative en une autre tension (courant) alternative de même fréquence, et d'amplitudes généralement différentes afin de l'adapter aux différents besoins d'utilisation.

Il comporte principalement les parties suivantes : Un circuit magnétique fermé constitué des colonnes et de culasses, supérieures et inférieures ; Un circuit électrique qui comprend les enroulements primaires (enroulements HT) et les enroulements secondaires (enroulements BT) et leurs isolants ; Il contient aussi des organes mécaniques, des supports, manutention, refroidissements ; des organes de sécurité contre les défauts internes et externes à l'appareil.

I.1. Constitution générale d'un transformateur

Le transformateur de puissance (figure I.1) est constitué principalement de deux circuits :

- un circuit magnétique
- un circuit électrique.

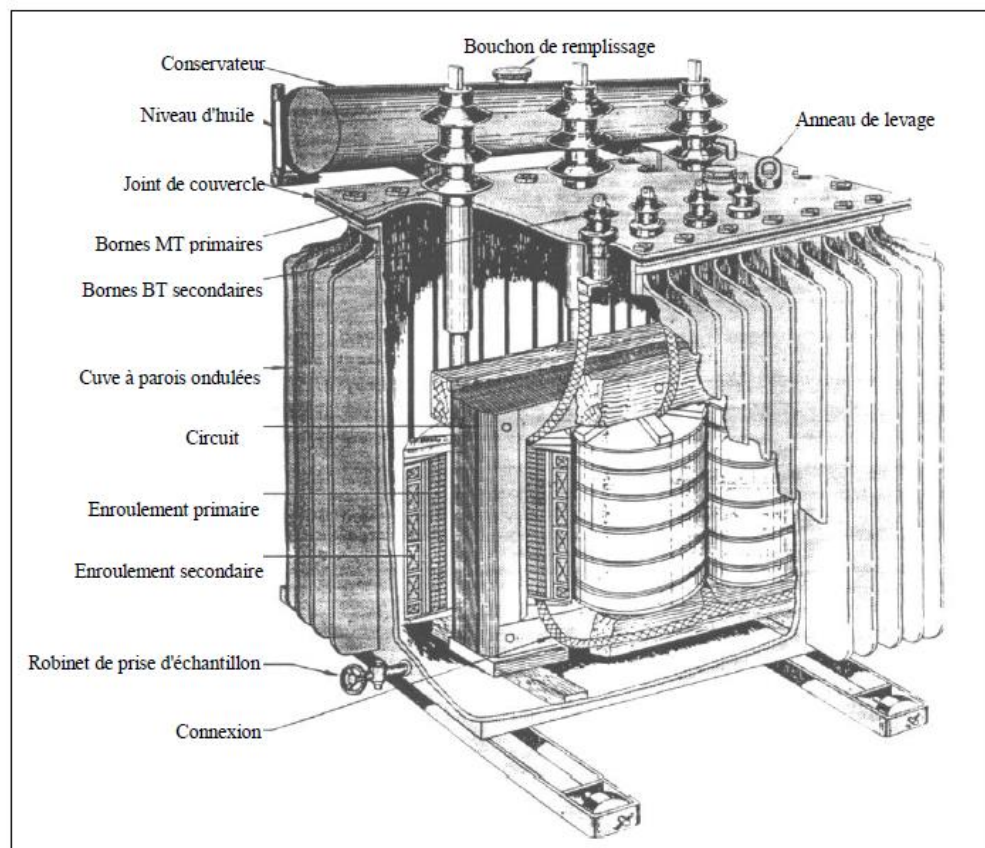


Figure. I.1. La constitution d'un transformateur de puissance.

I.1.1. Circuit magnétique

Un circuit magnétique est formé de deux parties dans le but de faciliter la mise en place lors de la construction : Le noyau et les culasses. Le noyau se compose habituellement de tôles ferromagnétique empilées les unes sur les autres et se compose d'acier au silicium et est laminé avec un enduit inorganique. L'acier silicone est stratifié en pièces et façonné en jambes et culasses du noyau. Les culasses sont situées au-dessus et en-dessous des noyaux et permettent de fermer le circuit magnétique, ce dernier a un but de transmettre le plus efficacement possible l'énergie magnétique du primaire, qui la génère, au secondaire. Il doit donc être : de perméabilité magnétique aussi haute que possible ; d'hystérésis aussi faible que possible pour limiter les pertes ; feuilleté (tôles de 0,2 à 0,3 mm d'épaisseur) afin de limiter les courants de Foucault ; de résistance électrique aussi élevée que possible, toujours dans le but d'affaiblir les courants de Foucault, à cette fin on utilise des aciers au silicium.

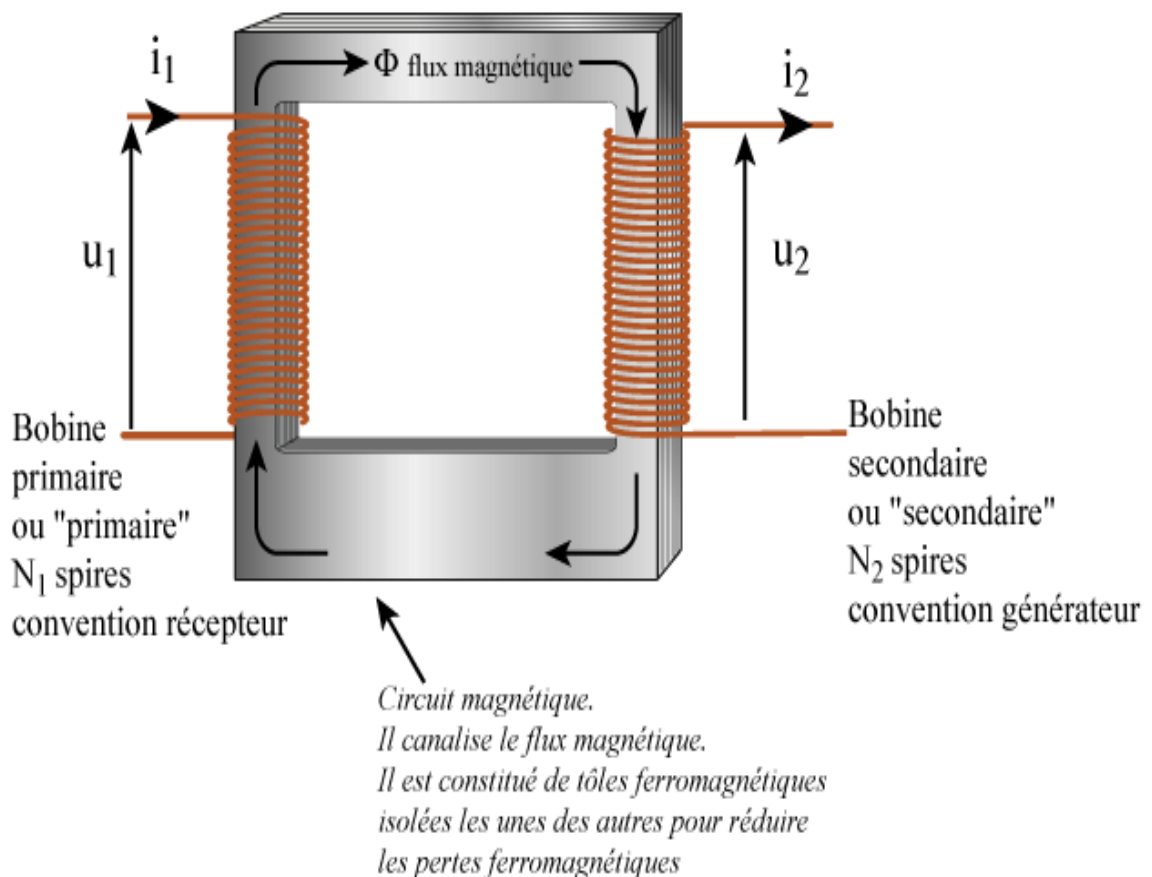


Figure I .2 .Schéma de principe d'un transformateur monophasé

I.1.2. Circuit électrique :

Le transformateur est constituée de deux enroulements (ou plus) couplées sur le noyau, le coté de la source est appelée le primaire (N_1 spires). Le coté de la charge est appelé le secondaire (N_2 spires).

Les enroulements sont constitués par des bobines faits d'un conducteur en cuivre recouvert d'un papier isolant et ou imprégnés par résines ou vernis isolants pour isoler les spires les unes des autres. Ils fournissent une entrée et une sortie de tension électrique. Il y a habituellement des bobinages pour chaque niveau de tension et il peut aussi y avoir un ou plusieurs bobinages pour la régulation de tension. Le bobinage peut se faire en spires, en hélices en disques ou en disques intercalés. Les enroulements primaires et secondaires sont rassemblés autour du même noyau pour limiter les fuites magnétiques.



Figure I.3. *Vue d'un bobinage d'un transformateur de puissance.*

I.1.3. La cuve

Le noyau et les bobinages sont placés dans une cuve qui protège les parties actives du transformateur de puissance. Tous les transformateurs de puissance possèdent un système de refroidissement qui assure que la chaleur soit dissipée et empêche de dépasser la limite de température spécifiée pour le transformateur de puissance.

La cuve doit être fermée à sa partie supérieure par un couvercle boulonné avec limiteur du couple de serrage évitant le fluage du joint (ou soudé). Le bas de la cuve est renforcé pour permettre la manutention au sol avec des leviers sans risque de détérioration de l'appareil. La partie supérieure du couvercle doit être munie de pièces de levage permettant le décufrage et le levage du transformateur rempli d'huile. Une continuité électrique doit être assurée entre la cuve, son couvercle et le circuit magnétique.

La méthode de refroidissement est déterminée par les exigences et l'utilisation du client. Les transformateurs de puissance peuvent utiliser différents systèmes de refroidissement, notamment : le refroidissement naturel à l'huile/le refroidissement naturel à air ou le refroidissement naturel à l'huile/le refroidissement à air forcé.

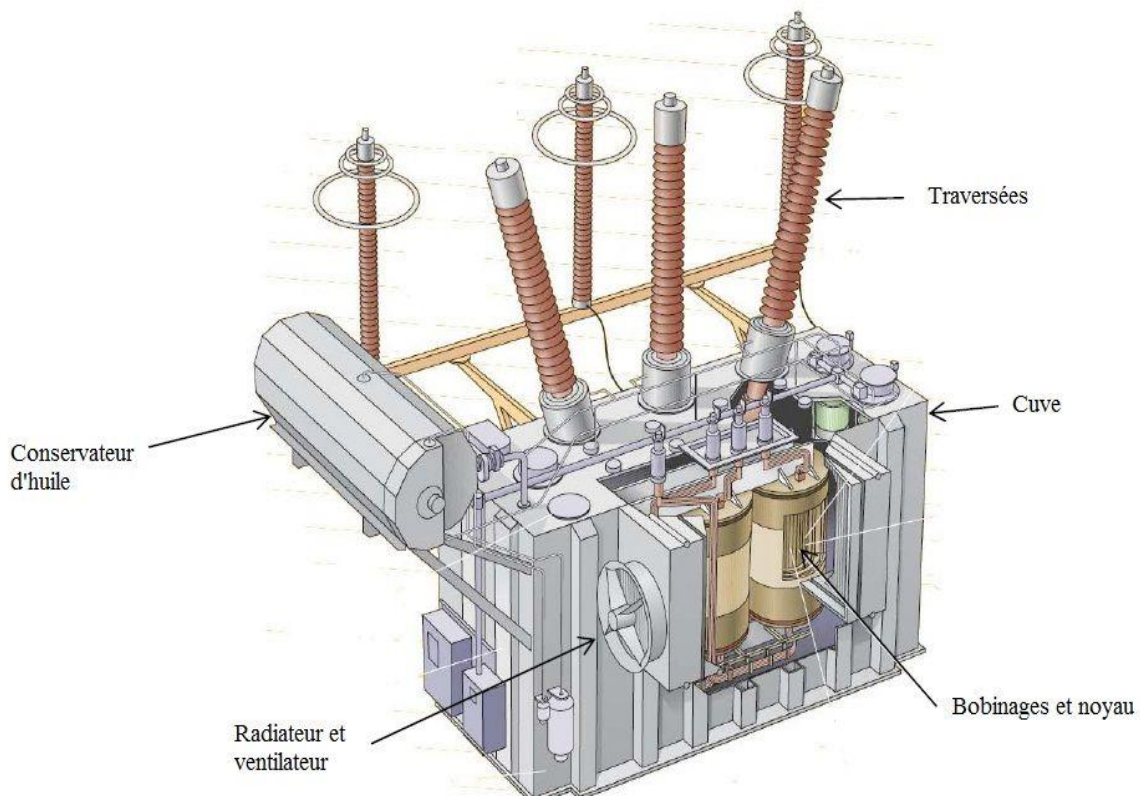


Figure I.4. Transformateur de puissance montrant ses principales composantes.

I.2. Principe de fonctionnement

Le bobinage du primaire est alimenté par une tension alternative sinusoïdale u_1 . Il est alors parcouru par un courant i_1 , également alternatif sinusoïdal, de valeur efficace I_1 . La circulation d'un courant dans le circuit primaire génère un champ magnétique B_r variable, proportionnel à la valeur efficace I_1 du courant primaire et également au nombre de spires N_1 du bobinage. Ce champ magnétique B_r génère alors un flux évoluant au cours du temps, et circulant préférentiellement à travers les parties métalliques, c'est à dire à travers le circuit magnétique du transformateur. Si ce circuit magnétique n'est pas saturé, le flux évolue de façon alternative sinusoïdale. S'il n'y a aucune fuite de flux, l'intégralité du flux généré par le bobinage primaire se retrouvera au niveau du bobinage secondaire.

Dans le cas contraire, quelques lignes de flux ne circulent pas dans le circuit magnétique : ces lignes de flux sont alors perdues et on retrouve au niveau du secondaire une grande partie du flux généré par le bobinage secondaire.

Le flux que l'on retrouve au secondaire est un flux qui évolue également de la même façon que le flux au primaire. D'après la loi de Faraday, ce flux magnétique variable induit une force électromotrice dans le bobinage secondaire du transformateur, de valeur efficace U_2 .

I.3. Technologie de construction d'un transformateur

Pour réaliser un enroulement de transformateur d'une tension nominale donnée et d'un nombre de spires défini, deux technologies de bobinages sont possibles : cuirassé ou colonne. Chacune d'elle est caractérisée par sa configuration d'enroulement par rapport au circuit magnétique.

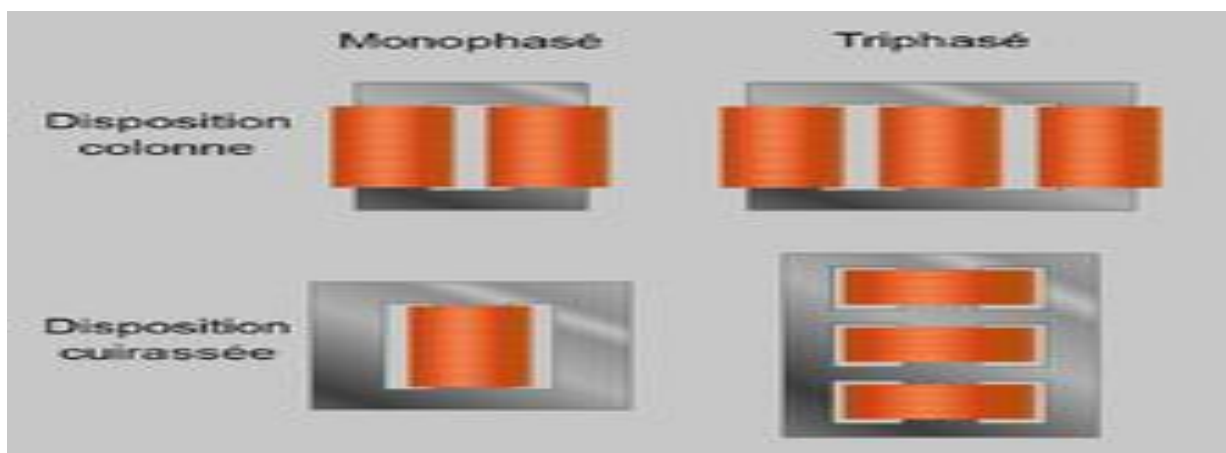


Figure I.5. Présentation des différents types de circuit magnétique.

La technologie dite « cuirassée » consiste à disposer le circuit magnétique autour des bobines. Dans la technologie « colonne », c'est l'inverse, c.-à-d., c'est les bobines qui sont disposées autour du circuit magnétique en forme de colonne.

Le choix de l'une ou l'autre des technologies de bobinage relèvera souvent du constructeur ou de critères imposés dans le cahier des charges.

I.3.1. Technologie cuirassée

Dans la technologie cuirassée le circuit magnétique entoure les bobinages haute tension et basse tensions d'une phase donnée, comme sur la figure ci dessous.

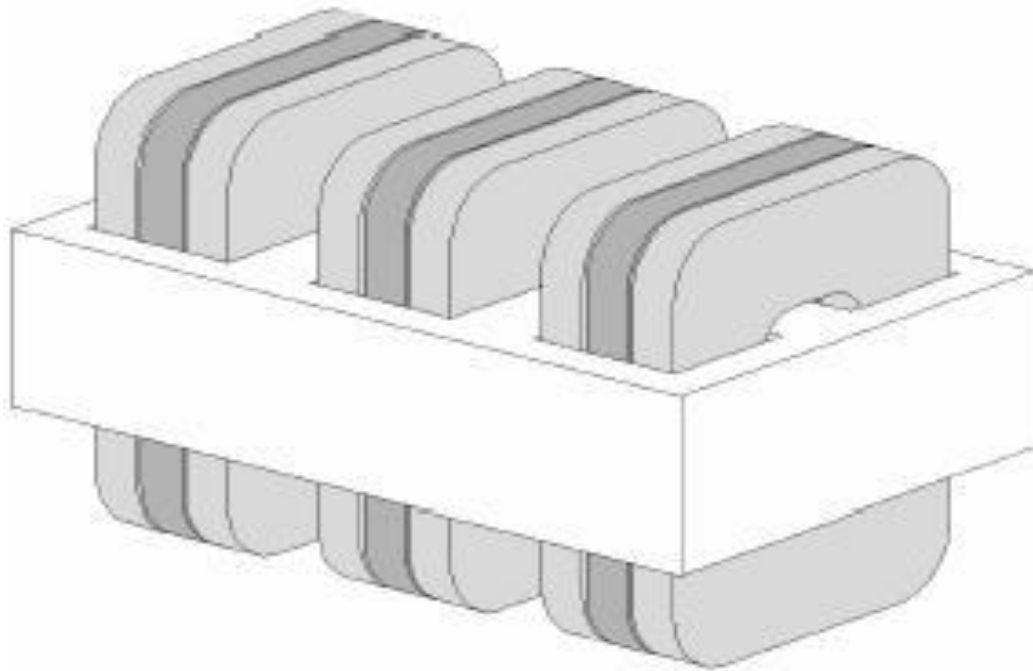


Figure I.6. *Vue sur la partie active d'un transformateur cuirassé.*

Le circuit magnétique est constitué de tôles magnétiques, posées à plat. La forme rectangulaire du circuit et des bobinages rend très compacte la partie active du transformateur cuirassé.

Les chemins de retour du flux magnétique à travers le circuit magnétique sont externes et entourent les bobinages. Grâce à son excellent arrangement de l'écrantage magnétique le

transformateur cuirassé correspond particulièrement bien à la fourniture de basse tension et fort courant, comme par exemple dans le cas de transformateurs de fours à arcs.

Historiquement les américains avec Westinghouse construisaient des transformateurs cuirassés. En France, la plupart des transformateurs de puissance Jeumont Schneider Transformateurs (JST) sont de ce type. Quelques autres constructeurs fabriquent encore de nos jours des transformateurs cuirassés comme ABB ou Mitsubishi.

I.3.1.1. Les enroulements

Les phases du transformateur cuirassé se composent de plusieurs groupes de bobines haute tension et basse tension (et moyenne tension dans le cas d'un transformateur à trois enroulements), placés les uns à côté des autres. Chaque groupe est formé d'un petit nombre de bobines reliées en série.

Les bobines appelées aussi galettes sont des grandes spirales rectangulaires très plates : car elles n'ont qu'une seule couche en épaisseur. Le nombre de spires est variable suivant les enroulements. Chaque spire est composée d'un ou de plusieurs conducteurs en parallèle.

Pour réduire les pertes, chaque conducteur peut être subdivisé en plusieurs brins méplats, isolés entre eux par plusieurs couches de papier.

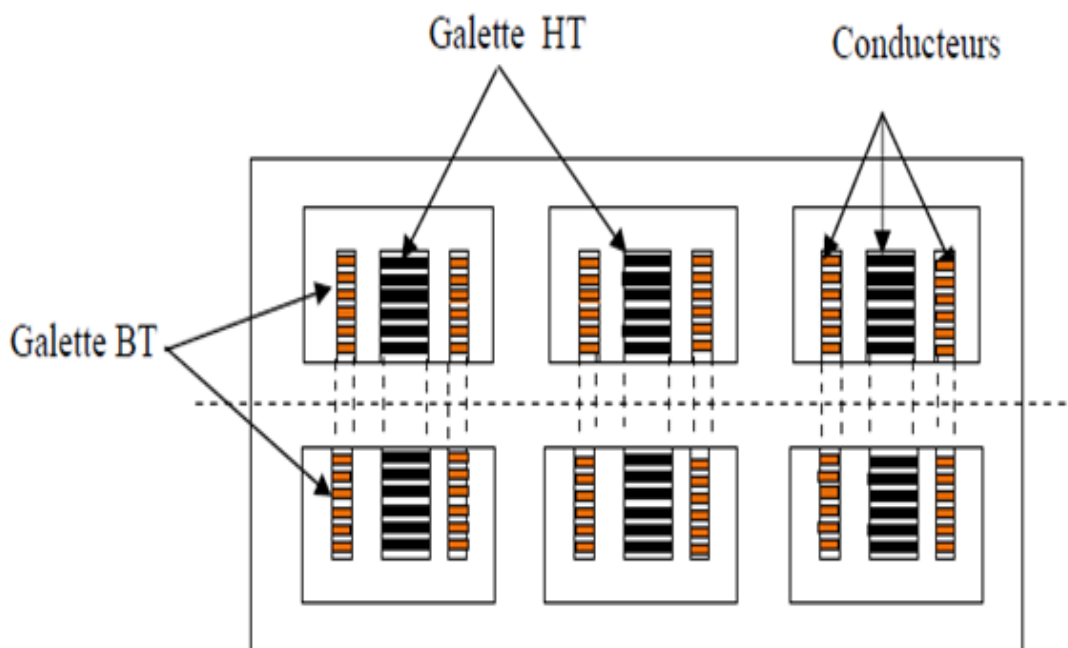


Figure I.7 transformateur triphasé type cuirassé

I.3.1.2. Les avantages et inconvénients du 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.

I.3.2. Type à colonnes :

Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur le 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.

Cette disposition plus simple que la précédente est utilisée pour les transformateurs à haute tension et les grandes puissances. Les enroulements peuvent être disposés sur un circuit magnétique comportant trois colonnes ou noyaux. Ce type de circuit magnétique est dit à flux forcé.



Figure I.8. Enroulement des conducteurs en cuivre pour un transformateur.

I.3.2.1. Les enroulements

Les enroulements sont constitués de spires dont le nombre est différent pour les enroulements de haute et de basse tension respectivement primaire/secondaire. Les spires sont-elles mêmes subdivisées en plusieurs brins mis en parallèle. Les conducteurs formant les enroulements sont en cuivre ou en aluminium pour les puissances plus importantes. Ces matériaux sont ainsi préférés à d'autres pour leurs bonnes conductivités thermiques. Selon la gamme de puissance des transformateurs, les conducteurs peuvent être sous forme de fils massifs, de section circulaire ou carrée, de type méplat, ou encore laminés en fines feuilles. La figure 1.9 montre un opérateur en train d'enrouler le fil de cuivre autour d'une des colonnes en cours de fabrication.



Figure 1 .9. *Enroulement des conducteurs en cuivre pour un transformateur.*

I.3.2.2. Limitations des transformateurs à colonnes

Le circuit magnétique des transformateurs à colonnes est plus grand en volume que celui d'un type cuirassé. Par conséquent, le nombre de spires et le rapport volumique entre les matériaux conducteurs et ferromagnétiques sont plus importants. Par ailleurs ce type de

construction qui a fait ses preuves pour des puissances relativement faibles (environ jusqu'à 30 kVA), présente quelques difficultés pour des fortes puissances (plus de 100 kVA) et des tensions plus élevées. Pour des tensions supérieures à 220 KV, certains constructeurs ont abandonné la construction du transformateur à colonne au profit de la structure cuirassée.

I.4. Les isolants dans les transformateurs de puissance :

Les isolants ou diélectriques sont des matériaux ayant une résistivité très élevée : 10^8 à 10^{16} ohm .m. Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques. Un bon isolant ne devrait pas laisser passer de courant lorsqu'il est soumis à une tension électrique. Autrement dit, sa résistance en CC doit être infiniment grande. Cependant, en pratique, un courant de fuite très faible circule dans tous les matériaux isolants utilisés en HT.

I.4.1. Isolation liquide

I.4.1.1. Huiles minérales isolantes

Les huiles minérales isolantes sont obtenues par distillation de pétroles sélectionnés, substances naturelles d'origine géologique, débarrassés de matières diverses (gaz légers, sulfure d'hydrogène, eau, etc.). Ce sont des mélanges complexes (plusieurs milliers de molécules différentes) d'hydrocarbures, de composés soufrés, oxygénés, azotés, et de traces de composés organométalliques. L'amélioration progressive des procédés de raffinage des bruts a abouti à l'obtention d'huiles minérales isolantes de plus en plus performantes.

I.4.1.2. Rôle d'Huiles minérales

L'ensemble des bobinages est plongé dans une cuve remplie d'un fluide isolant dont la tenue diélectrique conditionne les distances entre pièces sous tension. Par exemple, un transformateur 400 kV devront tenir des chocs brefs de 1425 kV en essais chez le constructeur. Ce fluide est typiquement de l'huile minérale.

I.4.1.3. Huiles synthétiques

Bien que les huiles minérales occupent une place très importante, des liquides de synthèse sont également utilisés lorsque des propriétés particulières sont recherchées (résistance au feu, tenue aux décharges partielles,...).

On peut différencier les produits de synthèse par application ; nous avons choisi de les différencier par type de structures chimiques :

- hydrocarbures chlorés ;
- hydrocarbures aromatiques non halogénés ;
- hydrocarbures aliphatiques ;
- esters ;

I.4.1.4. Les esters synthétiques

L'ester synthétique le plus utilisé dans les transformateurs de distribution à cause de son aspect respectueux de l'environnement et aussi de sa bonne résistance au vieillissement. L'utilisation des esters dans les transformateurs de puissance est principalement limitée à cause de leur prix trop élevé et de leur viscosité élevée.

I.4.1.5. Huile de silicones

L'huile de silicone est généralement une sorte de liquide incolore ou jaune léger, sans goût et non volatile. Elle est dotée de propriétés spéciales comme son bas coefficient viscosité – température, sa résistance aux hautes et basses températures, son anti-oxydation, son haut point d'éclair, sa basse volatilité, son excellente isolation, sa petite surface de tension, sa non corrosion du métal, etc. Aussi, l'huile silicone a une large gamme d'application et démontre des effets remarquables.

I.4.1.6. Les huiles végétales ou esters naturels

Les huiles végétales (ou esters naturels) sont obtenues par estérification d'un trialcool simple, Les huiles végétales sont en général très peu toxiques et possèdent une excellente biodégradabilité. Ces qualités sont dues notamment à une faible résistance à l'oxydation et l'hydrolyse. Ces deux caractéristiques, qui sont favorables à l'aspect éco-toxicologique, représentent un désavantage important pour les applications électrotechniques. En outre, leur comportement diélectrique n'est pas très élevé. Malgré ces inconvénients, les huiles végétales sont déjà utilisées dans les transformateurs de distribution et des tentatives sont en cours pour

I.4.2. Isolation solide

1.4.2.1. 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 isolants solides assurent plusieurs fonctions. Ils sont utilisés pour maintenir mécaniquement les bobinages et pour matérialiser les canaux de circulation du liquide de refroidissement.

1.4.2.1. Papiers isolants

Les papiers sont des matériaux de choix dans l'isolation des transformateurs et des câbles électriques. Il existe un grand nombre de qualités de papier obtenues par divers processus de fabrication et dont les propriétés sont choisies pour répondre aux contraintes imposées par la mise en œuvre et la tenue en service de l'isolation à laquelle elles sont soumises. Pour le cas des transformateurs, ils sont utilisés principalement comme isolants entre les spires des bobines. Les conducteurs sont ainsi recouverts de plusieurs couches de papier qui les entourent.

Nous nous intéressons dans notre étude aux papiers type D et type Z. Ces deux types de papiers sont dit « thermo stabilisés » car ils ont subi un traitement chimique leur permettant de supporter des températures élevées (105-110°C). En effet, le papier étant en contact direct avec le cuivre des conducteurs, il est sujet à des élévations de température dues à réchauffement du cuivre par effet joule. La principale différence entre les deux types de papier, est que le papier type D possède des propriétés mécaniques meilleures que celles du papier type Z.

Ceci le rend particulièrement intéressant en termes de fiabilité dans les ateliers de bobinage. Il est en effet soumis à des contraintes mécaniques élevées pendant l'opération d'enroulement des conducteurs. Sa défaillance (déchirure) peut avoir des conséquences négatives sur l'isolement du bobinage car le risque de contact entre spires devient élevé (risque de court-circuit).

I.4.2.2. Matières premières

Le papier est constitué de fibres de cellulose enchevêtrées qui sont d'origine végétale : bois, alfa, coton, lin, chanvre, chiffons...etc. Leur longueur (ordre de grandeur de m), leur diamètre (ordre de micron) et leur résistance sont variables selon l'origine.

Les trois constituants principaux du papier sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine ; la cellulose en est le constituant principal. Pour les cartons, les papiers cellulosiques isolants donnés suivant la norme CEI 641-2 sont à 100 % de pâte de bois au sulfate de pureté chimique élevée

I.4.2.3. Composition du papier

➤ **Lignine**

Elle représente entre 17 et 33% de la matière sèche. À l'état naturel, la lignine est toujours associée aux polysaccharides. De ce fait, toutes les caractéristiques de la lignine ont été établies à partir de lignines isolées, plus ou moins modifiées par le mode d'extraction.

➤ **Hémicellulose**

Les hémicelluloses sont des polysaccharides ayant un Degré de Polymérisation (DP) de l'ordre de 100 à 200 et une structure physique amorphe. Ces deux caractéristiques leurs assurent une plus grande solubilité que la cellulose ainsi qu'une plus grande réactivité de leurs groupements hydroxyle. Les hémicelluloses sont constituées d'hexoses (glucose, galactose, mannose) et de pentoses (xylose, arabinose). De plus, elles peuvent présenter des fonctions acides (-COOH) résultant de l'oxydation de l'hydroxyle primaire d'un hexose.

➤ **Cellulose**

La cellulose se trouve dans les proportions de 40% à 60% dans le bois. Elle est formée de longues chaînes de motifs anhydroglucose liés par des liaisons (1-4) P-glycosuriques (Figure 1.10). Chaque unité de la chaîne anhydroglucose porte trois groupements hydroxyles (-OH) ; cette extrémité de chaîne est facilement oxydable

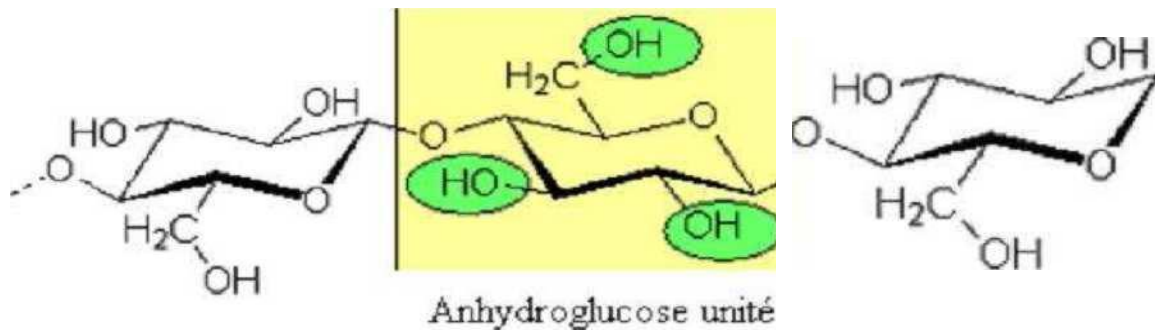


Figure 1.1.1. Formule de la cellulose.

I.4.2.4. Procédé de fabrication

Les papiers et les cartons restent des matériaux de choix pour l'isolation des transformateurs HT et MT. L'imprégnation par un isolant liquide, essentiellement les huiles minérales, leur confère une rigidité diélectrique remarquable.

Pour la fabrication, il y a préparation d'abord la pâte à papier, par action mécanique (broyage), ou chimique (action de la soude bisulfite sur la matière première; les fibres sont alors en suspension dans l'eau ; après encollage et apprêt, ensuite l'élimination cette eau par égouttage, essorage et séchage entre rouleaux chauffés. Les papiers utilisés en électrotechnique sont :

- ✓ Le papier Kraft, de grande résistance, à base de pâte de bois ;
- ✓ Le papier Manille, à base de fibres de chanvre ;
- ✓ Le papier chiffon, à base de fibres de coton et de lin ;
- ✓ Le papier Japon, à base de fibres de mûrier du japon.

Conclusion :

Nous avons présenté dans ce des rappels sur les transformateur ainsi que de leur constitution. Nous avons donné un aperçu sur leurs différentes technologies et leurs descriptions. Nous avons également présenté les différents types d'huiles isolantes et les isolants solides rencontrés dans les transformateurs de puissance.

Chapitre 2

Essais diélectriques sur les transformateurs de puissance

Introduction

L'ensemble des transformateurs de puissances respecte des caractéristiques d'isolement afin de permettre leur fonctionnement en toute sécurité. L'objectif de ce chapitre consiste à présenter les différents types de défaillances et les contraintes électriques vues par les transformateurs de puissance. Ainsi, nous présenterons les différents essais diélectriques qui se différencient principalement par la fréquence et la forme de la tension au transformateur.

II.1. Défaillances d'isolement dans le transformateur

Les conséquences des défauts latents à l'intérieur du transformateur de puissance peuvent diminuer à la fois ses tenues : diélectriques, thermiques et mécaniques à des valeurs inadmissibles, au dessous des contraintes appliquées. Les défaillances peuvent se présenter comme suit :

- ❖ Les défauts d'isolement entre spires d'un même enroulement (cas le plus fréquent).
- ❖ Les défauts d'isolement entre l'enroulement sollicité et une partie conductrice proche (noyau ou cuve).
- ❖ Les défauts entre enroulements.

Les isolements externes des transformateurs immergés sont dimensionnés largement et on n'observe pas de cas de défaillance diélectrique externe sur ces transformateur, hormis certains cas de transformateurs de réseaux aériennes en zone particulièrement polluée, les transformateurs secs peuvent donner lieu à des défaillances diélectriques externes en cas de pollution des surfaces isolantes.

II.2. Les contraintes électriques

II.2.1. Surtension

La foudre tombant sur les lignes ou d'autres événements comme l'ouverture ou la fermeture de disjoncteurs dans le réseau peuvent causer des surtensions aux bornes des enroulements du transformateur. Dans ce cas, les phénomènes impliquant des fréquences de l'ordre du kHz au MHz, certains types de surtension sont cités ci-dessous.

II.2.1.1. Surtensions atmosphériques

Elles ont pour origine des décharges atmosphériques (foudre) qui peuvent agir soit directement en frappant un ou plusieurs conducteurs de la ligne, soit indirectement en frappant, au voisinage de la ligne, la terre ou des structures métalliques.

Ces surtensions qui contraignent les isolations du poste et particulièrement celles des transformateurs, dépend de la configuration du réseau.

II.2.1.2. Surtensions de manœuvre

Des surtensions transitoires peuvent apparaître lors de la mise hors circuit d'une charge inductive telle que : Transformateur à vide ou inductance, même lorsque le courant à couper n'excède pas quelques centaines d'ampères. Ces surtensions sont dues au circuit oscillant constitué par les inductances et capacités du bobinage constituant les enroulements du transformateur.

II.2.2. Surintensités / surcharges

Par leur conception et les dispositions constructives adoptées pour leur réalisation, les transformateurs doivent pouvoir résister, sans dommage, aux surintensités auxquelles ils sont soumis.

Ces surintensités sont principalement dues :

- A l'appel de courant à la mise sous tension et les surcharges (courant d'enclenchement ou « inrush current » ;
- Au courant de court-circuit extérieur sur le réseau secondaire.

Les surintensités ont pour effet :

- de créer des efforts électrodynamiques entraînant des contraintes mécaniques élevées entre bobines et entre bobinages et câblages ;
- de provoquer, dans les enroulements et l'isolant liquide des contraintes thermiques par l'élévation excessive de température.

Parmi les différents régimes de surcharges, on citera :

- les surcharges accidentelles ou récurrentes ;
- les surcharges permanentes ;
- les surcharges de très courtes durées.

II.2.3. Décharges partielles

II.2.3.1. Définition

Les phénomènes de décharge partielle (DP), tels que définis par la norme IEC 60270, décharges disruptives localisées d'une petite partie d'un système d'isolement électrique solide ou liquide sous l'effet d'une forte contrainte de tension.

Si une DP ne conduit pas immédiatement à la mise hors service d'un appareil, elle est toutefois préjudiciable dans la mesure où elle conduit à une dégradation des matériaux (en particulier solides) sous l'action de diverses contraintes :

- ❖ contraintes thermique générée localement par la décharge (par exemple carbonisation du carton d'un transformateur).
- ❖ Contrainte chimique due aux produits de dégradation générés par la décharge (par exemple ozone ou acide nitrique).

L'extension de la décharge est limitée soit parce que le champ électrique local n'est pas suffisant pour provoquer sa propagation totale (décharge couronne dans un gaz ou un liquide, par exemple), soit parce que la propagation est bloquée par un isolant dont le champ de claquage est plus élevé (en général un solide).

La détection et la surveillance des décharges partielles sont d'une importance capitale car les phénomènes de DP précèdent fréquemment un claquage d'isolant de l'équipement haute tension, pouvant entraîner des pannes et des répartitions très coûteuses.

II.2.3.2. Conséquences des décharges partielles

Les décharges partielles conduisent à une dégradation du matériel sous l'action de diverses contraintes :

- ❖ contraintes thermique générée localement par la décharge qui peut entraîner un à terme une carbonisation du carton de l'isolant.
- ❖ Contrainte chimique due aux produits de dégradation générés par la décharge (ozone, oxydes d'azote et acide nitrique).
- ❖ Erosion mécanique due au bombardement par des espèces chargées et aux attaques acides. Ces contraintes provoquent une dégradation du matériel isolant dans sous tension. Lorsque l'isolant est trop abimé, un arc électrique complet se produit entre deux phases ou entre phase et le neutre, on dit qu'il y a amorçage.

II.3. Essais de tenue diélectrique

Les essais effectués sur les transformateurs ont pour but d'assurer la conformité des caractéristiques électriques avec les spécifications de la commande on distingue les essais « base fréquences » et les essais « haute fréquence ».

II.3.1 les essais à fréquence industrielle (ou essais à basse fréquence) :

Les essais à fréquence industrielle sont multiples, on va citer quelques uns :

II.3.1.1 Essais par tension appliquée :

Le rôle de cet essai est de vérifier la tenue diélectrique de chacun des enroulements du transformateur, à fréquence industrielle (50 Hz ou 60 Hz), par rapport à la masse et aux autres enroulements.

Le schéma de principe du transformateur lors de cet essai est présenté dans la figure suivante :

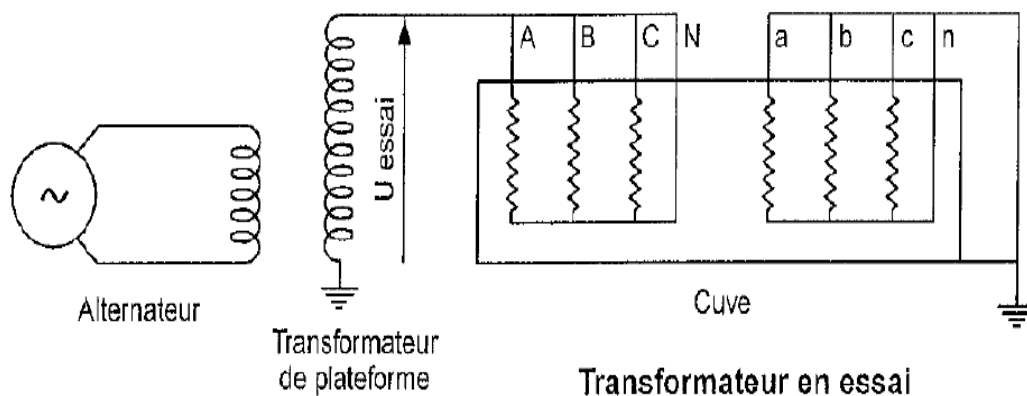


Figure II.1. Essais diélectriques par tension appliquée.

On porte l'ensemble d'un bobinage à un potentiel d'essai par rapport à la masse et aux autres bobinages, l'essai est satisfaisant s'il ne se produit aucun effondrement de la tension d'essai.

II.3.1.2 Essais par tension induite :

Cet essai permet la détection d'un ou de plusieurs éventuels défauts entre les spires des enroulements ou d'un défaut entre phase, pour éviter une saturation du circuit magnétique du transformateur, la fréquence utilisée pour l'essai est de 200Hz.

Cet essai est réalisé comme suit : l'enroulement HT étant ouvert, l'enroulement BT est alimenté sous tension nominal (figure II.2).

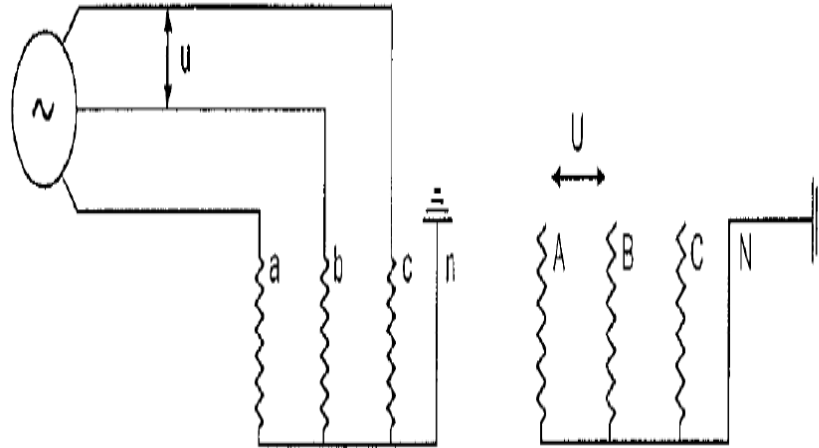


Figure II.2 Essai diélectriques par tension induite.

L'aimantation de l'enroulement BT est effectuée par 2 méthodes :

- ❖ **Méthode 1** : on alimenté le transformateur avec une tension d'essai de l'ordre deux fois la tension nominal pendant une durée brève (30s à 1 min). Le critère de tenue est l'absence de claquage ;
- ❖ **Méthode 2** : on alimenté le transformateur avec une tension d'essai de l'ordre de 1.3 à 1.5 fois la tension nominale pendant une durée d'environ 30min. Le critère de réussite est la maitrisé du niveau de décharges partielles, qui caractérisé l'ionisation des isolants à l'intérieur du transformateur.

L'essai par tension induite est satisfaisant s'il ne se produit aucun effondrement de la tension d'essai.

II.3.2 Les essais aux ondes de choc (ou « essais à haute fréquence ») :

Ces essais simulent essentiellement les surtensions atmosphériques (choc de foudre) et les surtensions liées à des manœuvres de coupures.

- Essais aux chocs de manœuvres :

Les surtensions de manœuvre se répartissent pratiquement proportionnellement aux nombres de spires des enroulements, la forme de la tension appliquée dans cet essai présentée dans la figure II.3.

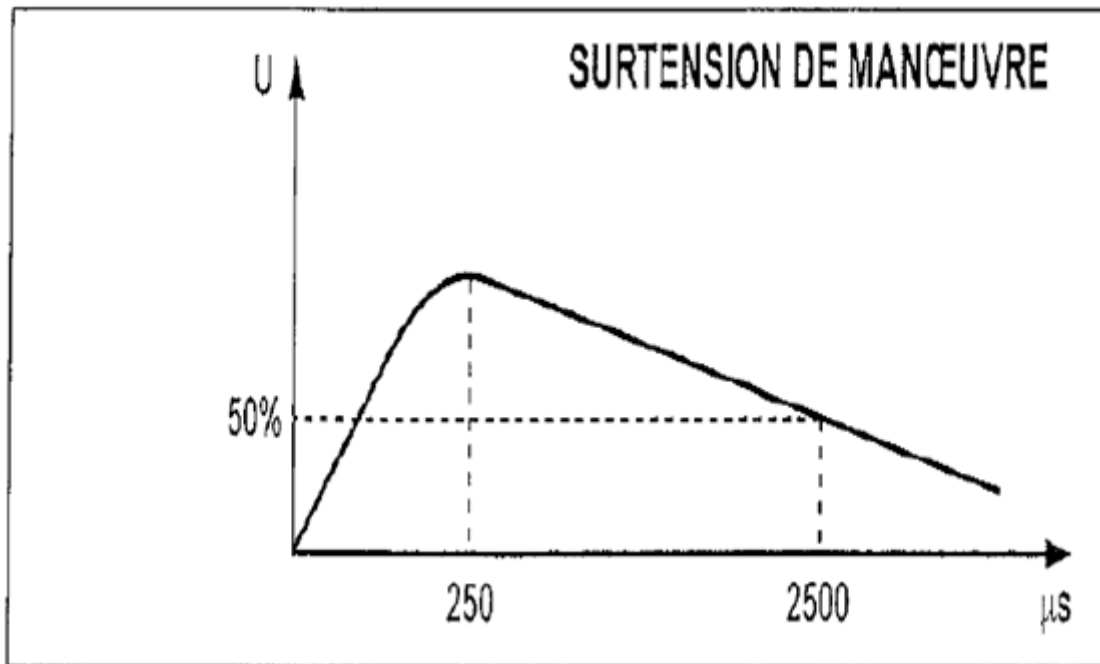


Figure II.3 Forme de la tension appliquée en surtension de manœuvre.

- Essai aux chocs de foudre

Cet essai vérifie la tenue au choc de foudre de chaque enroulement par rapport à la masse et par rapport aux autres enroulements et la long de l'enroulement testé. On distingue deux formes :

➤ Choc de foudre « onde pleine »

La valeur crête est souvent désignée par le terme BIL (Basic Insulation Level) (voir Figure II.4).

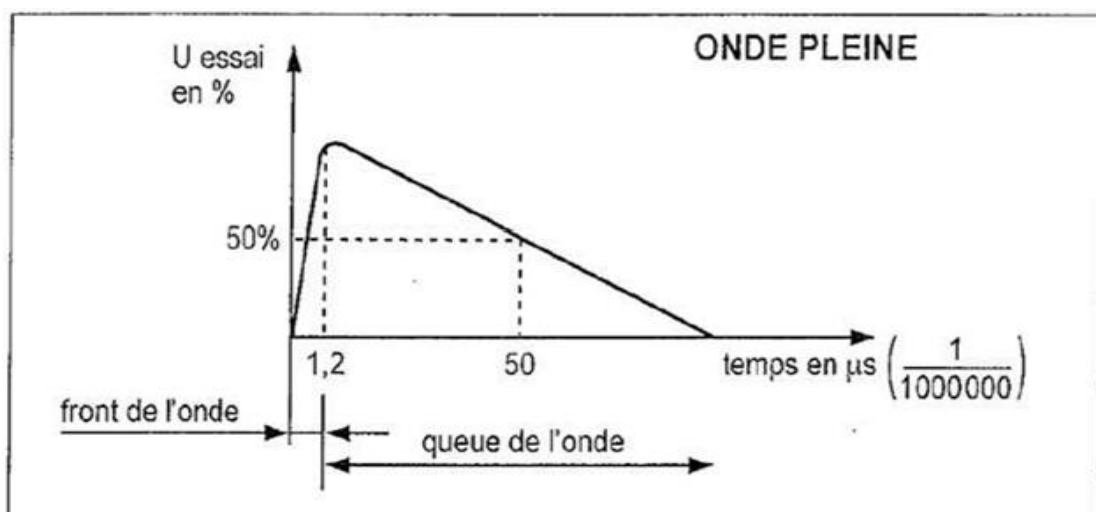


Figure II.4. Onde pleine.

➤ **Choc en onde coupée (essai spécial)**

Dans la norme CEI, les essais en onde coupée ne sont faits que sur demande du cahier des charges (Figure II.5)

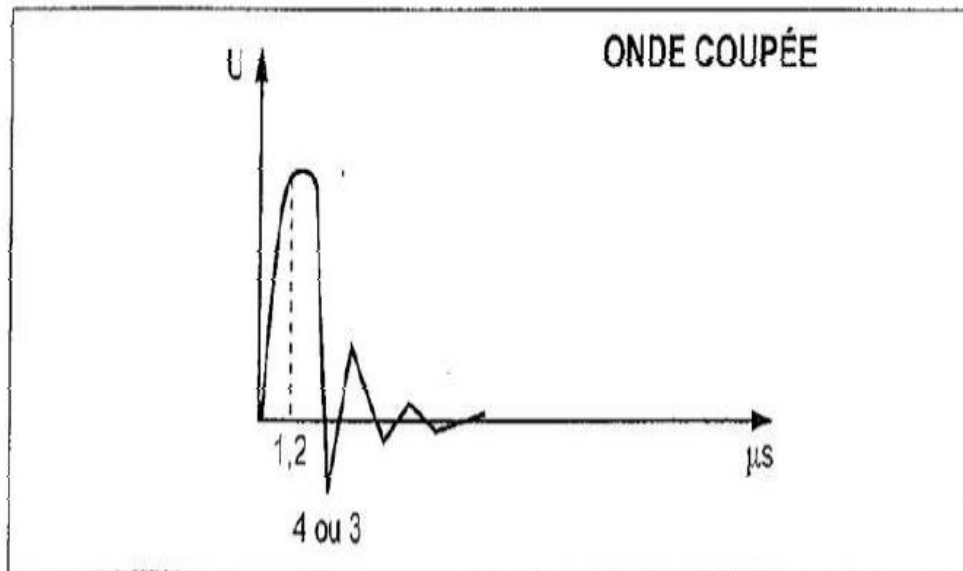


Figure II.5. Onde coupée.

II.4. Normes CEI relatives aux transformateurs de puissance (CEI60076-3 : niveaux d'isolement et essais diélectriques)

Pour les transformateurs immergés dans l'huile, les prescriptions suivantes s'appliquent seulement à l'isolement interne. Pour les essais diélectriques, il n'est pas nécessaire de monter les équipements qui n'ont aucune influence sur la rigidité diélectrique de l'isolement interne, comme par exemple l'équipement externe de réfrigération.

II.4.1. Les règles de base

Elles définissent les exigences relatives à l'isolement et les essais diélectriques. Ils sont résumés dans le tableau ci-dessous tableau II.1.

Catégorie d'enroulement	Tension la plus élevée pour le matériel U_m (kV)	Essais				
		Choc de foudre (CF)	Choc de manœuvre (CM)	Longue durée FI (FI-LD)	Courte durée FI (FI-CD)	Tension appliquée (FI)
Isolation uniforme	$U_m \leq 72,5$	Type (1)	Non applicable	Non applicable (1)	Routine	Routine
Isolation uniforme et non uniforme	$72,5 < U_m \leq 170$	Routine	Non applicable	Spécial	Routine	Routine
	$170 < U_m < 300$	Routine	Routine (2)	Routine	Spécial (2)	Routine
	$U_m > 300$	Routine	Routine	Routine	Spécial	Routine

Tableau II.1. Les règles de base.

- (1) Dans certains pays, pour les transformateurs dont $U_m < 72,5$ KV, les essais CF sont des essais de Routine et les essais FI LD sont des essais de routine ou des essais de type.
- (2) Si l'essai FI CD est spécifié, l'essai au choc de manœuvre n'est pas nécessaire (il convient que ceci soit clairement notifié dans l'appel d'offre).

II.4.2. Essais diélectriques :

Les essais doivent, lorsqu'ils sont applicables et lorsqu'aucune disposition n'a fait l'objet d'un accord, être exécutés dans l'ordre suivant :

➤ **Essai de manœuvre (CM) pour les bornes de ligne**

Cet essai permet de vérifier la tenue au choc de manœuvre des bornes de ligne et de (ou des) enroulements qui y sont connectés par rapport à la terre et aux autres enroulements ainsi que la tenue le long des enroulements (et entre phases pour les transformateurs triphasés).

➤ **Essai de choc de foudre (CF) pour les bornes de ligne**

Cet essai est destiné à vérifier la tenue au choc de foudre du transformateur en essai quand l'onde est appliquée sur ses bornes de ligne.

❖ **Séquence d'essai**

Un choc à niveau réduit (entre 20 et 75 % de la pleine tension d'essai) suivi de 3 chocs à pleine tension (onde 1,2 /50 us).

❖ Essai spécial choc de foudre coupée sur la queue (onde coupée)

Cet essai doit être prescrit au moment de l'appel d'offre. Il est en particulier recommandé pour les cas où le transformateur est directement connecté à un poste blindé SF₆ par l'intermédiaire de traversées huile/SF₆. La valeur crête de l'onde est de 10% supérieure à celle de l'onde pleine.

➤ Essai de choc de foudre (CF) pour la borne neutre

Cet essai est destiné à vérifier la tenue au choc de la borne neutre et des enroulements qui y sont connectés par rapport à la terre, par rapport aux autres enroulements et le long du ou des enroulements soumis à l'essai. Lors de cet essai, la durée du front de l'onde peut être au maximum de 13 μs.

➤ Essai de tension de tenue par source séparée (FI) (appelé également essai par tension appliquée)

Cet essai est destiné à vérifier la tenue en tension appliquée des bornes de ligne et de neutre et des enroulements qui y sont connectés, par rapport à la terre et aux enroulements.

➤ Essai par tension induite de courte durée (FI-CD)

Cet essai est destiné à vérifier la tenue de chaque borne de ligne et des enroulements qui y sont connectés par rapport à la terre et aux enroulements, la tenue entre spires des enroulements et la tenue entre (pour les transformateurs triphasés). Pour $U_m > 72,5 \text{ KV}$, l'essai se fait avec mesure du niveau de décharges partielles.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les essais diélectriques réalisés sur les transformateurs de puissance. Dans le chapitre suivant, nous verrons le détail d'une simulation par éléments finis qui a été réalisée pour estimer les contraintes électriques engendrées par l'existence d'une pollution métalliques dans le bobinage des transformateurs de type cuirassé.

Chapitre 3

Présentation de l'étude de simulation

Introduction

Les enroulements de transformateur cuirassé sont pollués par des particules métalliques à cause d'un incident lors de la construction. Cette pollution se présente sous forme de fines particules métalliques issues du frottement accidentel entre deux pièces mécaniques en métal du tour à bobiner (figure III.1a & figure III.1b).

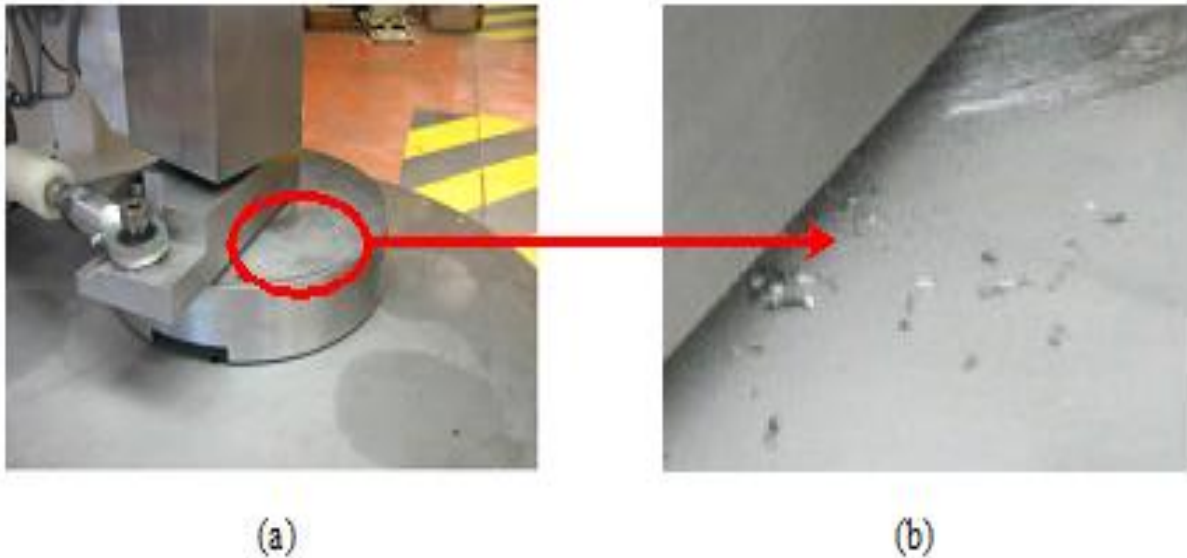


Figure III.1. (a) Vue sur le tour à bobiner : frottement entre deux pièces métalliques ; (b) particules métalliques retrouvées sur les conducteurs des bobines (limaille).

III.1. Géométrie du model étudié

L'existence d'une particule métalliques entre deux spires d'enroulement provoque des anomalies et des contraintes électriques, dans la figure ci-dessous on observe deux spires, chaque spire est représenté par un conducteur en cuivre isolé avec des couche de papier. L'épaisseur d'isolation étant égale à « $g/2$ » ; par conséquent « g » représente la distance cuivre-cuivre des deux conducteurs. Le processus d'étude utilisé dans notre projet est le champ électrique entre deux spires indiquées dans la figure III.2b. Le champ électrique dans cette zone est donc uniforme à cause de la configuration géométrique des électrodes de type plan-plan, Ainsi, le champ électrique moyen n'est donc que le rapport de la DDP entre les conducteur (noté VPS pour Volts Par Spire) sur la distance qui les sépare (g) :

$$E_{\text{moy}} = \text{VPS}/g.$$

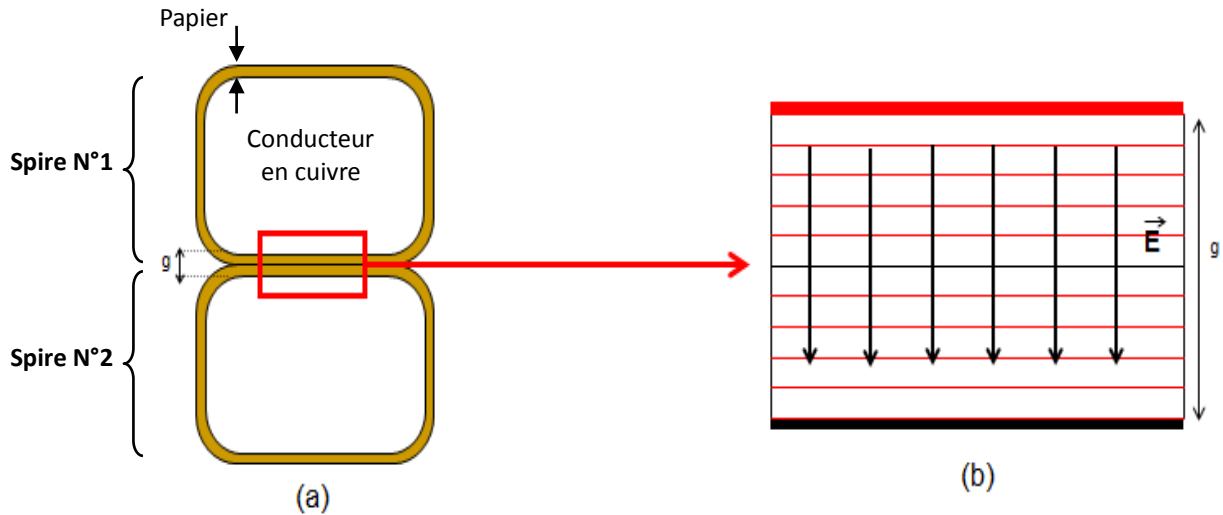


Figure III.2. (a) Vue en coupe de deux spires ; (b) Vue agrandie de la zone étudiée.

III.2. Le Model étudié

Partant de la vue détaillé dans la figure III.2.b, on introduit une coupe vertical entre deux spires qui représenter une particule (à leur frontières géométriques), pour obtenir au final le model étudié présenté dans la figure III.3.

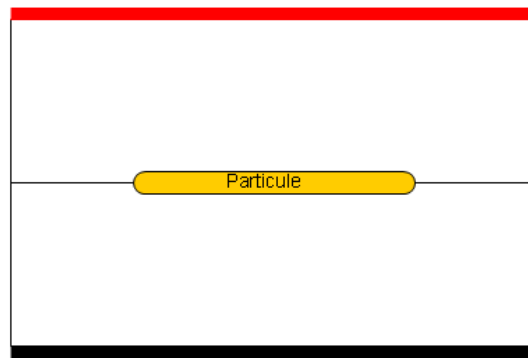


Figure III.3. Model étudié sous Flux 2D (particule entre deux conducteurs).

Afin de connaître l'effet de la particule métallique sur la répartition du champ électrique entre les deux spires, il est nécessaire de connaître les données suivantes :

- ✓ le potentiel maximum appliqué entre les deux conducteurs (VPS) ;
- ✓ Epaisseur du guipage ou distance entre spire (g) ;
- ✓ Longueur de la particule ;
- ✓ Epaisseur de la particule.

III.3 Utilisation du logiciel de simulation FLUX 2D (version.11.2)

Flux 2D/3D est un logiciel de simulation numérique utilisé en conception assistée par ordinateur. Il utilise la méthode des éléments finis et permet le calcul des états magnétiques, électriques ou thermiques des dispositifs en régimes permanents, transitoires et harmoniques, avec des fonctionnalités d'analyse multiparamétriques étendues, les couplages circuit et cinématique. Ceci nécessite la résolution d'équations diverses: équations de Maxwell, de la chaleur, loi de comportement des matériaux. De par la difficulté de la résolution simultanée de ces équations, le code est découpé en un ensemble de modules chargés de résoudre chacun un type de problème donné (c'est-à-dire les équations à utiliser et les hypothèses associées).

Flux est développé (en collaboration avec le G2ELab, fusion du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, du Laboratoire d'Electrostatique et Matériaux Diélectriques et du Laboratoire de Magnétisme du Navire) et distribué en France par la société CEDRAT.

III.4 Paramètres concernant la particule métallique

L'introduction d'une particule dans le guipage entre deux spires nous conduit à envisager différentes dispositions. Le tableau III.1, rassemble les différents paramètres dimensionnels retenus pour la simulation pour chacune des trois dispositions. Elle peut être disposée horizontalement (figure III.4) ou verticalement (figure III.5) ou le cas d'inclusion (figure III.6.).

	Descriptions	Valeurs	Unité
g	Guipage (ou distance entre spire)	0,8	mm
E	Epaisseur des conducteurs	10	mm
A	Epaisseur particule	150	µm
B	Longueur particule	0,3	mm
D	Décalage particule % au centre du guipage	0	mm

Tableau III.1. Paramètres de la simulation relatifs à la particule verticale.

❖ Particule verticale

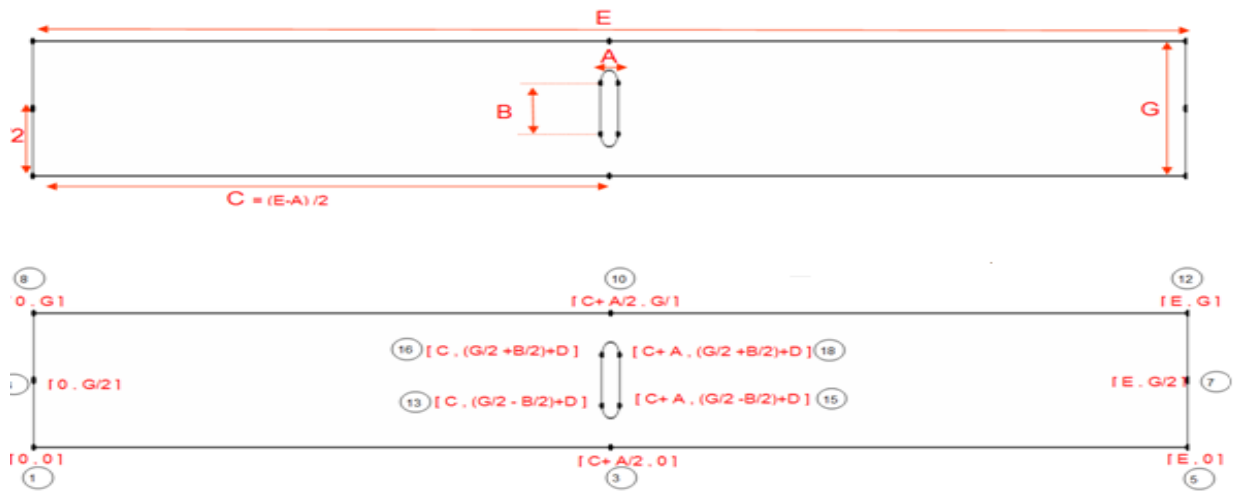


Figure III.4. Disposition verticale de la particule dans le guipage.

❖ Particule horizontale

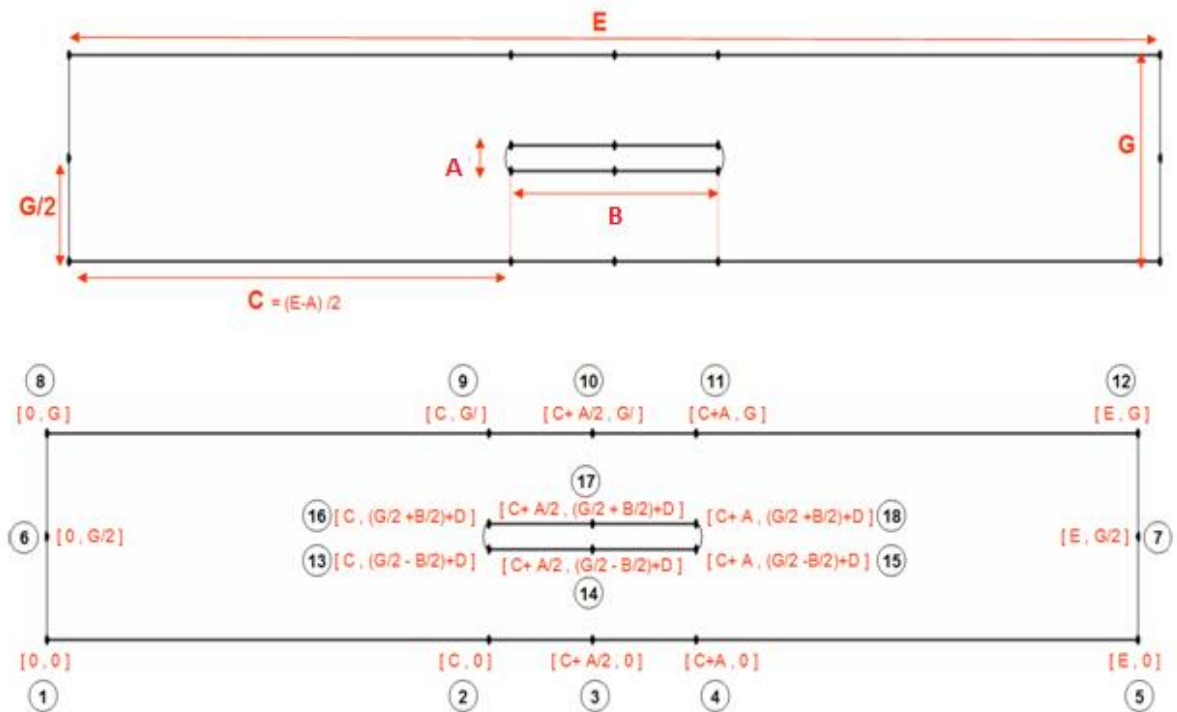
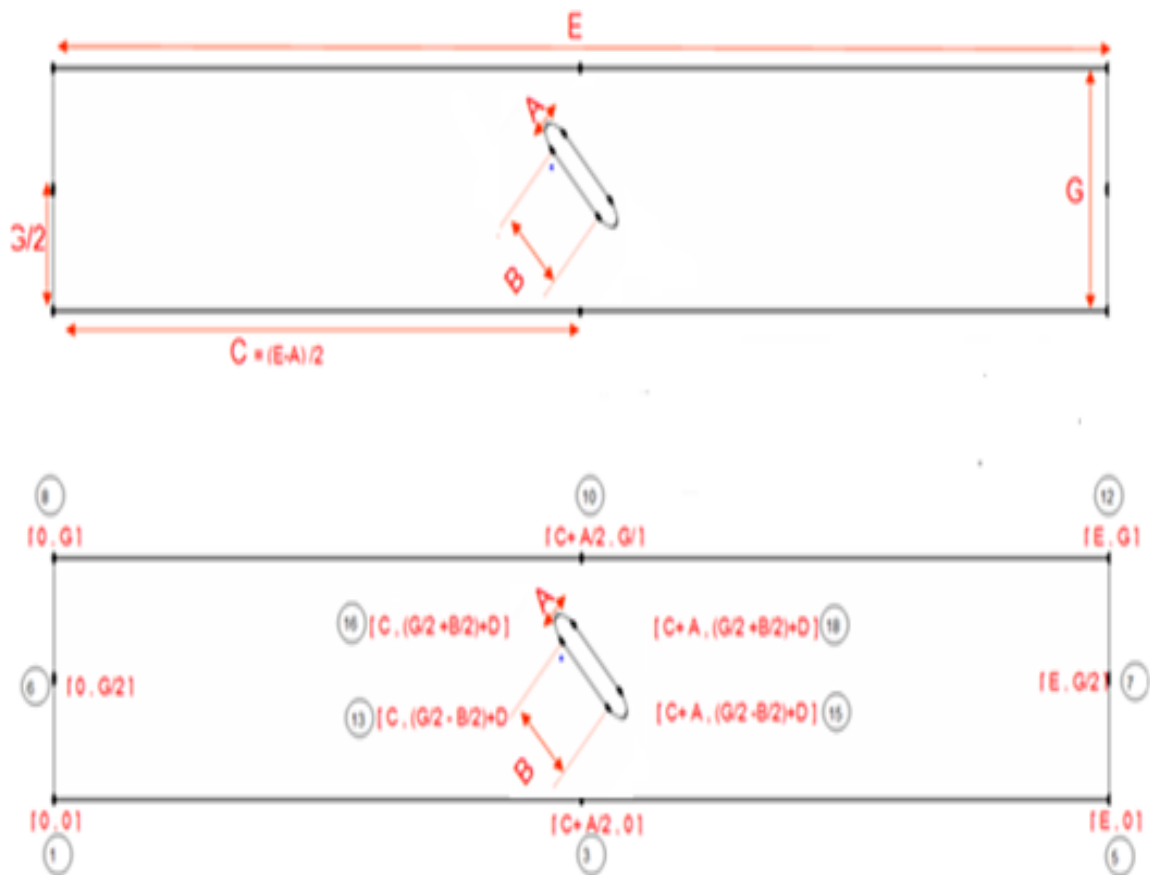


Figure III.5. Disposition horizontale de la particule dans le guipage.

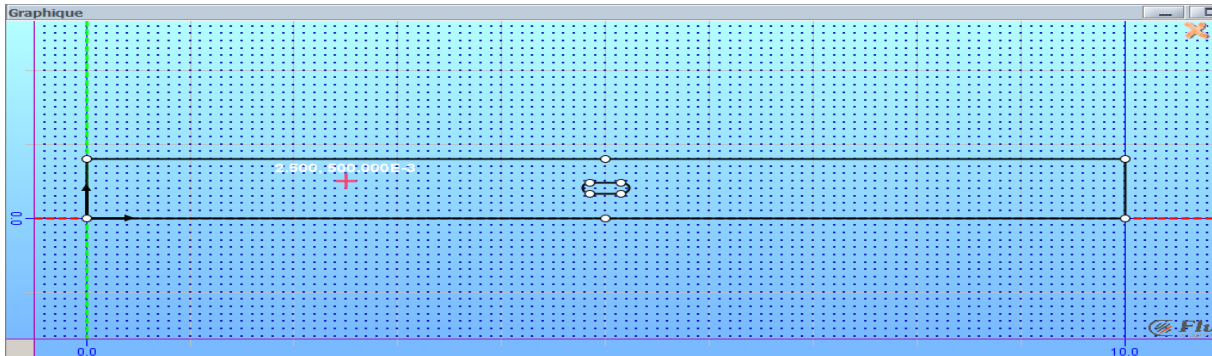
❖ Particule inclinée



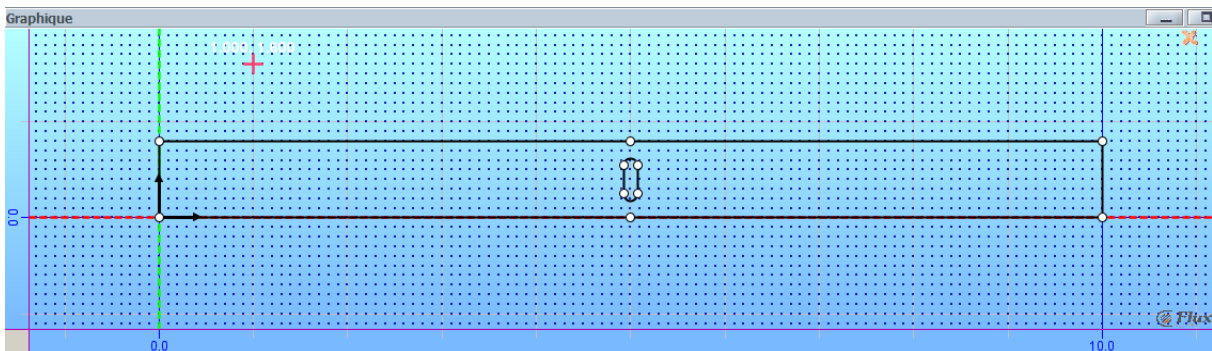
III.5.1 Création de la géométrie du model

Le guipage, la particule métallique et les deux spires sont représentés en coupe verticale sur la figure III.7.

Face particule horizontale



Face particule verticale



Face particule inclinée

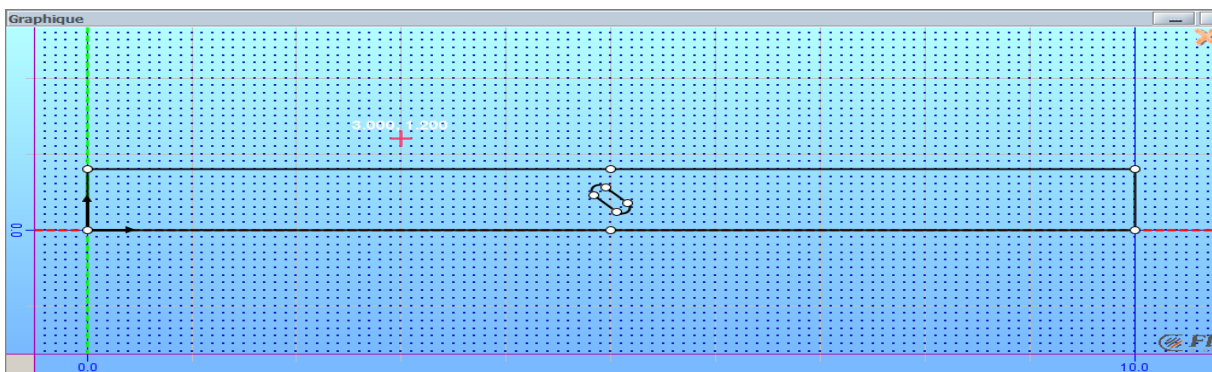


Figure III.7. Représentation par Flux 2D de la géométrie du dispositif.

❖ Construction des faces

Les faces sont automatiquement identifiées et construites par Flux en utilisant l'algorithme de construction automatique. Les faces sont affichées dans la zone graphique comme les montrent les figures ci-dessous.

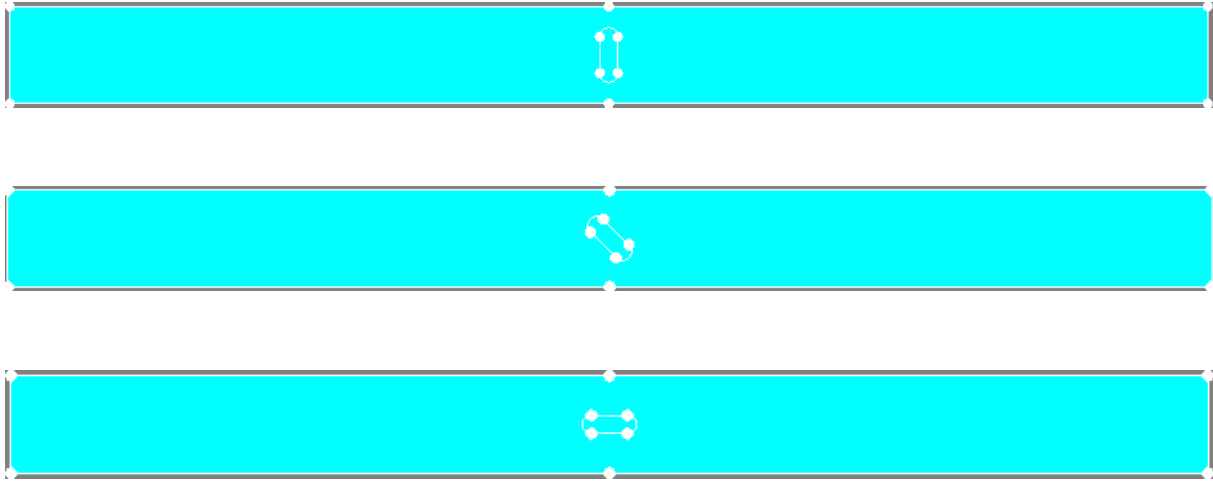


Figure III.8. Création automatique des faces.

❖ Suppression d'une face

Dans chaque position, la face représentant le volume de la particule est supprimée pour réduire le processus de maillage, d'autant plus que les calculs dans cette zone ne sont pas nécessaires (le champ électrique à l'intérieur de la particule est nul). La face est donc supprimée comme le montre la figure III.9.

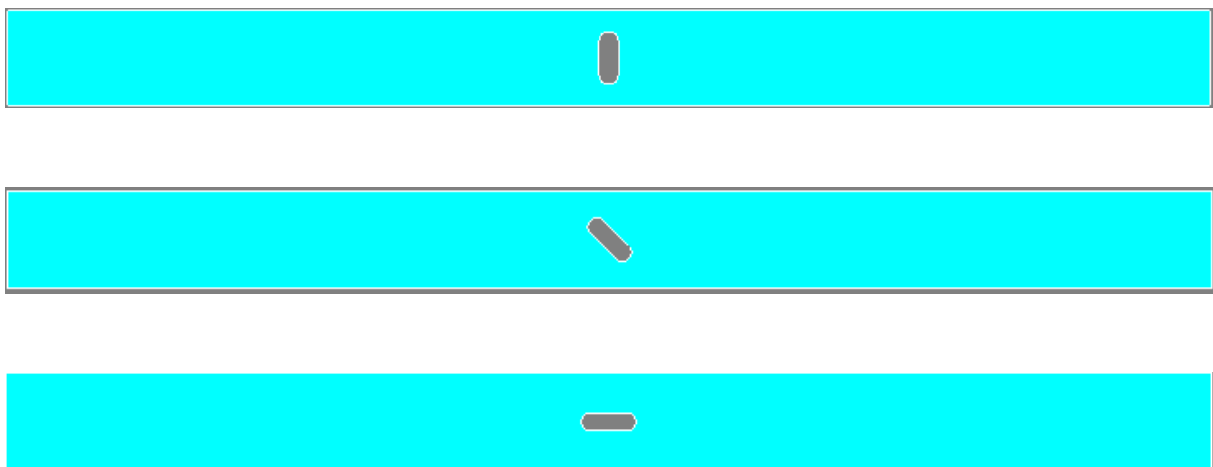


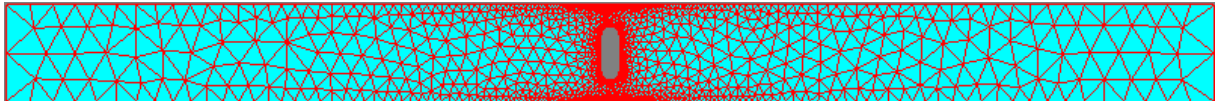
Figure III.9. Suppression de la face représentant l'intérieur de la particule.

III.5.2. Maillage de la géométrie du model

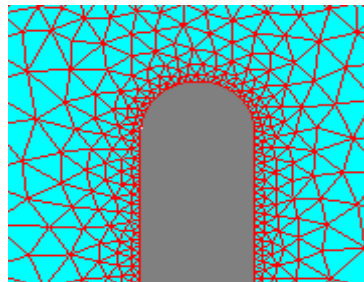
Le processus de génération du maillage est une étape essentielle de la méthode des éléments finis. À ce stade, le domaine de calcul est divisé en petits éléments. Chaque nœud du maillage constitue un support où différentes grandeurs physiques sont calculées.

Dans notre géométrie, il y a deux zones dans lesquelles les dimensions des éléments sont différentes, triangles très petits proches du système à étudier qui concerne la partie arrondie de la particule et plus grands ailleurs. Ce choix de maillage nous permet d'augmenter la précision de calcul de la répartition du champ électrique et de maintenir le temps d'exécution du programme réduit. Le maillage est représenté dans la figure III.10 indiquant également le degré de finesse utilisé dans la partie arrondie de la particule.

Face particule verticale

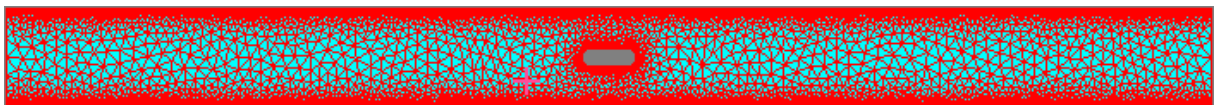


(a)

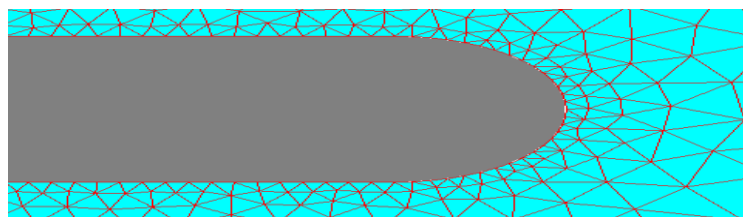


(b)

Face particule horizontale



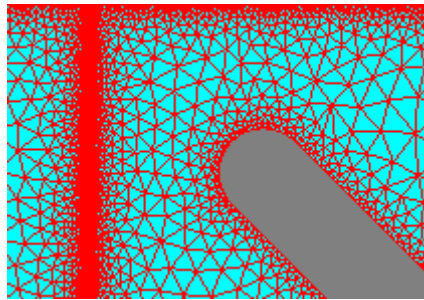
(a)



(b)

Face particule inclinée

(a)



(b)

Figure III.10. (a) Génération de maillage ; (b) Zoom sur la partie arrondie de la particule.**III.5.3. Description du processus physique**

Cette section contient les rubriques suivantes :

➤ **Création des Matériaux / régions surfaciques**

La création d'entités «matériaux» permet d'affecter les propriétés du matériau à la région surfacique associée. Le matériau ici est le papier imprégné d'huile. Il est linéaire, isotrope et caractérisé par la permittivité relative: ($\epsilon_r = 4.5$).

➤ **Création des régions linéiques**

Trois régions linéiques sont créées pour définir les conditions aux limites (haute tension, masse, et potentiel flottant de la particule) :

- Deux conditions sur les électrodes, afin de définir les valeurs du potentiel électrique:
 $V = 100 \text{ V}$ sur l'électrode supérieure (région de ligne HT) ;
 $V = 0 \text{ V}$ sur l'électrode inférieure (région de ligne Masse).
- Potentiel flottant (PF) (région linéique de particule).

➤ **Affectation des régions surfaciques et linéiques**

La région surfacique papier-huile « PH » est attribuée à la face (guipage) et les régions linéiques comme suit : « HT » à l'électrode supérieure ; « Masse » à l'électrode inférieure ; « PF » au contour de la particule. L'affectation est présentée dans la Figure III.11.

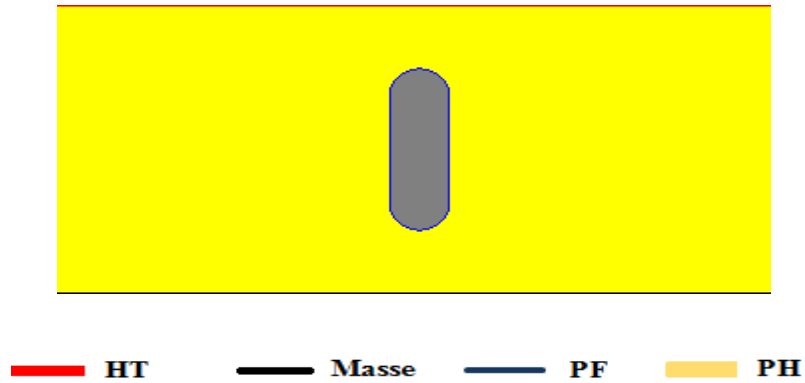


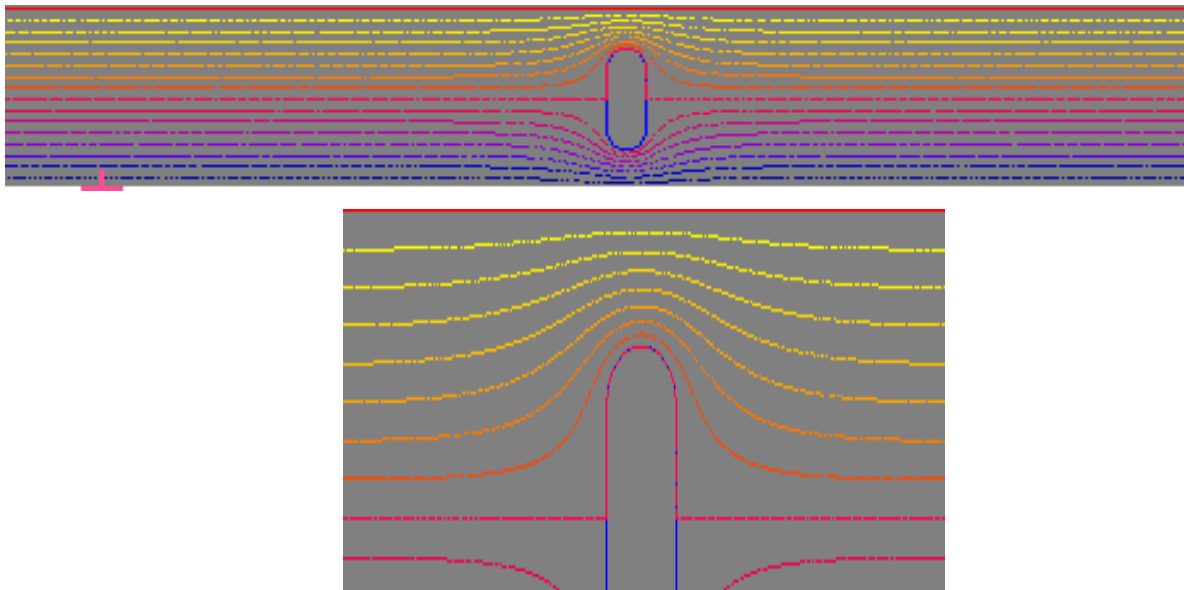
Figure III.11. Affectation des régions linéiques et surfaciques au mode.

III.5.4. Processus de résolution

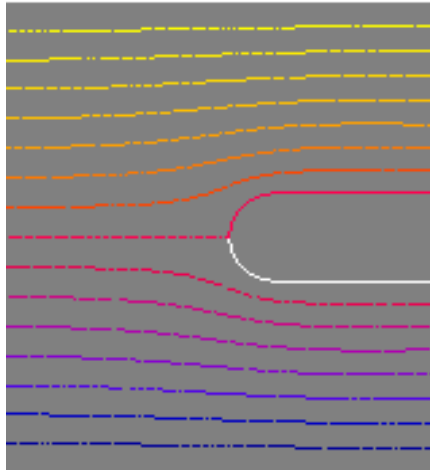
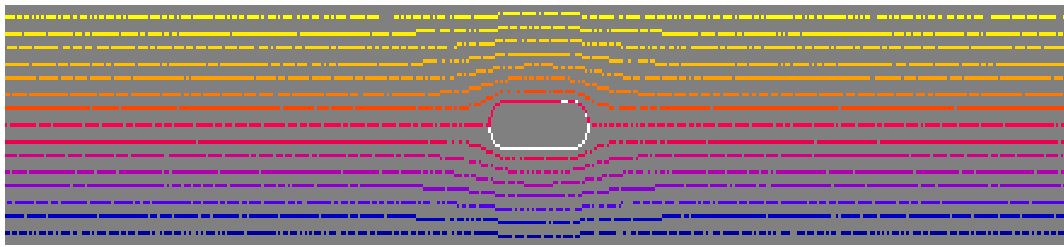
❖ **Affichage des lignes équipotentielles**

La figure III.12 représente la déformation des lignes équipotentielles introduite par la particule métallique, notamment au niveau de son arrondi où on remarque un resserrement des lignes équipotentielles.

Face particule verticale



Face particule horizontale



Face particule inclinée

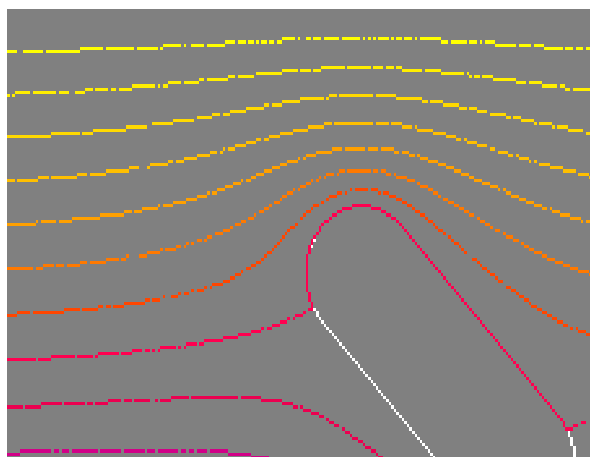
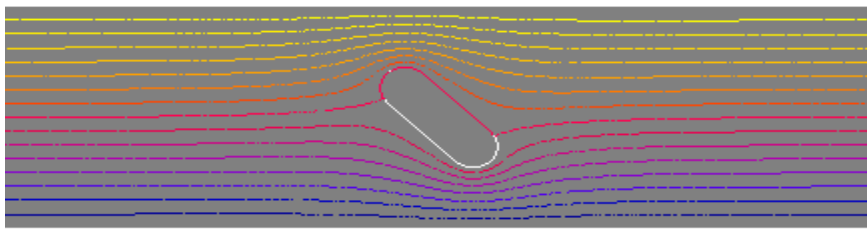


Figure III.12. Effet de la disposition de particule sur les lignes équipotentielles.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des possibilités de simulation à travers le logiciel Flux2D pour étudier l'impact de la pollution métallique issue du frottement de deux pièces métalliques lors de l'opération de bobinage.

La partie «Exploitation » du logiciel nous a permis de déduire les valeurs maximales du champ électrique afin de calculer les contraintes électriques engendrées par la présence de ces fines particules. Ainsi que l'influence de chaque disposition de la particule métallique dans le guipage.

Ainsi, et à l'aide des éléments présentés ici, on peut aisément calculer dans le chapitre suivant les contraintes réelles qui apparaissent entre spires lors des différents essais électriques appliqués au transformateur.

Chapitre 4
Calculs et Analyse des Résultats

Introduction

Dans ce chapitre nous décrivons les résultats des essais obtenus par simulation ainsi que leur analyse et comparaison avec les calculs empiriques.

IV.1. Équations de calcul empirique

Les constructeurs disposent actuellement de moyens de calcul performants pour déterminer avec une bonne précision le champ électrique dans le bobinage du transformateur. Ce dernier est comparé avec des valeurs calculées avec des équations empiriques issues de nombreux essais électriques. On trouve des équations pour les essais basses fréquences (BF) et les essais hautes fréquences (HF) et ceci pour différents types et qualités de papier. Le tableau IV.1 présente les équations empiriques que nous allons utiliser dans notre étude pour les deux essais BF (essai de tension induite) et HF (essai de choc de foudre en onde pleine « OP »). Ces équations permettent de calculer le champ électrique admissible (maximum) pour chacun de ces essais et pour deux types de papier (type D et type Z).

	Basse fréquence (BF)	Onde pleine (OP)
Papier Type-Z	$E = 23G^{-29}$	$E = 45G^{-16}$
Papier Type-D	$E = 24.5G^{-29}$	$E = 64G^{-16}$

Tableau IV.1. Équations empiriques du champ électrique admissible en BF et OP selon le type de papier.

E : champ électrique admissible en (kV/mm).

G : épaisseur du guipage en (mm).

Le tableau IV.2 présente les valeurs du champ électrique calculées avec les équations empiriques indiquées dans le tableau IV.1. Ces valeurs représentent donc le seuil admissible (à ne pas dépasser) pour le champ électrique en fonction du type de guipage ainsi que de son épaisseur.

	Type-D			Type-Z		
G (mm)	0,8	1	1,2	0,8	1	1,2
E_{BF} (kV/mm)	26,14	24,50	23,24	24,54	23,00	21,82
E_{OP} (kV/mm)	66,33	64,00	62,16	46,64	45,00	43,71

Tableau IV.2. Valeurs admissibles du champ électrique (BF & OP) en fonction de la qualité et l'épaisseur du guipage « G ».

La figure IV.1 montre d'une façon claire la prédominance du papier de type D sur le type Z, et ceci que ça soit en basse fréquence ou en onde pleine.

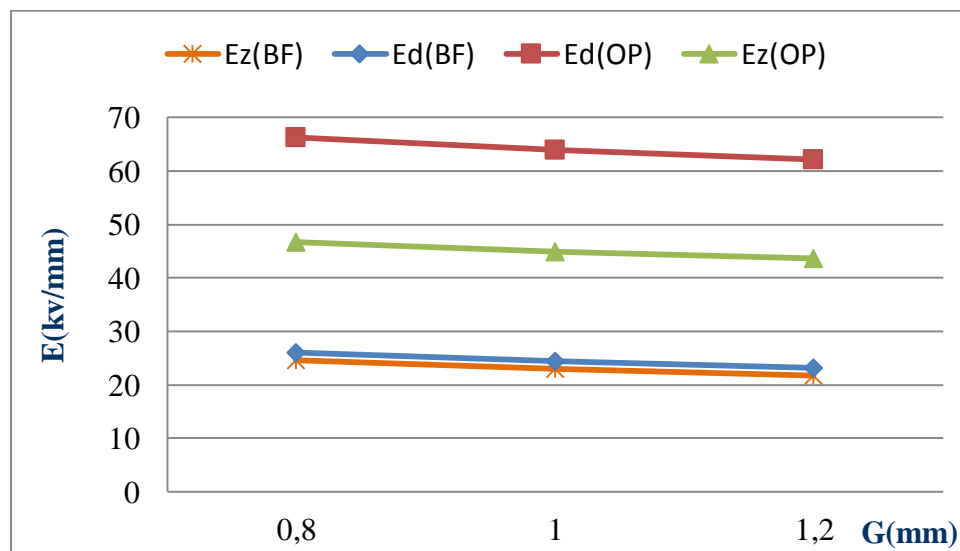


Figure IV.1. Représentation des valeurs du champ électrique en fonction de guipage pour les deux types de papier (type-D & type-Z).

Exploitation des résultats

Nous présenterons dans ce qui suit, les résultats de simulation réalisée pour les trois cas de figure considérés dans cette étude. La première concerne l'hypothèse que la particule se trouve piégée horizontalement entre les deux spires. La seconde, moins probable, traite le cas où la particule se retrouve en position verticale. La troisième, intermédiaire entre les deux précédentes où la particule se retrouve inclinée de 45° . Dans les trois cas, on calculera les résultats de calcul pour les essais BF et OP. Les valeurs de la tension d'essai appliquée à la bobine de la ligne HT ont permis de calculer les valeurs VPS (tension entre spires) pour chacun de ces deux essais. On obtient ainsi une tension entre les deux spires de 3kV et de 39kV respectivement pour l'essai BF et l'essai OP.

IV.2.1. Disposition horizontale de la particule (DH)

❖ Courbe de variation du champ électrique le long d'un chemin

Pour observer la variation du champ électrique dans la zone considérée, on définit un chemin dans la région surfacique (papier-huile). La figure VI.2.a présente le chemin choisi (rayon de courbure de la particule). La figure IV.2.b montre la variation du champ électrique le long de ce chemin. On y voit clairement les zones avec une forte accentuation du champ électrique au voisinage des points C_1 et C_3 qui coïncident avec la fin de l'arrondi de la particule et les zones où le champ électrique diminue (point C_2).

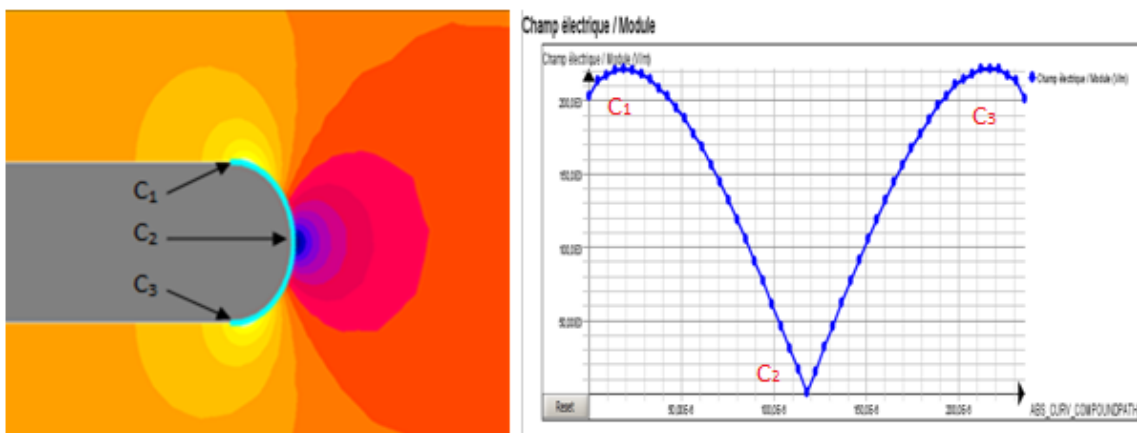


Figure IV.2. (a) Création d'un chemin en DH; (b) La courbe du champ le long de l'arrondi de la particule(DH).

❖ Valeurs du champ électrique sous Flux 2D

Nous avons réalisé des simulations en considérant dans Flux 2D un potentiel (VPS) de 100 V entre les deux spires. Ceci afin de pouvoir facilement transposer les calculs en fonction des valeurs réelles de la tension qui apparaît entre spires lors des essais BF et OP (en utilisant une simple règle de trois).

Les valeurs maximum du champ électrique obtenues donc par simulation sont représentées ci-dessous pour la valeur de 100V (tableau IV.3).

VPS (V)	100	$E_{max}(kV/mm)$
paramètres		
A(μm) /G(mm)		0,8
150		0.22

Tableau. IV.3. Valeurs du champ électrique maximal (E_{max}).

A : épaisseur de la particule ; **G** : épaisseur du guipage

❖ Calcul du champ électrique réel

La tension réelle qui apparaît entre deux spires de la bobine HT est de 3kV et 39kV respectivement pour l'essai BF et l'essai OP. A partir des valeurs du champ électrique pour un potentiel de 100 V, on a calculé dans les tableaux (IV.4 & IV.5) le champ électrique réel maximum qui apparaît dans le guipage. Cette valeur s'obtient toujours au niveau de l'arrondi de la particule où le champ électrique est le plus élevé dus à la forte distorsion des lignes équipotentiellles dans cette zone.

➤ Basse Fréquence (BF) :

VPS (kV)	3	$E_{max} (kV/mm)$
Paramètres		
A(μm)/G(mm)		0,8
150		6.64
$E_{moy} (kV/mm)=VPS/G$		3,75

Tableaux. IV.4. Valeurs du champ électrique maximal & moyen (E_{max} , E_{moy}) en basse fréquence.

➤ **Onde pleine (OP) :**

VPS (kV)	39	E_{max} (kV/mm)
Paramètres		
B(μm)/g(mm)		0,8
150		86.36
Emoy (kV/mm)=VPS/G		48.75

Tableau IV.5. Valeurs du champ électrique maximal & moyen (E_{max} , E_{moy}) en onde pleine.

IV.2.3. Disposition verticale de la particule(DV)

On définit un chemin dans la région surfacique (papier-huile) comme le montre la figure IV.7a. la courbe de la variation du champ électrique le long du chemin choisi est représenté dans la figure IV.7b ou le champ électrique est plus intense (point C_2) et diminue dès que l'on s'approche légèrement des points C_1 et C_3 .

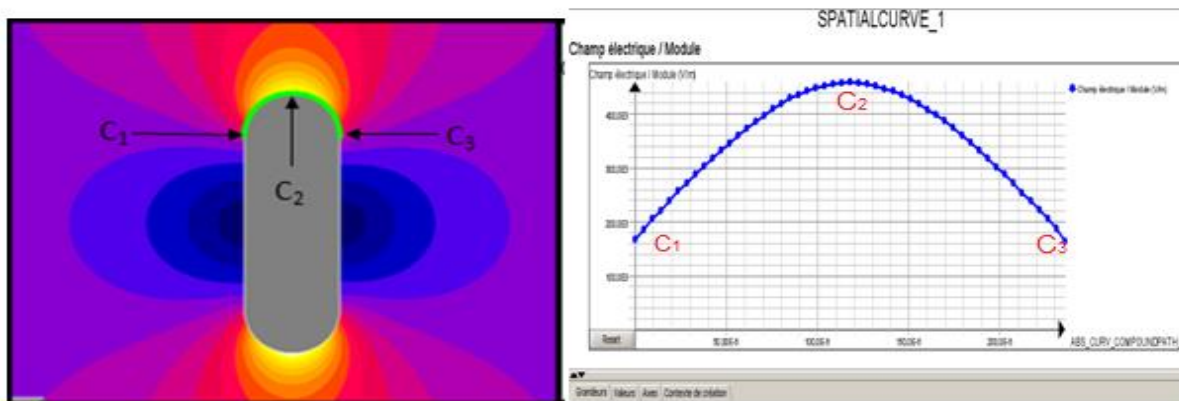


Figure IV.7. (a)Création d'un chemin en DV; (b) La courbe du champ en fonction des points du chemin(DV)

❖ Valeurs du champ électrique sous Flux 2D

Nous présentons ci-dessous (tableau IV.6) les résultats du champ électrique obtenus par simulation pour une tension de 100 V.

VPS(V)	100	E _{max} (kV/mm)
Paramètres		
B (mm)/A (µm)		150
0,3		0.49

Tableau. IV.6. Valeurs du champ électrique maximal (E_{max}) données par Flux 2D.

A: épaisseur de la particule

B : longueur de la particule

❖ Calcul du champ électrique réel

Les résultats d'essais (BF) et (OP) sont présentées dans les tableaux (IV.7 & IV.8).

➤ Basse Fréquence(BF) :

E _{moy} (kV/mm)=VPS/G		3.75
VPS (kV)	3	E _{max} (kV/mm)
Paramètres		
B (mm)/A(µm)		150
0.3		14.42

Tableaux. IV.7. valeurs du champ électrique maximal & moyen (E_{max} , E_{moy}) en basse fréquence

➤ Onde pleine(OP) :

E _{moy} (kV/mm)=VPS/G		48.75
VPS (kV)	39	E _{max} (kV/mm)
paramètres		
B (mm)/A(µm)		150
0,3		191.36

Tableau. IV.8. valeurs du champ électrique maximal & moyen (E_{max} , E_{moy}) en onde pleine.

IV.2.4. Disposition inclinée de la particule(DI) :

On définit un chemin dans la région surfacique (papier-huile) comme le montre la figure IV.12a. la courbe de la variation du champ électrique le long du chemin choisi est représenté dans la figure IV.12b

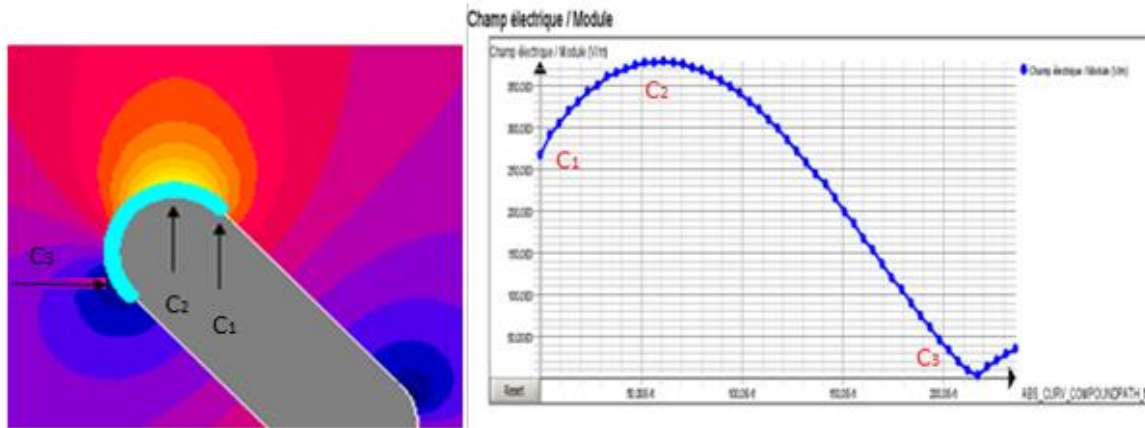


Figure IV.8. (a)Création d'un chemin en DI; (b) La courbe du champ en fonction des points du chemin(DI)

❖ Valeurs du champ électrique sous Flux 2D

Nous présentons ci-dessous (tableau IV.6) les résultats du champ électrique obtenus par simulation pour une tension de 100 V.

VPS (V)	100	$E_{max}(kV/mm)$
paramètres		
B (mm)/A(μm)		150
0.3		0.37

Tableau. IV.13. Valeurs du champ électrique maximal(E_{max}) données par Flux 2D

A: épaisseur de la particule

B : longueur de la particule

❖ Calcul du champ électrique réel

Les résultats d'essais (BF) et (OP) sont présentés dans les tableaux (IV.14 & IV.15).

➤ Basse Fréquence(BF) :

Emoy (kV/mm)=VPS/G		3,75
VPS (kV)	3	E_{max} (kV/mm)
paramètres		
B (mm)/A(μm)		150
0.3		11.35

Tableaux. IV.14. valeurs du champ électrique maximal & moyen (E_{max} , E_{moy}) en basse fréquence.

➤ Onde pleine(OP) :

Emoy (kV/mm)=VPS/G		48.75
VPS (kV)	39	E_{max} (kV/mm)
paramètres		
B (mm)/A(μm)		150
0.3		147.61

Tableau. IV.15.valeurs du champ électrique maximal & moyen (E_{max} , E_{moy}) en onde pleine

IV.3.Comparaison des résultats de simulation avec les valeurs empiriques

Les résultats obtenus dans les trois dispositions de la particule (DH, DV et DI) vont être comparés dans ce qui suit avec les valeurs admissibles présentés précédemment dans le tableau IV.2.

Cette comparaison a pour but de vérifier que le champ électrique atteint au niveau de la pointe de la particule n'excède pas les valeurs admissibles

IV.4 Tableau récapitulatif des résultats

Afin d'avoir une vue globale sur les cas considérés dans cette étude, on a repris dans le tableau IV.20 l'ensemble des résultats.

Disposition horizontale de la particule			
Essais	BF		OP
A	E_{max}		E_{max}
150	6.64		86.36
E_{moy}(BF)	3.75	E_{moy}(OP)	48.75
E_{Hmax}(BF)	6.64	E_{Hmax}(OP)	86.36
Disposition verticale de la particule			
A	150		150
Essais	BF		OP
B	E_{max}		E_{max}
0,3	14.72		191.36
E_{Vmax}(BF)	14.72	E_{Vmax}(OP)	191.36
Disposition inclinée de la particule			
A	150		150
Essais	BF		OP
B	E_{max}		E_{max}
0.3	11.35		147.61
E_{Imax}(BF)	11.35	E_{Imax}(OP)	147.61
Valeurs admissibles selon le type de papier (D ou Z) pour G=0,8mm			
E_{Dmax}(BF)	26,14	E_{Dmax}(OP)	66,33
E_{Zmax}(BF)	24.54	E_{Zmax}(OP)	46,64

Tableau. IV.20. Récapitulatif des valeurs maximales du champ électrique en kV/mm.

Une comparaison des valeurs maximum atteintes par le champ électrique avec les valeurs admissibles (pour le cas d'une épaisseur de guilage G=0,8mm).

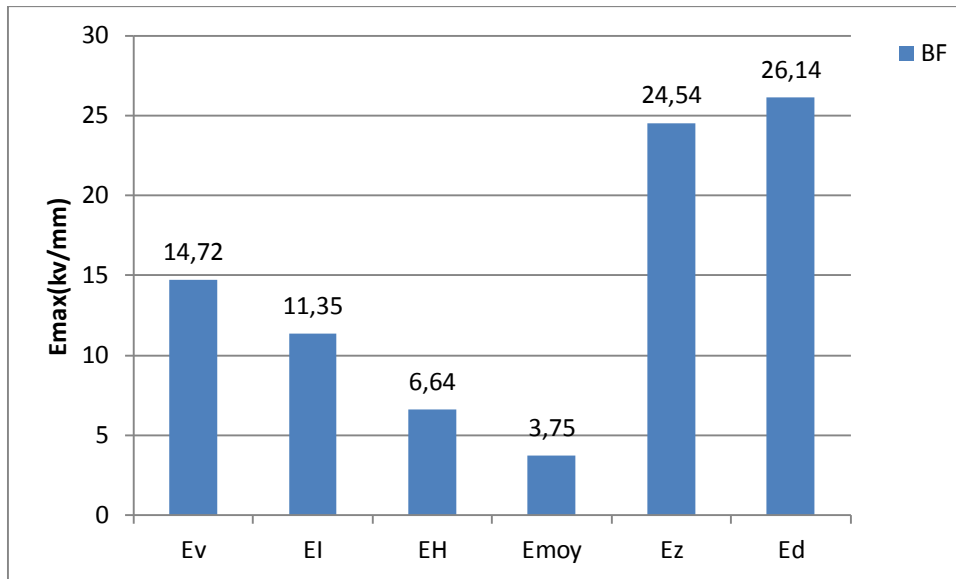


Figure IV.15. Comparaison des valeurs maximales du champ électrique avec les valeurs admissibles en (essai BF pour $G=0.8mm$).

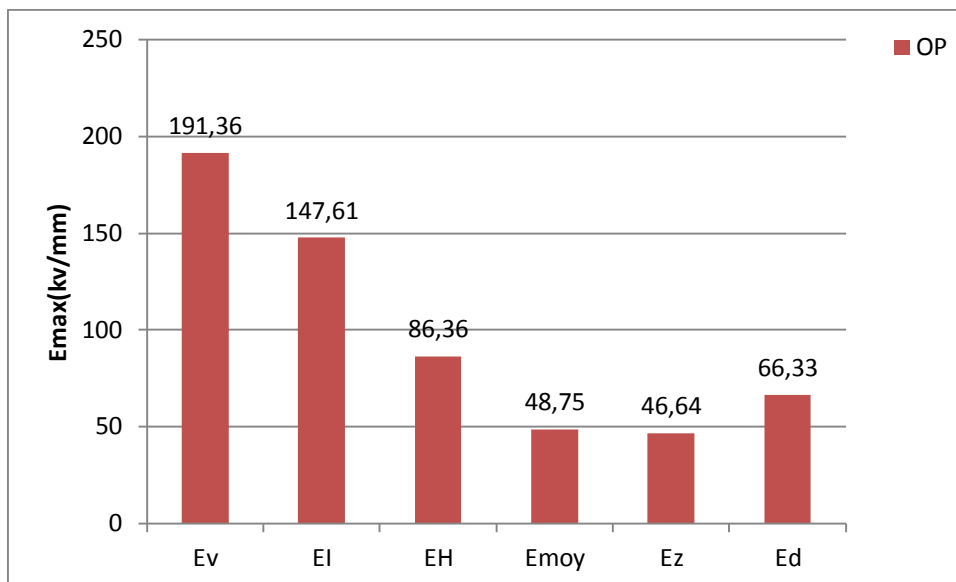


Figure IV.16. Comparaison des valeurs maximales du champ électrique avec les valeurs admissibles en (essai OP pour $G=0.8mm$).

E_v : Champ électrique maximal de la disposition verticale ;

E_h : Champ électrique maximal de la disposition horizontale ;

E_I : Champ électrique maximal de la disposition inclinée ;

E_{moy} : Champ électrique moyen ;

E_a : Valeur admissible pour le papier type D pour une épaisseur $G=0,8mm$;

E_z : Valeur admissible pour le papier type Z pour une épaisseur $G=0,8mm$.

Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre pour les différents paramètres considérés dans notre étude vérifient bien l'effet « nocif » de la présence de la particule métallique dans l'isolation des conducteurs. Le renforcement localisé du champ électrique au niveau de la pointe de la particule atteint son niveau maximum quand celle-ci est piégée verticalement dans le guipage

En effet, même en utilisant la meilleure qualité de papier (type-D), le champ électrique atteint 14.72kV/mm et 191.36kV/mm respectivement pour les essais BF et OP, alors que la valeur limite à ne pas dépasser dans ce guipage est de 24,54kV/mm et 66,33kV/mm respectivement. Ceci est dû au fait que dans cette configuration, la particule s'approche dangereusement de l'électrode haute tension, et par la forte distorsion des lignes équipotentielles conduisant ainsi à un champ fortement divergent dans cette zone.

Conclusion Générale

La qualité de l'isolation d'un transformateur dépend fortement de la propreté observée durant les différentes phases de sa fabrication. La présence d'une pollution dans la partie active du transformateur pourrait en effet affecter sa durée de vie et lui être fatale dans certains cas. Pour cette raison, les constructeurs de transformateurs accordent une attention particulière à la propreté des ateliers de fabrication et imposent à leurs opérateurs des règles très strictes pour éviter tout risque d'introduction de pollution ou de tout autre corps étranger dans le transformateur.

Cependant, le risque zéro n'existe pas et des accidents peuvent toujours survenir. L'étude présentée dans ce mémoire a traité justement un incident qui a eu comme conséquence une pollution des bobines d'un transformateur de puissance. Cette pollution se présente sous forme de particules métalliques déposées accidentellement suite à un dysfonctionnement du tour à bobiner.

Afin d'évaluer le risque encouru par une telle pollution, nous avons réalisé une étude sur une hypothèse qui ne pouvait être ignorée par le fabricant. Cette hypothèse consistait à supposer que des particules métalliques se seraient piégées entre deux spires des bobines et notamment celle de la ligne HT qui est la plus contrainte lors des essais électriques.

Partant de ce constat, on a créé un modèle pour simuler cette hypothèse afin de faire des calculs de champ électrique dans le guipage des conducteurs. Nous avons réalisé cette étude à l'aide du logiciel de simulation Flux 2D en considérant trois dispositions de la particule métallique entre les spires (disposition horizontale et verticale et inclinée de 45°).

Nous avons ainsi présenté dans le troisième chapitre le détail du modèle utilisé ainsi que les différents paramètres qui ont été considérés. Les résultats de simulation ont permis d'identifier la zone à fort champ électrique qui se trouve au niveau des extrémités de la particule où le champ électrique atteint son niveau maximum dans le guipage. On a ensuite confronté ces résultats avec les valeurs admissibles du champ électrique calculé empiriquement pour deux types de papier (type-Z et type-D).

Nous avons montré dans le chapitre 4 que le champ électrique atteint son maximum au niveau des extrémités de la particule où l'effet de pointe est prédominant. Il en résulte un renforcement localisé des lignes équipotentielles traduisant une forte divergence du champ

électrique.

On a montré également que lors de l'essai BF, les deux types de papier peuvent supporter l'élévation du champ électrique introduite par la présence des particules. Par contre, quand le guipage est soumis à l'essai de choc de foudre OP, les valeurs admissibles des deux papiers sont largement dépassées.

Au final, la présence éventuelle de telles particules constituerait un risque réel pour l'isolation entre spire. En effet, il n'est pas exclu qu'un court-circuit puisse se produire entre spires soit lors des essais OP, soit en service suites à des surtensions du réseau.

Nos résultats sont cohérents avec ceux de l'étude réalisée par le fabricant du transformateur, et ont confirmé le caractère « néfaste » de cette pollution.

Au vu de ces résultats, le fabricant n'a pas souhaité prendre de risque et a préféré refaire les bobines polluées, car le transformateur en question était un transformateur d'une centrale électrique. Une défaillance du transformateur à cause d'un problème d'isolement conduirait alors à des pertes financières encore plus importantes que le coût de fabrication de nouvelles bobines.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : Theodore Wildi electrotechnique
- [2]:Norme CEI 76 -1-5, « Transformateurs de puissance », 1995.
- [3]:Foumié.R,«Les isolants en électrotechnique, Essais, Mécanismes de dégradation, Applications industrielles », Editions Eyrolles, Paris 5ème, 1990.
- [4]:Ivanov.S,« Machines électriques », volume II, Edition Mir Moscou, 1980.
- [5]:Merlet.R,«Technologie d'électricité générale et professionnelle », édition Dunod paris, 1969.
- [6]:Mufidzadan.A, OTMANE-CHRIF.T, «Etude de l'influence du Noyau sur les Surtensions Impulsionnelles dans les Enroulements du Transformateur », pagel-23, 2009.
- [7]:Martin.J,HEATHCOTE, CENG, FIEEE,« The J and P Transformer book, A Partial Technology of Power Transformer », Twelfth édition Newnes, 1998.
- [8]:Lefevre.A, «Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs », Ecole Polytechnique de Nantes, 2006.
- [9]Janvier.S,«Développement de nouvelles méthode de diagnostic et régénération des huiles pour transformateurs de puissance », Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon, 2011.
- [10]:Laurent.C,« Diélectriques solides et charge d'espace », Techniques de l'ingénieur, D2305.
:Norme CEI 641-2,«Spécifications pour le carton comprimé et le papier comprimé à usage électrique» ,1979.
- [11]:Bouvier.B,«Caractéristiques du papier imprégné »,Techniques de l'ingénieur, Traité du Génie électrique, D280, pp 1-22, Mars 1977.
- [12]:Norme CEI 641-2,«Spécifications pour le carton comprimé et le papier comprimé à usage électrique », Méthodes d'essais, Juin 1996.
- [13]:Fulchiron.D,Cahier Technique Schneider N° 192 édition avril 1998 ,NFC52-726:
« Transformateurs de puissance de type sec ».

Résumé

L'objectif de cette étude est issu d'un cas réel dans lequel le bobinage d'un transformateur de puissance a été pollué par des particules métalliques. Un modèle de simulation a été établi et calculé à l'aide du logiciel FLUX 2D pour calculer le niveau de contraintes électriques engendrées par la présence de ces particules. Les résultats de calcul ont montré que des valeurs très élevées de champ électrique sont atteintes et dépassent les valeurs admissibles par l'isolant papier.

Mots clés : Transformateur - Flux2D- simulation.

Abstract

The work presented here deals with a real case of an incident occurred in the winding workshop of a power transformer manufacturer. Metallic pollution was found on the insulating paper of the winding. Finite elements software FLUX2D was used to calculate the electrical stress field induced by the presence of metallic particles in the insulating paper. The results have shown that there is a real risk of failure because the stress field was found higher than admissible values.

Key words : transformer - Flux2D- simulation.

ملخص

الهدف من هذا البحث هو دراسة حقيقية لمحول كهربائي الذي يحتوي على شوائب معدنية ما بين لفات قمنا بهذه الدراسة عن طريق برنامج محاكاة flux 2D من اجل حساب حقل كهربائي الناجم عن تواجد هذه الشوائب المعدنية في العازل الورقي, نتائج الحسابات اظهرت لنا ان الحقل كهربائي مرتفع جدا مقارنة مع قيم خاصة بورق العزل.

الكلمات المفتاحية : محول - Flux2D - محاكاة.