الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Yahia FARES de MEDEA

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة يحي فارس بالمدية



Faculté de la technologie
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique et en Automatique

THESE DE DOCTORAT

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Génie Electrique

Présentée par

AISSAOUI Nassima

Thème

Contribution à l'étude de l'effet des décharges partielles dans les enroulements du transformateur

Thèse soutenue le:26/01/2025 devant le jury d'examen composé de :

M.MOUALDIA Abdelahafid	Prof	Président	Université de Médéa
M. HOUASSINE Hamza	Prof.	Directeur de thèse	Université de Bouira
M.KABACHE Nadir	Prof	Co-Directeur de thése	Université de Médéa
M.BENSAID Samir	Prof.	Examinateur	Université de Bouira
M.CHANANE Abdellah	MCA	Examinateur	Université de Blida
M.MEDJBER Ahmed	MCA	Examinateur	Université de Médéa

Année universitaire 2024-2025

Remerciements

Le travail présenté dans cette thèse a été effectué au sein de la faculté technologie de l'université YAHIA FARES de Médéa.

Mes remerciements s'adressent tout d'abord à mon Directeur de thèse, le Professeur Monsieur **HOUASSINE Hamza** pour m'avoir accordé sa confiance**.** Tout au long de ce travail, il a su m'apporter un soutien constant, une disponibilité, une écoute, une confiance et des conseils précieux et avisés à la hauteur de ses compétences et de ses réelles qualités humaines.

Je remercie chaleureusement Monsieur **KABACHE Nadir**, Professeur à l'université de Médéa qui a accepté d'être Co-rapporteur de ma thèse.

J'adresse mes sentiments respectueux et reconnaissants à tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et l'honneur qu'ils m'ont fait de juger cette thèse:

Monsieur le Professeur Monsieur **MOUALDIA Abdelahafid** de l'université YAHIA Farés de Médéa, mes plus vifs remerciements pour l'honneur qu'il m'a fait de présider le jury de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur **BENSAID Samir**, Professeur à l'université de Bouira, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie aussi chaleureusement Monsieur **CHANANE Abdellah**, maitre de conférences à l'université de Blida et aussi Monsieur **MEDJEBER Ahmed** maitre de conférences à l'université de Médéa, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail en signe de reconnaissance à tous ceux que j'aime particulièrement :

- La mémoire de celui à qui je dois tout le respect, toute la reconnaissance pour ses sacrifices et compréhension, mon cher père. Sans lui, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.
- A ma très chère mère, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, et les encouragements sont l'essence de ma réussite.
- A mes chers fréres : Hillal, Abderrahmene et Nadjib.
- A mes chères sœurs Anissa et Ticem, à ma belle sœur Souhila.
- A mon cher mari, pour son encouragement et sa présence.
- A mes très chers fils Yanni et Aylan, pour leur amour.
- A tous mes amis, en particulier ceux que j'apprécie les plus ;
- A tous ceux qui m'ont nourri de leur savoir ;
- A ceux avec qui je partage de bons souvenirs ;
- A tous ceux qui me sont chers.

Résumé

Les enroulements des transformateurs de puissance sont soumis à des contraintes électriques, mécaniques et thermiques qui peuvent entraîner des défaillances graves. Une surveillance régulière et l'utilisation de techniques de diagnostic adaptées, telles que la méthode FRA, sont essentielles pour détecter ces défaillances à un stade précoce et prévenir les pannes catastrophiques. Parmi ces défaillances nous trouverons les décharges partielles.

Dans ce travail de thèse, nous nous intéressons aux décharges partielles dans les transformateurs de puissance, plus exactement dans les enroulements. La méthode de diagnostic FRA est utilisée dans cette thèse pour la détection de ces décharges partielles. De plus une étude de l'influence de la présence d'une décharge sur la propagation d'une surtension atmosphérique dans un enroulement d'un transformateur de puissance a été illustrée.

Mots clés: Enroulement du transformateur ; décharge partielle ; analyse de la réponse fréquentielle FRA ; modélisation ; détection de défaut ; propagation.

Abstract

The windings of power transformers are subject to electrical, mechanical and electrical, mechanical and thermal stresses that can lead to serious failures. Regular monitoring and the use of suitable techniques, such as the FRA method, are essential to detect these failures and prevent catastrophic failure. Among these failures are partial discharges.

In this thesis, we focus on in partial discharges in power transformers, more precisely in the windings. The FRA diagnostic is used in this thesis to detect these partial discharges. Furthermore, a study is conduced to analyze the influence of the presence of a discharge on the propagation of an atmospheric overvoltage in a power transformer winding.

Keywords: transformer winding; partial discharge (PD); Frequency Response Analysis FRA; modeling; fault detection; propagation.

Table des matières

Introduction générale……..…….....1

Chapitre 1 : Généralités sur les décharges partielles dans les enroulements des transformateurs de puissance

1.1 Introduction……4
1.2 Technologies des transformateurs de puissance……..……5
1.2.1 Constitution d'un transformateur de puissance……..…5
1.2.1.1 Partie active…….6
1.2.1.2 Parties constructives……7
1.2.1.3 Isolation……...8
1.2.2 Types de transformateurs……...8
1.2.2.1 Transformateurs à colonnes……..9
Transformateur cuirasse……..9
1.3 Enroulements des transformateurs de puissance……..…10
1.3.1 Description du bloc d'enroulement du transformateur……...10
1.3.2 Types des enroulements utilisés dans les transformateurs de puissance……...12
1.3.3 Conducteurs des enroulements du transformateur de puissance……14
1.4 Défauts des systèmes d'isolation électrique……...16
1.5 Les phénomènes de décharges partielles……...……..…...16
1.5.1 Décharge à barrière diélectrique……..……17
1.5.2 Définitions et terminologie……...…….17
1.5.3 Classification des décharges partielles……..18
1.5.4 Causes des décharges partielles dans les transformateurs…….20
1.6 Dégradation des matériaux isolants en présence des DPs……..……..21
1.7 Mécanisme des décharges partielles…… ..24
1.8 Caractéristiques des décharges partielles……...26
1.9 Méthodes de détection et de mesure des décharges partielles……..……..28
1.9.1 Détection par mesure électrique……28

1.9.2 Détection de DP par méthodes non électriques……30
1.9.2.1. La détection acoustique……30
1.9.2.2. La détection optique……31
1.9.2.3. La détection chimique……31
1.10 L'Analyse de la Réponse en Fréquence (FRA)……31
1.10.1 Principe de la méthode……32
1.10.2 Zones de fréquences d'analyse FRA……34
1.10.3 Interprétation de la méthode……35
1.11 Conclusion……36

Chapitre 2 : Modélisation haute fréquence des enroulements de transformateurs

2.1. Introduction……37
2.2 Modèle d'un transformateur de puissance à 50Hz……38
2.3 Généralités sur la modélisation à haute fréquence……39
2.4 Modèles physiques……39
2.4.1 Modèle basé sur la construction d'un prototype de taille réelle……39
2.4.2 Prototype de taille réduite avec similitude géométrique……40
2.4.3 Prototype de taille réduite avec similitude électromagnétique……40
2.5 Modèles mathématiques……41
2.5.1 Modèle universel……41
2.5.2 Modèle de Leon……43
2.5.3 Modèle Chimklai……44
2.5.4 Modèle de Gustavsen……46
2.5.5 Modèle de Noda……46
2.5.6 Modèle d'Andriau……47
2.5.7 Modèle à réluctances et sources commandées (Modèle RESEL)……48
2.5.8 Modèle basé sur la théorie des lignes……50
2.5.9 Modèle obtenu par analyse modale……51
2.5.10 Modèle basé sur les principes de dualité magnétique-électrique……53
2.5.11 Modèle basé sur les inductances propres et mutuelles……54
2.5.12 Modèle basé sur les inductances de fuite……56

2.6. Conclusion……57

Chapitre 3 : Analyse FRA de la présence des décharges partielles dans un enroulement d'un transformateur de puissance

3.1. Introduction……..58

3.2. Modélisation de la décharge partielle……...…...59
3.3. Modélisation par inductances propres et mutuelles…….61
3.3.1. Présentation du schéma équivalent……61
3.3.2. Équations du schéma équivalent……..62
3.3.2.1. Équations des tensions……...62
3.3.2.2. Équations des courants……...63
3.3.2.3. Équations du modèle représentées sous forme de matrice……64
3.4. Calcul des paramètres du schéma équivalent……...65
3.4.1. Identification des éléments du circuit équivalent de l'enroulement……..66
3.4.2. Optimisation par essaim de particules……..…….67
3.4.2.1. Principe général…….67
3.4.2.2. Algorithme de PSO……68
3.4.2.3. Etapes de la méthode PSO…….70
3.4.3. Identification des paramètres de l'enroulement par la méthode PSO……71
3.4.3.1. Identification des paramètres de l'enroulement étudié…….…….72
3.5. Comparaison des paramètres de l'enroulement étudié mesurées et estimées…….....72
3.6. Défauts de décharge partielle dans l'enroulement……...73
3.6.1. Décharge partielle dans la 1ère cellule……74
3.6.2. Décharge partielle dans la 2ème cellule……..75
3.6.3. Décharge partielle dans la 3ème cellule……..76
3.6.4. Décharge partielle dans la 4ème cellule……..78
3.6.5. Décharge partielle dans la 5ème cellule……..79
3.6.6. Comparaison entre les défauts de décharge partielle et un enroulement sain…...80
3.7. Défaut du circuit ouvert dans les cellules de l'enroulement…….80

3.6.1. Ouverture de la 1ière cellule……...81
3.6.2. Ouverture de la 2ième cellule……..82
3.6.3. Ouverture de la 3ième cellule……..83
3.6.4. Ouverture de la 4ième cellule……..84
3.6.5. Ouverture de la 5ième cellule……..85
3.6.6. Comparaison de la réponse en fréquence entre les défauts d'ouverture des cellules et un enroulement sain……..86
3.7. Défaut de court-circuit sur l'enroulement……86
3.7.1. Court-circuit entre la 1ière et la 2ième cellule……...87
3.7.2. Court-circuit entre la 2ième et la 3ième cellule…….88
3.7.3. Court-circuit entre la 4ième et la 5ième cellule…….89
3.7.4. Comparaison de la variation d'impédance en fonction fréquence entre les défauts de court-circuit et l'enroulement sain……..…..91
3.8. Localisation des défauts le long de l'enroulement……...92
3.9. Conclusion……....94

Chapitre 4 : Influence de la décharge partielle sur la propagation des surtensions atmosphériques

4.1 Introduction……..95
5.2. Causes d'apparition des surtensions…….95
5.3. Surtensions atmosphériques…….97
4.3.1. Le coup de foudre direct……98
4.3.2. Le coup de foudre indirect…….98
4.3.3. Caractéristiques d'une onde de foudre……..98
4.4. Protection contre les surtensions atmosphériques……99
4.5. Influence de la décharge partielle sur la propagation d'une surtension dans un enroulement du transformateur……..100
4.5.1. Propagation des ondes de surtension en présence d'une décharge partielle sans protection par parafoudre et sans mise à la terre…….100
4.5.1.1. Présence d'une décharge partielle en longitudinal……..100
4.5.1.2. Présence d'une décharge partielle en transversal……106

4.5.2. Propagation des ondes de surtension en présence d'une décharge partielle sans protection par parafoudre avec mise à la terre……109
4.5.2.1. Présence d'une décharge partielle en longitudinal…….…….109
4.5.2.2. Présence d'une décharge partielle en transversal……110
4.5.3. Propagation des ondes de surtension en présence d'une décharge partielle avec protection par parafoudre et sans mise à la terre…….112
4.5.3.1. Présence d'une décharge partielle en longitudinal……..112
4.5.3.2. Présence d'une décharge partielle en transversal……113
4.5.4. Propagation des ondes de surtension en présence d'une décharge partielle avec protection par parafoudre et avec mise à la terre……114
4.5.4.1. Présence d'une décharge partielle en longitudinal……..115
4.5.4.2. Présence d'une décharge partielle en transversal……116
4.6. Comparaison des différents cas……..117
4.7. Conclusion……..119

Conclusion générale……...……..…..120

Bibliographie

Table des figures

FIGURE1.1–Circuit magnétique d'un transformateur…….8
FIGURE1.2– Transformateur à colonnes……..……...……9
FIGURE1.3–Transformateur cuirassé……...…….....10
FIGURE1.4 – Assemblage complet du bloc d'enroulement du transformateur de puissance..11
FIGURE1.5–Disposition concentrique du bloc d'enroulement……...…….12
FIGURE 1.6– Structure de serrage de l'enroulement……13
FIGURE1.7– Représentation d'un enroulement spiral et d'un enroulement à disque……..14
FIGURE1.8– Croisements dans les enroulements à disques…….……....14
FIGURE1.9– Conducteur transposé continu (CTC)…….....15
FIGURE 1.10– Différents types de décharges partielles……..….20
FIGURE1.11– Cavité gazeuse dans un diélectrique……..……21
FIGURE1.12–Processus de dégradation de l'isolant provoqué par les décharges partielles….23
FIGURE1.13– Cellule d'étude des PDs…….……25
FIGURE1.14–Composantes du signal de courant obtenu après une DP……..25
FIGURE1.15– Modèle électrique équivalent d'une décharge partielle…….…...….25
FIGURE1.16– Courbe de contrainte dans le processus de DP…….…27
FIGURE1.17– Circuit de détection des décharges partielles……..……..29
FIGURE1.18– Modèle d'un enroulement de transformateur……33
FIGURE1.19– Principe de la FRA……..……..34
FIGURE 2.1– Schéma électrique équivalent d'un transformateur……38
FIGURE2.2–Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP……...…42
FIGURE 2.3–Modèle HF d'un enroulement (R et L)……42
FIGURE2.4–Circuit de Foster en série…….……43
FIGURE2.5–Modèle de Cauer pour le noyau de fer…….……44
FIGURE2.6–Modèle du transformateur de Chimklai……...…….45
FIGURE2.7–L'impédance Zwinding……..……..45
FIGURE 2.8–Modèle de Noda…….……47
FIGURE 2.9–Modèle d'Andrieu……..……..48
FIGURE2.10–Principe du modèle à réluctances et sources commandées (Modèle RESEL)....50
FIGURE2.11–Schéma équivalent d'un enroulement…….……51
FIGURE2.12–Modélisation du transformateur par une ligne……...…….51

FIGURE2.13–Exemple de schéma équivalent modal……52
FIGURE2.14–Dualité magnétique-électrique appliqué à un transformateur monophasé…....54
FIGURE2.15–Principe de la modélisation par inductances propres et mutuelles……..…57
FIGURE3.1–Modèle classique des capacités équivalentes d'un diélectrique avec une cavité interne……60
FIGURE3.3–Schéma équivalent de l'enroulement du transformateur…….……62
FIGURE3.4–Impédance de l'enroulement en fonction de la fréquence……67
FIGURE3.5–Mouvement de chaque particule……...……68
FIGURE3.6–Organigramme de la méthode PSO……..71
FIGURE3.7–Variation de l'impédance en fonction de la fréquence obtenue par PSO.....72
FIGURE3.8–Comparaison entre l'estimation et la mesure de l'impédance en fonction de la fréquence…….……..…73
FIGURE3.9–Schéma équivalent du bobinage avec décharge partielle dans la première cellule.....74
FIGURE 3.10–Variation de l'impédance en fonction de la fréquence avec présence d'une DP dans le 1ier disque de l'enroulement…….……74
FIGURE 3.11–Variation de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement en présence d'une DP dans la 2ème cellule…….……..……75
FIGURE 3.12–Variation de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement en présence d'une DP dans la 3ème cellule……...……..……..77
FIGURE 3.13–Variation de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement en présence d'une DP dans la 4ème cellule……..…….78
FIGURE 3.14–Variation de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement en présence d'une DP dans la 5ème cellule…….…….…….79
FIGURE 3.15–Comparaison entre les réponses en fréquence de l'enroulement sain et de l'enroulement affecté par le DP dans chaque cellule…….…..….80
FIGURE 3.16–Allure de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement avec un défaut d'ouverture de spire à la 1ière cellule……..……..…81
FIGURE 3.17–Allure de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement avec un défaut d'ouverture de spire à la 2ème cellule……..……..82
FIGURE 3.18–Allure de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement avec un défaut d'ouverture de spire à la 3ème cellule……..……..……83
FIGURE 3.19–Allure de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement avec un défaut d'ouverture de spire à la 4ème cellule……..……..……84

FIGURE 3.20–Allure de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement avec un défaut d'ouverture de spire à la 5ème cellule……....85
FIGURE 3.21–Comparaison des impédances de chaque point de circuit ouvert des cellules et celle de l'enroulement sain…….…….…..86
FIGURE 3.22–Variation de l'impédance en fonction de la fréquence d'un enroulement présentant un court-circuit entre la 1ière et la 2ième cellule……....87
FIGURE 3.23–Variation de l'impédance en fonction de la fréquence d'un enroulement présentant un court-circuit entre la 2ième et la 3ième cellule…….....….88
FIGURE 3.24–Variation de l'impédance en fonction de la fréquence d'un enroulement présentant un court-circuit entre la 3ième et la 4ième cellule…….……..89
FIGURE3.25–Variation de l'impédance en fonction de la fréquence d'un enroulement présentant un court-circuit entre la 4ième et la 5ième cellule…….....….90
FIGURE 3.26–Comparaison des impédances de chaque point de court-circuit entre les cellules et celle de l'enroulement sain……..…….……92
FIGURE 3.27–Comparaison entre les différentes valeurs des fréquences de premier pic dans le cas d'un enroulement sain d'une part et d'autre part dans le cas d'un défaut…….....…93
FIGURE 4.1–Paramètres des ondes de surtensions……..……..96
FIGURE 4.2–Forme d'onde de courant 10/350 µs…….....98
FIGURE 4.3–Forme d'onde de courant 8/20 µs…….……99
FIGURE 4.4 –Forme d'onde de tension 1,2 / 50 µs……99
FIGURE 4.5 –Application d'une surtension à l'entrée de l'enroulement…….100
FIGURE 4.6–Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Sans parafoudre, sans mise à la terre et sans décharge partielle…….101
FIGURE 4.7–Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre isolé de la terre et présence de la décharge partielle à la première cellule……..……..….101
FIGURE 4.8–Comparaison entre le courant circulant dans la première cellule sans (en bleu) et avec décharge partielle (en rouge)……..……..……102
FIGURE 4.9–Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle (en rouge)…….....102
FIGURE 4.10–Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre isolé de la terre, sans parafoudre et en présence de la décharge partielle à la 3ème cellule……103

FIGURE 4.11–Comparaison entre les tensions aux bornes de la 3ème cellule sans (en bleu) et avec décharge partielle entre ses bornes (en rouge)…….……...103
FIGURE 4.12–Comparaison entre le courant circulant dans la troisième cellule sans (en bleu) et avec décharge partielle (en rouge)…….……104
FIGURE 4.13–Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle au milieu de l'enroulement (en rouge)……...……...104
FIGURE 4.14–Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre isolé de la terre et présence de la décharge partielle à lacinquième cellule……105
FIGURE 4.13–Comparaison entre les tensions aux bornes de la 5ème cellule sans (en bleu) et avec décharge partielle entre ses bornes (en rouge)……105
FIGURE 4.14–Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle à l'extrémité de l'enroulement (en rouge)…….....105
FIGURE 4.15–Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre isolé de la terre, sans parafoudre et présence de la décharge partielle entre la cuve et la 1ière cellule……..……...106
FIGURE 4.16–Comparaison entre les tensions à l'entrée de l'enroulement sans (en rouge) et avec décharge partielle entre la cuve et la 1ière cellule (en vert)……... …..106
FIGURE 4.17–Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle à l'extrémité de l'enroulement (en rouge) dans le cas d'une décharge en transversal entre la 1ière cellule et la cuve…….107
FIGURE 4.18–Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre isolé de la terre et présence de la décharge partielle entre la cuve et la 3ième cellule…….……107
FIGURE 4.18–Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle à l'extrémité de l'enroulement (en rouge) dans le cas d'une décharge en transversal entre la 3ème cellule et la cuve…….....108
FIGURE 4.19–Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre isolé de la terre et présence de la décharge partielle entre la cuve et la 5ième cellule……..……108
FIGURE 4.20–Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle à l'extrémité de l'enroulement (en rouge) dans le cas d'une décharge en transversal entre la 5ème cellule et la cuve…….....109

FIGURE 4.21–Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre mis à la terre, sans parafoudre et présence de la décharge partielle à la première cellule…….....109
FIGURE 4.22–Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle (en rouge) entre les bornes de la 1ière cellule……...110
FIGURE 4.23–Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre isolé de la terre, sans parafoudre et présence de la décharge partielle entre la cuve et la 1ière cellule…….……110
FIGURE 4.24–Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle (en rouge) entre la 1ière cellule et la cuve…….111
FIGURE 4.25–Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle (en rouge) entre la 5ème cellule et la cuve…….....111
FIGURE 4.26–Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre isolé de la terre, protégé par un parafoudre et sans décharge partielle……112
FIGURE 4.27–Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre isolé de la terre, protégé par un parafoudre et présence d'une DP entre les bornes de la 1ière cellule…….....112
FIGURE 4.28–Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant qui passe par la décharge partielle (en rouge) aux bornes de la 1^{ière} cellule…….……113
FIGURE 4.29–Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement protégé par un parafoudre. Neutre isolé de la terre et présence d'une DP entre la 1ière cellule et la cuve.....113
FIGURE 4.30–Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant qui passe par la décharge partielle (en rouge) entre la 1ière cellule et la cuve…….……114
FIGURE 4.31–Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement par parafoudre, le neutre relié à la terre, et absence d'une DP……..……..114
FIGURE 4.32–Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement protégé par parafoudre, le neutre relié à la terre, et présence d'une DP entre les bornes de la première cellule……...……115
FIGURE 4.33–Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle (en rouge) entre les bornes de la 1ière cellule……...115
FIGURE 4.34–Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement protégé par parafoudre, le neutre relié à la terre, et présence d'une DP entre la première cellule et la cuve…….…….116

Liste des tableaux

TABLE1.1– Caractéristiques des phénomènes de rupture, de´gradation et vieillissement……22

TABLE1.2– Domaines typiques d'interprétation de la méthode FRA……...…..35

TABLE 2.1–: Règles de dualité magnétique-électrique……...…….53

TABLE 3.1–: Inductance propre et inductances mutuelles obtenues par PSO…….....71

TABLE 3.2–: Les mesures et les estimations des fréquences et de l'inductance…….……72

TABLE 3.3–: Tableau comparatif de la réponse en fréquence entre un enroulement avec décharge partielle dans la première cellule et un enroulement sain……..……..75

TABLE 3.4–: Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un DP partielle entre la 2ème cellule et un enroulement sain……...76

TABLE 3.5–: Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un DP partielle entre la 3ème cellule et un enroulement sain……...77

TABLE 3.6–: Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un DP partielle entre la 4ème cellule et un enroulement sain……..….78

TABLE 3.7–: Tableau comparatif de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un DP partielle entre la 5ème cellule et un enroulement sain…….……79

TABLE 3.8–: Comparaison de la réponse en fréquence entre l'enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 1ier disque et l'enroulement sain…….81

TABLE 3.9–: Comparaison de la réponse en fréquence entre l'enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 2ième disque et l'enroulement sain……....82

TABLE 3.10–: Comparaison de la réponse en fréquence entre l'enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 3ième disque et l'enroulement sain……..……83

TABLE 3.11–: Comparaison de la réponse en fréquence entre l'enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 4ième disque et l'enroulement sain……..84

TABLE 3.12–: Comparaison de la réponse en fréquence entre l'enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 5ième disque et l'enroulement sain……..85

TABLE 3.13–: Tableau comparatif de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit et entre la 1ière et la 2ième cellule et un enroulement sain…….88

TABLE 3.14–: Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit et entre la 2ième et la 3ième cellule et un enroulement sain……..89

TABLE 3.15–: Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit et entre la 3ième et la 4ième cellule et un enroulement sain……..……90

TABLE 3.16–: Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit et entre la 4ième et la 5ième cellule et un enroulement sain……..……91

TABLE 4.1–: Caractéristiques des différentes surtensions…….……..97

TABLE 4.2–: Valeurs maximales des tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement et le courant de la ligne et le courant qui passe dans la DP dans les différents cas possibles……..……117

Introduction générale

Les transformateurs de puissance jouent un rôle crucial dans le réseau électrique en transformant la tension afin de faciliter le transport et la distribution de l'énergie [**1**]. Il est donc essentiel de veiller à leur fiabilité et à leur longévité afin d'assurer la continuité de l'approvisionnement en électricité. Toutefois, ces dispositifs font face à différentes contraintes électriques, thermiques, mécaniques et environnementales, ce qui peut conduire à une détérioration progressive de leur isolation interne [**1**], [**2**].

L'intégrité des enroulements des transformateurs de puissance peut être compromise par divers phénomènes, dont les décharges partielles (DP). Ces perturbations électriques, qui se traduisent par des micro-décharges dans le matériau isolant ou aux interfaces, sont fréquemment des signes de détérioration importante, pouvant entraîner une panne complète du transformateur si elles ne sont pas repérées et contrôlées à temps [**3**]. Dans le même temps, les surtensions atmosphériques, comme les éclairs, peuvent aussi causer des conséquences néfastes sur les transformateurs, en particulier en augmentant les décharges partielles ou en créant des conditions de dégradation accélérées [**3**], [**6**].

Il est donc essentiel de détecter les DP de manière précoce afin de garantir une maintenance prédictive des transformateurs et de prolonger leur durée de vie [**4**]. L'analyse de réponse en fréquence (FRA) est devenue une méthode non invasive particulièrement efficace pour détecter les défaillances mécaniques internes et les défauts dans les enroulements, parmi les différentes techniques de diagnostic [**4**] [**7**]. Cette méthode permet de détecter des modifications dans la structure mécanique et électrique du transformateur, y compris la présence de décharges partielles, avant qu'elles ne se transforment en défaillances critiques [**5**].

Cette thèse vise principalement à analyser l'impact des décharges partielles sur les enroulements des transformateurs de puissance et leur détection par la méthode FRA. De plus, nous mettrons l'accent sur l'influence de ces décharges sur la propagation des surtensions atmosphériques à travers les enroulements, afin de comprendre les interactions potentielles entre ces phénomènes et les caractéristiques de réponse en fréquence. La réalisation de cette étude contribuera à approfondir notre compréhension des processus de détérioration des

transformateurs et à améliorer les outils de surveillance afin de prévenir les pannes graves dans le réseau électrique.

Dans cette thèse, le travail est structuré en quatre chapitres, comme suit :

Le premier chapitre a pour objectif de présenter une vision globale des transformateurs de puissance. Tout d'abord, nous allons étudier leurs principes de fonctionnement, leurs diverses configurations et leurs utilisations dans les systèmes. Nous examinerons ensuite les éléments essentiels internes, tels que les enroulements, le noyau magnétique et le système d'isolation, en mettant en évidence l'importance de chaque élément dans le fonctionnement global de l'appareil. L'objectif de ce chapitre est de donner une explication approfondie des concepts essentiels liés aux décharges partielles, à leur processus de formation, aux les différents types de DP fréquemment observés, ainsi qu'à leur impact sur la fiabilité des équipements électriques. Nous examinerons également les principales raisons de l'apparition des DP dans les transformateurs de puissance ainsi que les éléments qui les influencent.

Le deuxième chapitre se propose d'explorer et d'analyser les différents modèles en haute fréquence des enroulements de transformateurs qui existent dans la littérature scientifique. Ces modèles visent à répondre à des besoins variés, qu'il s'agisse de la simulation des phénomènes de surtension, de la détection des dégradations, ou de l'optimisation de la conception des transformateurs.

Le troisième chapitre explore l'application de l'analyse FRA dans la détection des décharges partielles au sein des enroulements des transformateurs de puissance. Son objectif principal est de mettre en œuvre la simulation sous MATLAB afin de représenter la réponse en fréquence d'un enroulement de transformateur impacté par des décharges partielles. Cette simulation permettra de voir comment les décharges partielles altèrent la signature FRA de l'enroulement et de repérer les bandes de fréquence les plus vulnérables à ces phénomènes. Le but de ce chapitre est double : d'une part, présenter une méthode claire pour simuler et analyser l'effet des décharges partielles dans les enroulements d'un transformateur en utilisant MATLAB ; d'autre part, illustrer comment ces simulations peuvent contribuer à l'interprétation des résultats de l'analyse FRA dans le contexte d'une surveillance conditionnelle des transformateurs.

Dans le dernier chapitre, un travail se concentre sur l'analyse de la propagation des ondes

de surtensions dans un enroulement de transformateur de puissance en présence d'une décharge partielle, via des simulations sous PSpice. L'objectif de ce chapitre est de fournir une approche systématique pour simuler et analyser la propagation des surtensions en présence d'une DP, et de comprendre comment ces phénomènes influencent les contraintes subies par l'isolation des enroulements. Cette simulation est cruciale pour la conception de systèmes de protection plus robustes et pour améliorer les stratégies de maintenance prédictive, en contribuant à la fiabilité à long terme des transformateurs de puissance dans les réseaux électriques.

Nous terminons notre thèse par une conclusion générale, regroupant l'essentiel des résultats obtenus.

Chapitre 1

Généralités sur les décharges partielles dans les enroulements des transformateurs de puissance

1.1 Introduction

Les transformateurs de puissance haute tension sont l'un des composants les plus importants et les plus critiques du réseau électrique. Ils sont utilisés pour modifier les tensions afin de répondre aux exigences des systèmes de transmission et de distribution d'électricité. La majorité d'entre eux sont en service depuis de nombreuses années des différentes conditions environnementales, électriques et mécaniques [**6**]. Bien que le transformateur ait été conçu pour résister à un environnement sévère et à des conditions opérationnelles extrêmes, au fur et à mesure que le transformateur vieillit, l'état de ses composants et de ses matériaux d'isolation peut se dégrader, ce qui peut réduire la capacité du transformateur à résister à des événements tels que des transitoires de commutation, des courts-circuits, des coups de foudre sans risque accru de défaillances [**7**]. L'une des principales causes de défaillance d'un transformateur est due à des problèmes liés à son isolation.

L'apparition des phénomènes de décharges partielles dans les transformateurs de puissance, constitue un problème crucial auquel de nombreux chercheurs tentent d'apporter des éléments de réponse. Ce problème de décharge partielle (DP) prend une importance

considérable, en effet, le risque de dégradation de l'isolation voire même des enroulements est grand, malgré l'utilisation d'isolants spéciaux dont la fonction est de prévenir le développement d'un tel phénomène.

Il existe plusieurs approches pour la détection des DP, même si elles sont différentes, elles ont des objectifs similaires, à savoir obtenir des informations à un stade précoce avant qu'une défaillance catastrophique ne se produise. Ce travail de recherche se focalise sur l'analyse de la DP dans un enroulement de transformateur de haute tension. L'analyse des décharges partielles est une technique importante pour le diagnostic et la surveillance en ligne (en plein régime d'exploitation) des systèmes d'isolation des transformateurs. La DP dans les enroulements de transformateur, peut être due à plusieurs causes telles que défauts de fabrication, dégradationde l'isolation primaire ou la contamination de l'huile [**8**].

De plus, dans ce chapitre avant de traiter l'aspect physique de ce phénomène en détail, nous allons d'abord présenter quelques aspects relatifs à la technologie des transformateurs de puissance.

1.2 Technologies des transformateurs de puissance

Un transformateur est un dispositif statique basé sur l'induction électromagnétique. Il est composé de deux enroulements (appelés bobines) ou plus, conçus pour transformer un système de tensions et courants alternatifs en un autre système de valeurs différentes, mais avec la même fréquence et la même forme d'onde. L'objectif principal d'un transformateur est de transmettre l'énergie électrique d'un circuit à un autre par un champ magnétique, tout en régulant la tension et le courant dans le cours du processus.

La structure de base d'un transformateur de puissance se compose de deux parties principales : le circuit magnétique et le circuit électrique [**7**].

1.2.1 Constitution d'un transformateur de puissance

Un transformateur de puissance est un dispositif qui utilise l'induction électromagnétique comme on a déjà définit, pour transformer les tensions et courants électriques d'un système à un autre. Sa structure comprend un circuit magnétique pour le flux magnétique et un circuit électrique avec des enroulements primaire et secondaire pour le transfert d'énergie [**7**].

Les principaux organes d'un transformateur de puissance comprennent :

1.2.1.1 Partie active

Dans un transformateur, les parties actives sont en effet celles qui sont directement impliquées dans la conversion et le transfert de l'énergie électrique. Cela inclut principalement le circuit magnétique et les enroulements électriques.

a. **Le circuit magnétique:** Le circuit magnétique d'un transformateur est généralement construit en utilisant des tôles ferromagnétiques de haute qualité. Ces tôles sont spécialement conçues avec une faible épaisseur pour réduire les pertes d'énergie dues aux phénomènes des courants de Foucault et de l'hystérésis. Elles sont isolées entre elles à l'aided'un vernis isolant ou d'autres méthodes d'isolation afin de minimiser les courants parasites. Cette isolation entre les tôles est cruciale pour réduire les pertes dues aux courants induits, car les courants de Foucault sont générés lorsque le flux magnétique varie à travers les tôles conductrices [**9**].

   Le circuit magnétique est souvent constitué de plusieurs colonnes et de deux culasses qui forment un chemin de flux pour le champ magnétique. Son rôle principal est d'offrir un chemin à faible résistance pour guider efficacement le flux magnétique àtravers le transformateur, Ce circuit contribue à améliorer l'efficacité globale du transformateur en réduisant les pertes d'énergie [**8**].

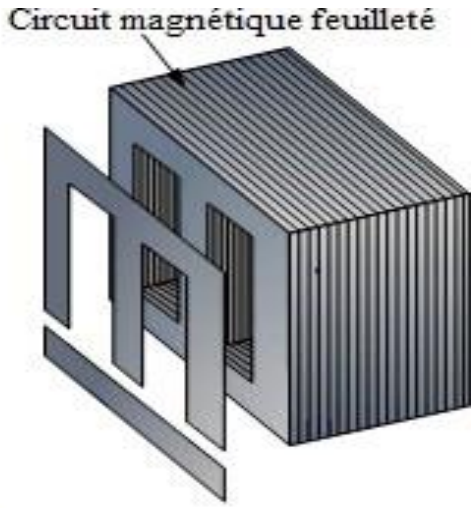


FIGURE1.1–Circuit magnétique d'un transformateur [**8**].

Les enroulements (bobinage): (voir FIGURE 1.7 à la page 14). Les enroulements des transformateurs sont principalement fabriqués à partir de cuivre en raison de ses excellentes propriétés conductrices et de sa capacité à transporter des courants élevés sans trop s'échauffer. La conception des enroulements est soigneusement étudiée en fonction de la densité du courant qu'ils devront supporter. Les conducteurs peuvent prendre différentes formes en fonction de la section du fil; ils peuvent être circulaires pour des sections jusqu'à 5mm, sous forme de méplat regroupant plusieurs fils joints ensemble aux extrémités, ou encore sous forme de barreaux de cuivre massifs [**10**].

1.2.1.2 Parties constructives

Les pièces constructives du transformateur sont:

a. La cuve : La cuve abrite la partie active du transformateur, y compris le circuit magnétique et les enroulements. Elle fournit un environnement protégé pour ces composants essentiels. Elle assure aussi la stabilité et le maintien mécanique du circuit magnétique et des enroulements à l'intérieur. Cela garantit que ces composants restent en place et protégés contre les dommages mécaniques.

b. Le couvercle : Son rôle principal est de couvrir et de protéger la cuve qui contient les composants actifs du transformateur, notamment le circuit magnétique et les enroulements. Cela protège ces éléments des éléments extérieurs tels que la poussière, l'humidité et d'autres contaminants. Il sert également de support pour différents accessoires du transformateur, tels que les isolateurs, le conservateur d'huile.

c. Le conservateur d'huile : Le conservateur d'huile dans un transformateur remplit une fonction cruciale en maintenant la qualité d'huile isolante à l'intérieur de la cuve. Il facilite le remplissage et le maintien du niveau d'huilé à l'intérieur de la cuve du transformateur. Cela garantit que les enroulements et le circuit magnétique restent immergés dans l'huile pour leur refroidissement et leur isolation adéquats. En réduisant la surface de l'huile en contact avec l'air extérieur, le conservateur d'huile aide à limiter les effets de l'humidité ambiante. Cela est crucial pour maintenir la stabilité diélectrique de l'huile isolante, car l'humidité peut réduire ses propriétés isolantes [**10**].

d. Les isolateurs (HT) : Les isolateurs dans un transformateur sont au nombre de trois et ont pour rôle d'assurer la liaison électrique entre les extrémités des enroulements primaire (HT) et les lignes d'arrivée. Ils sont conçus pour isoler électriquement les

parties sous tension du transformateur, assurant ainsi la sécurité électrique du système.

e. Les traversées (BT) : Ils sont utilisés pour relier les enroulements de basse tension du transformateur au système électrique externe. Ces traversées BT sont généralement constituées de deux parties situées de part et d'autre d'un couvercle, reliées par une tige ou un conducteur entre les extrémités du secondaire et les lignes de départ. Leur rôle principal est de permettre le transfert efficace de l'électricité entre le transformateur et le réseau électrique, en assurant une connexion sécurisée et fiable pour la distribution de l'énergie à basse tension.

Ces traversées sont conçues avec précision pour garantir des performances électriques optimales tout en assurant une isolation adéquate pour éviter les risques de court- circuit ou de dommages électriques. Les normes et les spécifications varient en fonction des exigences spécifiques du transformateur et des réglementations en vigueur dans différentes régions [**10**].

1.2.1.3 Isolation

L'huile et les isolants cellulosiques (papiers) possèdent des propriétés spécifiques qui se complètent pour offrir un isolement efficace entre les différentes parties du transformateur. L'huile est souvent utilisée comme un milieu diélectrique liquide, tandis que les isolants cellulosiques, tels que les papiers imprégnés d'huile, sont utilisés pour fournir une isolation solide entre les composants internes du transformateur.

Le transformateur doit être équipé d'une isolation diélectrique solide ou liquide qui lui permettra de résister à la fois à la tension alternative en régime permanent et aux surtensions transitoires sans subir de décharge électrique. Afin d'accomplir cela, elle doit rendre le champ électrique homogène dans le transformateur.

1.2.2 Types de transformateurs

Dans le domaine des transformateurs de puissance, deux dispositions principales du circuit magnétique sont généralement reconnues à savoir, les transformateurs à colonnes et les transformateurs cuirassés [**11**].

1.2.2.1 Transformateurs à colonnes

Le transformateur à colonnes est constitué d'enroulements cylindriques entourant des noyaux disposés verticalement sous forme de colonnes. Ces enroulements sont généralement complétés par des culasses à leurs extrémités pour guider efficacement le flux magnétique à travers le transformateur [**12**].

En plus du feuilletage, qui réduit les pertes d'énergie par courants de Foucault, un dispositif de blocage des tôles par des raidisseurs est utilisé pour atténuer le bruit généré par ces composants.

Malgré son efficacité pour des niveaux de puissance relativement bas, le transformateur à colonnes présente des limitations lorsque des puissances plus élevées des tensions supérieures sont requises. En conséquence, certains fabricants de transformateurs ont délaissé la construction pour les applications nécessitant des puissances dépassant 50 MVA et des tensions supérieures à 220 KV. Ils ont plutôt adopté la structure cuirassée pour ces applications spécifiques [**13**].

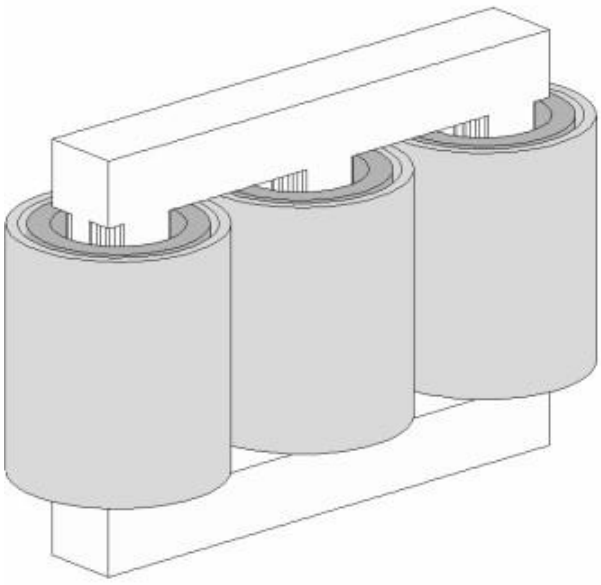


FIGURE1.2– Transformateur à colonnes [**14**].

1.1.2.2 Transformateur cuirassé

Dans ce type de construction, le circuit magnétique est constitué de tôles magnétiques disposées horizontalement autour des enroulements. Ces enroulements,

disposés de manière alternée, prennent la forme de bobinages rectangulaires avec un axe horizontal.

L'un des points forts de cette conception réside dans le rôle structurel majeur joué par la cuve du transformateur. En plus de contenir le fluide de refroidissement, la cuve assure le positionnement précis du circuit magnétique et des enroulements. Cette caractéristique permet d'éliminer le besoin de dispositifs spéciaux pour maintenir en place les composants, contrairement à la construction à colonnes ou à d'autres structures qui nécessitent des systèmes de support supplémentaires.

Dans cette configuration, la bobine elle-même présente une forme de grande spirale rectangulaire très plate, souvent comparée à une galette. Cette bobine est composée de plusieurs spires, et chaque spire contient une ou plusieurs couches de conducteurs. Ces conducteurs sont ensuite divisés en brins plats isolés électriquement par des couches de papier imprégné de liquide diélectrique [**15**].

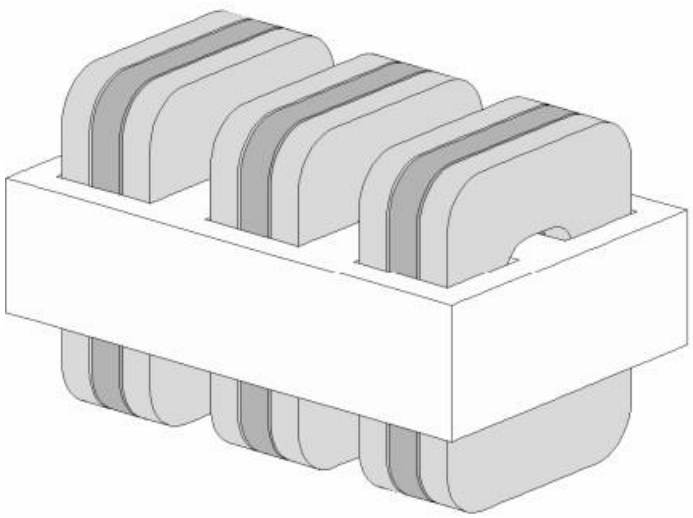


FIGURE1.3–Transformateur cuirassé [**14**].

1.3 Enroulements des transformateurs de puissance

1.3.1 Description du bloc d'enroulement du transformateur

Le bloc d'enroulement désigne tous les enroulements tels que les enroulements haute tension (HT), basse tension (BT) et les enroulements de régulation relatifs à une phase spécifique. Les enroulements sont enroulés sur des nervures espacées circonférentielle et

soutenues par un cylindre en carton comprimé appelé ”cylindre de formage”. Ces enroulements sont glissés les uns sur les autres, formant une configuration concentrique qui entoure la branche du noyau, comme le montrent la FIGURE 1.4 et la FIGURE 1.5 [**16**]. Les enroulements sont séparés par des conduites verticales nécessaires pour la circulation du courant et pour permettre à l'huile de circuler le long de l'enroulement pour le refroidissement [**17**]. Les conduites d'huile sont dotées de plusieurs barrières en carton comprimé, formant une structure d'isolation complexe, comme le montre la FIGURE 1.5 [**16**].

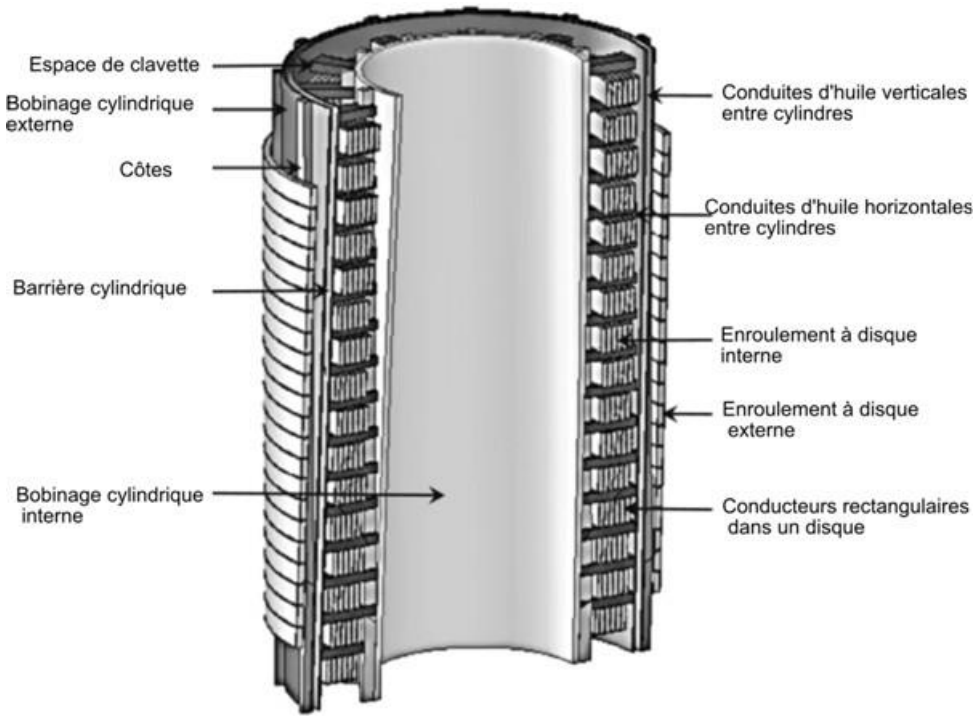


FIGURE 1.4 – Assemblage complet du bloc d'enroulement du transformateur de puissance [**17**].

Le bloc d'enroulement est maintenu fermement en place par une structure de serrage, comme le montre la FIGURE 1.6, composée d'anneaux de serrage en carton comprimé [**18**]. Ces plaques sont insérées pendant l'assemblage tout en appliquant une force axiale sur les enroulements. Lorsque la force appliquée est supprimée, les plaques maintiennent une pression constante sur les enroulements. Cela permet de s'assurer que la structure du bobinage reste rigide lorsqu'elle est soumise à des forces électromagnétiques lors de courts-circuits [**18**].

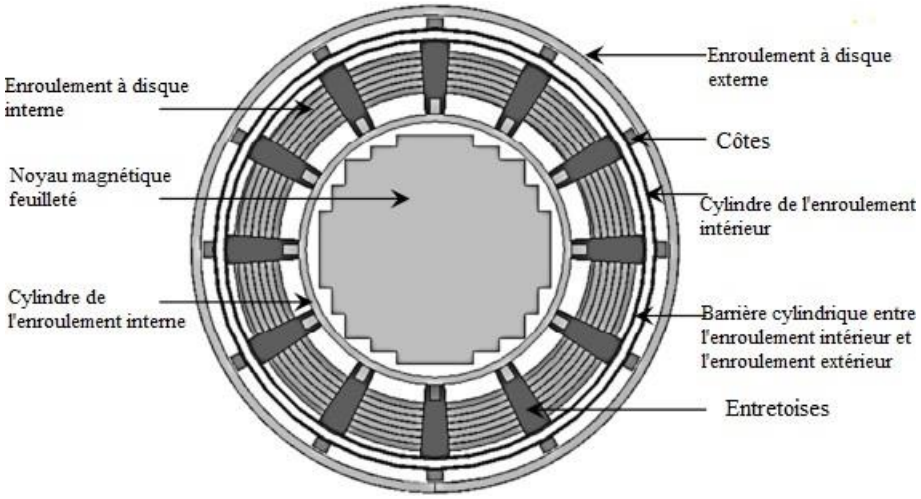


FIGURE1.5–Disposition concentrique du bloc d'enroulement [**17**].

1.3.2 Types des enroulements utilisés dans les transformateurs de puissance

Essentiellement, il existe deux méthodes communes de construction des enroulements pour les transformateurs de puissance à noyau, à savoir les enroulements en spirale et les enroulements en disque [**19**] [**20**].

Les enroulements en spirale sont enroulés en continu de bas en haut. Les spires peuvent être enroulées directement les unes à côté des autres pour former ce que l'on appelle communément un enroulement en couche, comme le montre la FIGURE 1.7 [**21**] [**22**].

Il est également possible de placer des entretoises sur la circonférence entre les spires afin d'augmenter la surface de refroidissement. Ces enroulements sont généralement appelés enroulements hélicoïdaux.

Les enroulements en spirale sont principalement utilisés dans les enroulements BT et sont capables de transporter des courants importants en raison de la grande surface de refroidissement de chaque conducteur [**19**].

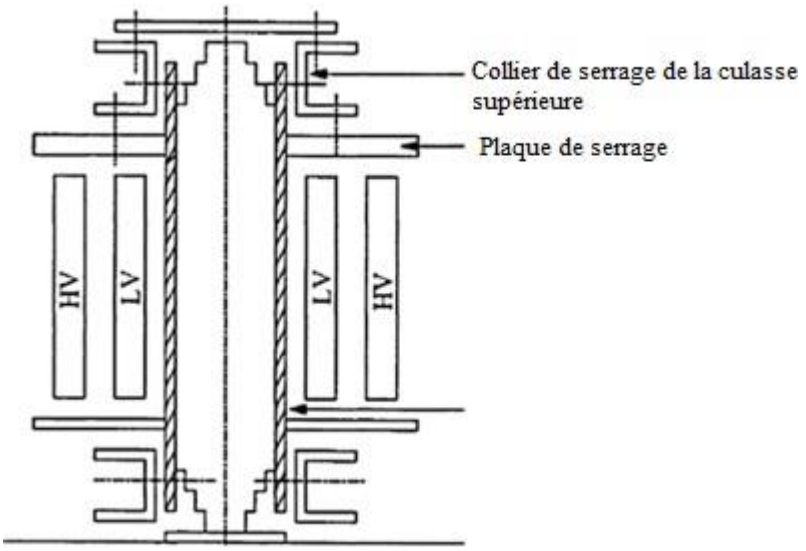


FIGURE 1.6– Structure de serrage de l'enroulement [**17**].

Les enroulements à disques sont constitués de bobines en forme de galettes, appelées disques, comme le montre la FIGURE 1.7. Lors de la fabrication de ces enroulements, un certain nombre de tours sont enroulés radialement avant de passer au disque suivant, comme le montre la FIGURE 1.8 [**18**]. Les disques sont séparés par des entretoises créant des conduites radiales qui permettent l'écoulement de l'huile à des fins de refroidissement. Les enroulements à disque sont généralement utilisés dans les applications de bobinage HT, car il est possible d'avoir une multitude de tours électriques dans une direction axiale relativement petite.

Lors de la conception d'un enroulement à disque, il faut tenir compte du fait que les croisements, comme le montre la FIGURE 1.8, entraînent la perte d'une partie de la rotation électrique du disque. Les croisements sont répartis en quinconce autour de l'enroulement afin d'assurer la stabilité mécanique. Le décalage se fait en commençant le croisement un ou plusieurs pas avant le croisement précédent. Un pas correspond à la distance entre le milieu de deux entretoises ou nervures adjacentes. Ainsi, pour passer du disque A au disque B, le conducteur doit se croiser avant d'avoir effectué une rotation complète de 360° [**18**].

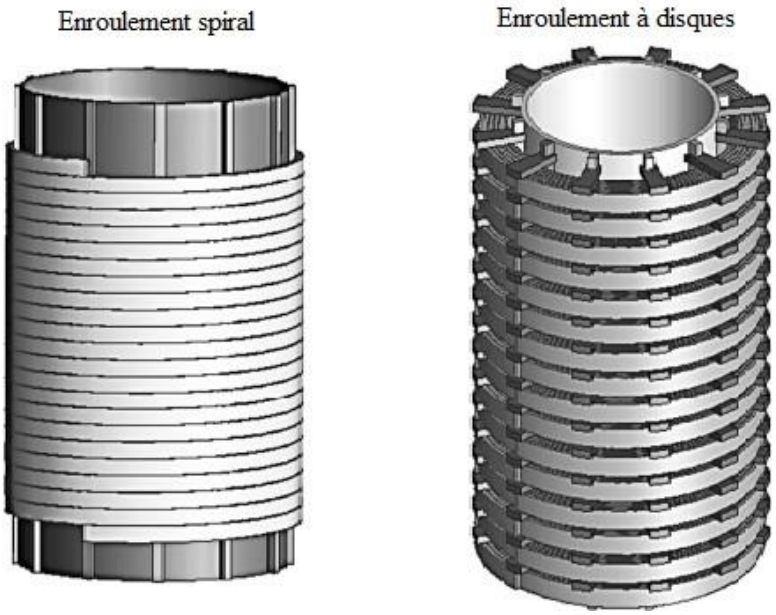


FIGURE1.7– Représentation d'un enroulement spiral et d'un enroulement à disque [**17].**

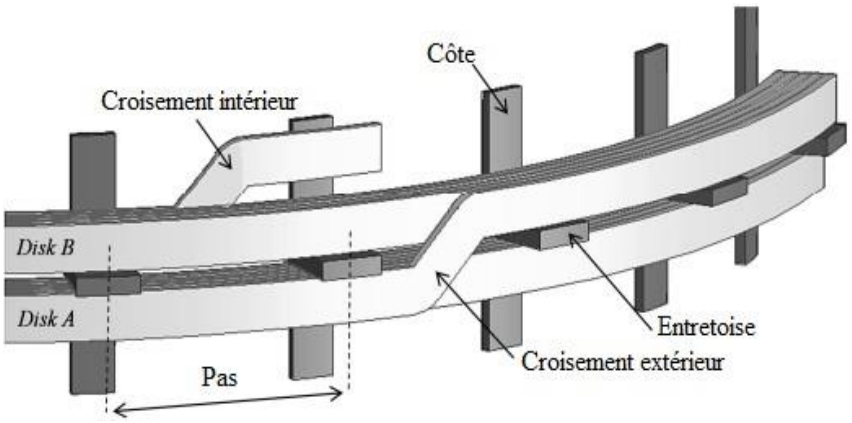


FIGURE1.8– Croisements dans les enroulements à disques [**17**].

1.3.3 Conducteurs des enroulements du transformateur de puissance

Les conducteurs utilisés dans les enroulements ont généralement une section rectangulaire et sont isolés avec du papier. Le cuivre est le matériau le plus utilisé pour les conducteurs en raison de sa résistance mécanique aux courts-circuits, mais dans certains cas, l'aluminium peut également être utilisé [**23**] [**24**].

Les courants d'enroulement élevés génèrent de la chaleur en raison de la résistance de l'enroulement. Ces pertes peuvent être réduites en augmentant la section transversale du

conducteur.

Cependant, comme les enroulements sont situés dans un champ magnétique, des courants de Foucault se forment à la surface du conducteur. Si l'on augmente la section du conducteur, la surface extérieure devient plus grande, ce qui augmente les pertes causées par les courants de Foucault **[25]**. Pour résoudre ce problème, il est possible d'utiliser plusieurs conducteurs en parallèle plutôt que d'augmenter la section transversale d'un seul conducteur. L'utilisation de conducteurs transposésen continu (CTC) est un autre moyen de réduire les pertes par courants de Foucault dans les enroulements tout en conservant une grande surface de section transversale. Il s'agit d'un type spécial de conducteur qui contient plusieurs brins rectangulaires revêtus de vernis qui sont périodiquement transposés comme le montre la FIGURE 1.9 **[23]**.

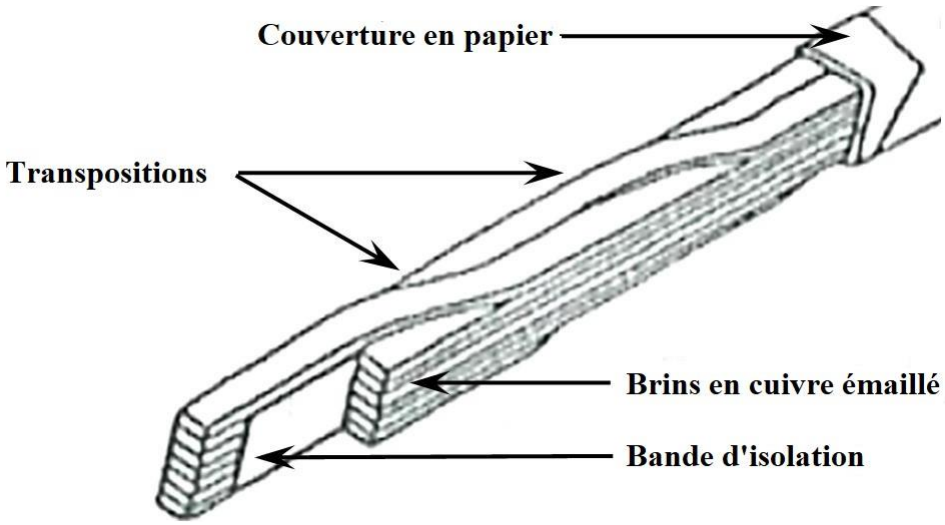


FIGURE1.9– Conducteur transposé continu (CTC) [**17**].

Les transpositions de conducteurs ou de brins parallèles sont nécessaires pour s'assurer que la même quantité de flux est enfermée dans les conducteurs parallèles. Si ce n'est pas le cas, une différence de potentiel se produira entre les conducteurs parallèles, ce qui entraînera des courants de circulation. Cela entraînerait des pertes supplémentaires dans les enroulements **[32] [24]**. Lorsque plusieurs conducteurs sont utilisés dans un enroulement à disque, les conducteurs sont transposés au niveau du croisement pour éviter les courants de circulation.

1.4 Défauts des systèmes d'isolation électrique

Le bon fonctionnement des équipements électriques repose notamment sur la qualité des structures isolantes qui y sont intégrées. Les systèmes d'isolation électrique ne sont jamais parfaitement homogènes en termes de matériaux isolants. Pendant leur fabrication, il est possible que des gaz se piègent au sein du matériau et forment des cavités d'air de différentes dimensions et formes (vacuoles). De la même manière, lorsque l'isolant est mis en contact avec les pièces conductrices, il est possible que des décollements se produisent entre le diélectrique et le conducteur. Ces défauts de fabrication comprennent notamment la présence de particules étrangères (contaminants) dans l'isolant des enroulements [**6**] [**26**]. Ces défauts peuvent également être causés par des contraintes thermiques et mécaniques lors de la fabrication de ces enroulements, ainsi qu'une application incorrecte de la tension. Finalement, l'isolation vieillit inévitablement tout au long de la durée de vie du transformateur, et toutes les contraintes électriques, thermiques, mécaniques et environnementales que le matériau doit supporter entraînent des changements irréversibles dans sa structure. En ce qui concerne les contraintes électriques, c'est-à-dire lorsque le matériau est exposé à un champ électrique, les imperfections mentionnées précédemment sont des sites particulièrement favorables à l'émergence de décharges partielles [**27**]. Effectivement, compte tenu de la diversité du matériau et de la présence de défauts, la répartition du champ électrique au sein de celui-ci n'est pas homogène. Par exemple, lorsque les cavités gazeuses sont présentes dans l'isolant, le champ électrique local peut atteindre une valeur considérée comme disruptive. Dans cette situation, on observe un arc de décharge local (un déplacement local et très rapide d'électrons et d'ions) qui s'oppose au champ appliqué. Cette décharge peut se répéter à chaque fois que le champ dépasse localement la valeur disruptive du gaz occlus. On qualifie ce phénomène de "charges partielles" car ces charges ne court-circuitent pas l'intégralité de l'isolation [**26**] [**27**].

1.5 Les phénomènes de décharges partielles

Les défauts dans les matériaux isolants des systèmes d'isolation électriques (SIE) peuvent entraîner des décharges partielles (DP). En effet, ces matériaux isolants utilisés ne sont jamais totalement uniformes [**28**]. D'une part, de très petites quantités de gaz peuvent souvent être piégés dans la matière au cours de leur développement et former des vacuoles de formes et de tailles très différentes, dont les propriétés (taille, pression, gaz naturel) ne peuvent être

prédites et caractérisées. Par contre, lorsque des isolants sont placés autour de pièces conductrices ou sous l'effet de contraintes thermiques ou mécaniques, des ruptures se produisent entre le diélectrique solide et le conducteur électrique [**29**]. Ces obstructions peuvent provoquer des décharges partielles.

Les DP peuvent être causés par d'autres types de défauts, comme ceux liés aux contraintes liées aux manipulations lors de la phase d'installation ou par les effets de pointe liés au passage près d'un plan de masse ou d'une arête [**28**].

1.5.1 Décharge à barrière diélectrique

Une décharge à barrière diélectrique (DBD) est un phénomène électrique qui se produit lorsqu'une haute tension est appliquée à travers un matériau isolant, créant ainsi une décharge électrique à travers ce matériau. Cette décharge se produit généralement dans un gaz, souvent à pression atmosphérique, mais parfois à des pressions plus élevées [**30**].

La décharge à barrière diélectrique implique un matériau diélectrique, qui est généralement un isolant. Les isolants typiques incluent des matériaux tels que le verre, la céramique ou certains polymères. Une tension élevée est appliquée à travers le matériau diélectrique, cette tension est élevée pour ioniser le gaz présent dans ou autour du matériau. En raison de la haute tension, le gaz environnant est ionisé, créant des charges électriques positives et négatives. Cela forme une région conductrice dans le gaz à proximité du matériau diélectrique. Lorsque la tension atteint un certain seuil, une décharge électrique se produit à travers la barrière diélectrique. Cette décharge est souvent caractérisée par des éclairs ou des étincelles. Après la décharge, le matériau diélectrique se rétablit, et le processus peut se répéter si l'excitation est toujours appliquée [**31**].

1.5.2 Définitions et terminologie

Une décharge partielle correspond à une décharge localisée dans une isolation. Celle-ci est qualifiée de partielle car elle ne court-circuite pas l'intégralité de l'isolation. La propagation de la décharge est restreinte soit parce que le champ électrique local n'est pas adéquat pour entraîner sa propagation complète (comme dans un gaz ou un liquide, par exemple), soit parce que la propagation est empêchée par un isolant dont le champ de claquage est plus faible (généralement un solide) [**32**].

Les décharges partielles (DP) apparaissent, en général, sous l'application d'une tension élevée [**33**] .Electriquement, elle se distingue par une tension élevée entre les électrodes et une intensité faible [**34**].

D'autre part, une décharge partielle se traduit principalement par un déplacement de charges (électrons et ions) sur une distance spécifique et pendant un laps de temps très court, ce qui entraînera donc un courant à chaque événement. En présence de pression atmosphérique, une activité de décharges partielles se manifeste par des trains d'impulsions de courant d'intensité faible (de quelques mA à quelques dizaines de mA) et de courte durée (généralement de quelques dizaines de ns à 100 ns) [**35**].

Une décharge partielle ne provoque pas immédiatement la défaillance du dispositif. Cependant, elle a la capacité de dégrader progressivement les matériaux et les systèmes d'isolation. En raison de mécanismes physiques tels que la pulvérisation locale de matière, la rupture oxydative des chaînes carbonées et la carbonisation, cette dégradation peut entraîner une rupture de l'isolation et donc une transition vers l'arc, ce qui entraînerait une défaillance complète du système [**35**].

1.5.3 Classification des décharges partielles

Parmi les nombreuses études sur la classification des décharges partielles, Kreuger a mis au point une méthode qui permet de classer les décharges partielles en fonction de leur localisation et de l'intensité de la charge qu'elles injectent [**36**]. Grâce à cette méthode, nous avons pu identifier 4 types principaux de décharges :

— **Les décharges internes :**

Elles se manifesteront dans des zones précises où la rigidité diélectrique du matériau sera faible, généralement dans des vacuoles d'air au sein d'un isolant solide [**35**].

— **Les décharges de surface:**

Il s'agit des décharges qui se forment lorsque l'isolant solide est placé dans un gaz isolant en contact avec un conducteur, et qui se répandent sur la surface de cet isolant solide. Elles commencent au niveau d'un point triple (interface entre le gaz, le métal et l'isolant solide) en améliorant localement le champ électrique [**35**].

— **Les décharges couronnes :**

Ces décharges se produisent lorsque le champ électrique est très hétérogène, généralement en présence d'un système pointe/plan, où le champ électrique sera très élevé à la pointe et beaucoup plus faible au plan. L'évolution de la décharge se fera dans une zone limitée de l'intervalle gazeux. Elles sont également connues sous le nom de décharges corona [**36**].

— **Les décharges en arborescence:**

La décharge se manifestera dans une zone où l'isolation est faible et se propagera ensuite dans l'isolant en créant des structures arborescentes. Les décharges seront situées dans les ramifications [**37**].

Ces quatre types de décharges partielles sont illustrés dans la figure ci-dessous.

En outre, on utilise également l'aspect impulsionnel ou non de la décharge comme autre critère de classification des décharges **[38]**. Le caractère impulsionnel de la décharge résulte de l'accumulation de la charge d'espace, ce qui réduit localement le champ de charge au niveau insuffisant pour maintenir la multiplication des charges. Les décharges non impulsionnelles se distinguent par un courant constant ou très peu variable en fonction du temps, pour une tension spécifique.

Les décharges enregistrées dans des cavités de polyéthylène sont classées par Morshuis en fonction des variations observées dans l'aspect des courants de décharge (durée de l'impulsion, temps de montée, hauteur) et dans les observations de lumière. Il a souligné l'existence de trois types de décharges [**39**] :

— Le régime streamer like;
— Le régime Townsend-like;
— Le pitting discharges.

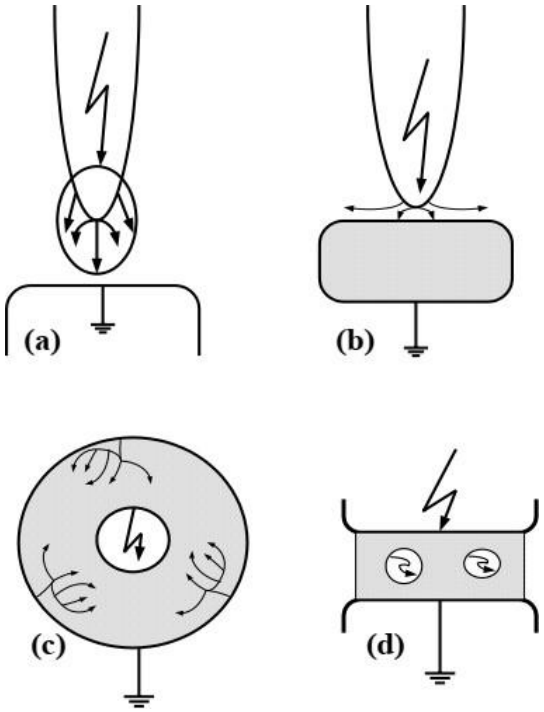


FIGURE 1.10– Différents types de décharges partielles, a. Décharge couronne, b. Décharge de surface, c. Décharge en arborescence, d. Décharge interne [**40**].

1.5.4 Causes des décharges partielles dans les transformateurs

Les décharges partielles dans une isolation transformateur peuvent apparaitre sous trois formes, à savoir :

— Les décharges dans les intervalles d'huile;

— Les décharges dans les isolants solides ;

— Les décharges à l'interface huile-isolant solide.

Le phénomène des décharges partielles peut survenir dans toute isolation contenant des cavités gazeuses [**41**], dés que la tension aux bornes atteint une valeur critique.

L'apparition de ces cavités peut avoir lieu dans les cas suivants [**40**], [**41**], [**36**] :

— Lors du remplissage du transformateur par le liquide diélectrique, ce sont des poches d'air.

— En service à cause des élévations locales de température, ce sont alors des vapeurs du liquide diélectrique.

— En champs élevés dans les zones de renforcement de champs lors de surtensions par exemple, et c'est le cas dans les enroulements du transformateur.

Parmi les facteurs contribuant à l'apparition des décharges partielles après formation des cavités gazeuses on note :

- Le renforcement du champ électrique à l'interface cavité-diélectrique dû à la faible valeur de la permittivité relative des gaz par rapport à celle des isolants solides ou liquides.
- La faible valeur de la rigidité diélectrique des gaz vis à vis des isolants solides.

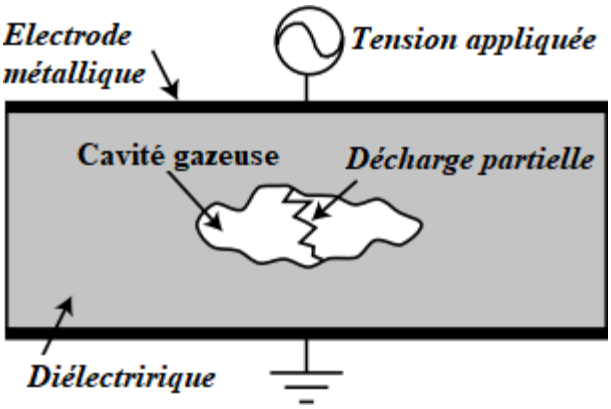


FIGURE1.11– Cavité gazeuse dans un diélectrique [**42**].

1.6 Dégradation des matériaux isolants en présence des DPs

Si des défauts se manifestent dans l'isolant, il est possible que des DP apparaissent, ce qui peut entraîner une altération des parois des cavités et favoriser leur croissance. La dégradation du matériau électrique est une étape de ce processus. Le phénomène des décharges partielles peut provoquer la rupture électrique (ou le claquage) de l'isolation, ce qui entraîne la destruction complète du matériau d'isolation électrique [**43**].

On retrouve les caractéristiques de ces trois processus (vieillissement, dégradation, rupture) dans la Table 1.1 [**44**].

Le vieillissement électrique s'effectue de manière constante tout au long de la vie du corps. Il est plus complexe d'observer et de diagnostiquer les processus impliqués dans le vieillissement électrique, contrairement à la dégradation ou à la rupture électrique. Effectivement, le processus de vieillissement comporte de multiples facteurs hypothétiques, encore mal établis. Il est encore nécessaire d'identifier les mécanismes de vieillissement et leur influence sur les performances des isolants. D'après **[43]**, une relation est observée entre la présence de charges d'espace et la formation de nano-cavités dans les

isolants, qui sont des signes du vieillissement électrique. Au-delà d'un seuil critique, le phénomène de charges d'espace pourrait provoquer une déformation électromécanique du matériau, ce qui entraînerait la croissance et/ou l'apparition de nano-cavités (vacuoles) ainsi qu'une augmentation de la conductivité du matériau.

	Rupture	**Dégradation**	**Vieillissement**
Effet	Catastrophique : le Matériau perd ses propriétés isolantes	Conduit à la rupture	Peut conduire à la dégradation
Vitesse	Très rapide<<1s	De quelques heures à plusieurs années, processus qui se renforce par lui même	Processus continu tout au long de la durée de vie de service
Détection	Observation directe, visible à l'œil nu : trou dans l'isolation	Observable directement par des techniques microscopiques	Difficile à observer et parfois à prouver
Lieu	Filament électrique continu entre les électrodes	Apparait au niveau des défauts d'isolation	Se produit sur l'ensemble de l'isolation
Taille	>mm, comparable à l'épaisseur de l'isolant	>μm, mais pouvant former des structures plus larges	> nm, échelle moléculaire
Exemples	Rupture électromécanique, thermique, électrique (claquage).	Arborescence électrique, arborescence d'eau, décharges partielles	Reconfigurations moléculaires, Altération de la composition chimique locale, formation de nano-cavités

TABLE1.1– Caractéristiques des phénomènes de rupture, dégradation et vieillissement **[44]**.

De plus, les phénomènes tels que les effets des charges d'espace ou les recombinaisons de charges électriquement opposées pourraient entraîner une réorganisation de la structure moléculaire, ce qui entraînerait également la formation et la croissance des nano-cavités en microcavités [**45**]. Ces microcavités peuvent se développer jusqu'à ce qu'elles soient assez grandes pour maintenir le phénomène de DP. De cette manière, le vieillissement électrique (croissance et formation de nano-cavités, augmentation de la conductivité due à la présence de charges d'espace) peut entraîner la détérioration du diélectrique, qui est également caractérisée par des processus tels que les DP. Ces DP peuvent constituer un chemin particulier pour la propagation d'une arborescence électrique, ce qui pourrait entraîner la rupture électrique finale de l'isolant (qu'elle soit d'origine thermique, électronique ou électromécanique) par percolation. Selon [**45**], la percolation désigne le processus où l'arborescence augmente progressivement dans les zones où des cavités sont en voie d'expansion par DP. De la même manière, un matériau peut être à la fois favorable à l'émergence de DP au sein de microcavités de très haute précision et également subir un vieillissement électrique qui se manifeste par l'apparition et/ou l'augmentation de nano-cavités. De cette manière, plusieurs processus peuvent se dérouler simultanément tout au long de la durée de vie d'un isolant [**46**].

La dégradation électrique se produit sur une période de temps inférieur à la durée de vie du conducteur, allant de quelques heures à quelques années [**45**]. Les polymères utilisés dans les appareillages haute tension sont principalement dégradés par des sources telles que les DP, les arborescences électriques et les arborescences d'eau (water trees). En cas de DP qui ne entraîne pas immédiatement la mise hors service d'un équipement, elle entraîne sa détérioration à une échelle microscopique, pouvant entraîner sa rupture finale après un certain niveau d'activité. Le processus de dégradation causé par l'activité des décharges partielles se caractérise par différentes étapes telles que représentées dans la figure suivante.

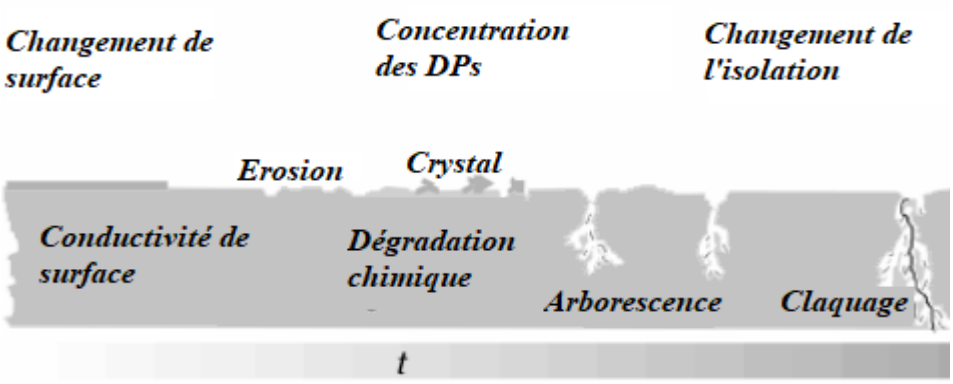


FIGURE1.12–Processus de dégradation de l'isolant provoqué par les décharges partielles [6].

En premier lieu, la dégradation peut être réalisée par voie thermique. La DP provoque la carbonisation de l'isolant. Par la suite, l'humidité et les produits de la dissociation de l'air causés par la DP (ozone et acide nitrique) augmentent la conductivité de la surface de la cavité [**47**], [**48**]. La surface de la cavité est érodée en raison de l'effet des charges internes de la DP sur ses parois. Une cavité en état de dégradation avancée (c'est-à-dire ayant subi plusieurs centaines d'heures d'activité de DP antérieures) se distingue par la formation de cristaux solides à sa surface. Les points formés par ces cristaux présentent des renforcements de champs électriques. Au niveau de ces pointes, les DP augmentent et les cavités se dilatent, ce qui entraîne la formation de la première branche de l'arborescence électrique. La présence de cette structure peut entraîner la rupture diélectrique de l'isolant. Lorsque le matériau est exposé à un champ électrique intense, il se produit une rupture diélectrique, ce qui ne lui permet pas de subir un vieillissement électrique causé par le stress appliqué. Différents processus peuvent entraîner la rupture diélectrique. En premier lieu, un champ électrique assez élevé peut entraîner une avalanche électronique, ce qui entraîne une rupture électrique immédiate du matériau. Il est question de claquage interne ou de rupture causée par des décharges électriques. De plus, des courants intenses qui circulent dans le matériau peuvent provoquer un échauffement par effet Joule et accroître la conductivité électrique du matériau. La rupture du diélectrique peut être causée par un emballement thermique. Cela concerne le claquage thermique. Enfin, lorsque le champ électrique est élevé, les conducteurs exercent une pression électrostatique sur les isolants. Cela entraîne une réduction de la densité de l'isolant ou la formation de fissures sur celui-ci. Il est possible que ce phénomène entraîne une rupture irréversible du matériau. Il est donc question de claquage électromécanique [**48**].

1.7 Mécanisme des décharges partielles

Le dispositif d'étude de la décharge est en général constitué d'un condensateur plan dont le diélectrique comporte une cavité gazeuse de forme et de dimensions connues. La figure ci-dessous représente schématiquement la cellule d'´etude d'une cavité gazeuse de forme rectangulaire.

En appliquant une tension alternative (f=50Hz) entre les deux électrodes, on observe à partir d'une certaine valeur de la tension appliquée, des impulsions de courant résultant de la formation de DP à l'intérieur de la cavité (FIGURE 1.14). La largeur de l'impulsion de DP dépend de la taille de la cavité et du champ électrique appliqué.

Dans une isolation solide, les décharges dans une cavité, sont représentées par le schéma classique à trois capacités appelé aussi modèle A.B.C [**49**], [**50**], (FIGURE 1.15).

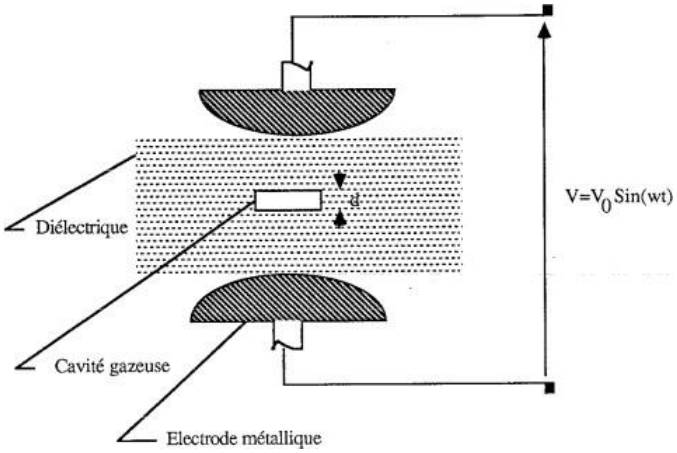


FIGURE1.13– Cellule d'étude des PDs [**49**].

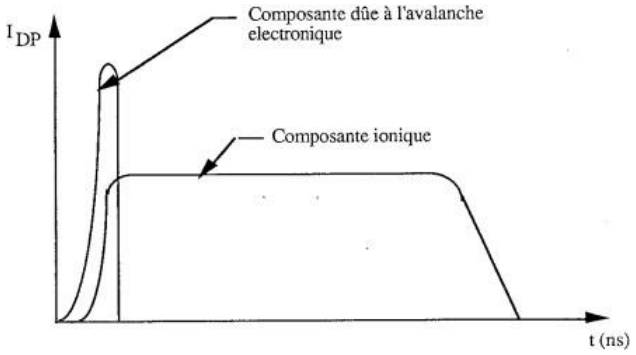


FIGURE1.14– Composantes du signal de courant obtenu après une DP [**49**].

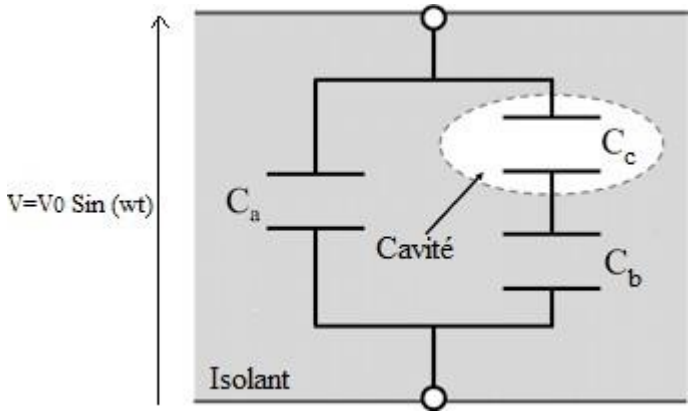


FIGURE1.15– Modèle électrique équivalent d'une décharge partielle [**51**].

V : Désigne la tension appliquée au dispositif.

C_a : Est la capacité parallèle formée par l'isolation.

C_b : Est la capacité de d'isolation en série avec la cavité gazeuse.

C_c : Est la capacité formée par la cavité gazeuse.

Selon TOWSEND, le mécanisme de la décharge est basé sur l'ionisation des molécules de gaz par les électrons. Ces derniers sont accélérés par le champ électrique présent et déclenchent le phénomène d'avalanche électronique, obtenu par multiplication électronique. Un canal ionisé appelé Streamer peut alors se développer permettant le passage d'un arc électrique [**44**], [**52**]. Ainsi, pour une certaine valeur de la tension appliquée aux bornes de la vacuole, plusieurs décharges disruptives vont apparaitre. Par suite de la neutralisation des charges sur les parois de la vacuole, la tension aux bornes de la capacité C_c : U_c diminue jusqu'à extinction de la décharge.

1.8 Caractéristiques des décharges partielles

Les paramètres suivants caractérisent l'activité des décharges partielles [**39**] :

1) L'intensité des impulsions électriques liées aux décharges. Il est difficile de mesurer ces courants, car leur grandeur est faible et leur durée est réduite.
2) La tension externe nécessaire pour générer des décharges partielles. En réalité, deux seuils sont établis pour caractériser la décharge :

   — V_{div} (Discharge Inception Voltage) tension d'amorçage de la décharge illustrée par U_a (FIGURE 1.16). La tension seuil est le point à partir duquel les décharges sont déclenchées dans le dispositif expérimental sélectionné lorsque la tension est progressivement augmentée à partir d'un niveau pour lequel aucune décharge n'est probable.

   — V_{dev} (Discharge Extinction Voltage) tension d'extinction de la décharge représenté par U_e, voir (FIGURE 1.16). Le seuil de tension est le point où les décharges s'éteignent dans le dispositif expérimental sélectionné lorsque la tension est progressivement réduite à partir d'un niveau pour lequel des décharges étaient détectées.

3) L'énergie de la décharge (dW) : On peut comparer la décharge dans une cavité à la décharge d'un condensateur. Elle représente le nombre de charges engagées lors de la décharge.
4) Le nombre de décharges pendant chaque cycle de fonctionnement (N/cycle) (sous une tension sinusoïdale).

$$N/cycle = 4\left(1+\frac{\alpha V_{crête} - V_{DIV}}{V_{DIV} - V_{DEV}}\right) \tag{1.1}$$

5) Le temps entre deux décharges successives :

$$\Delta t = \frac{V_{DIV} - V_{DEV}}{\alpha \dfrac{\partial V}{\partial t}} \tag{1.2}$$

Avec $\dfrac{\partial V}{\partial t}$: gradient de la tension appliquée ;

$$\alpha = \frac{C_b}{C_b + C_c}.$$

6) La charge apparente : En général, il est difficile de mesurer directement la variation de charge causée par une décharge partielle. La charge apparente (q) est alors utilisée, déduite de la variation de tension liée à la présence d'une décharge partielle aux bornes de l'installation. Effectivement, lors de la décharge, une partie de la charge libérée se déplace dans l'espace entre les électrodes.

$$q = C_b \Delta(V_c) \tag{1.3}$$

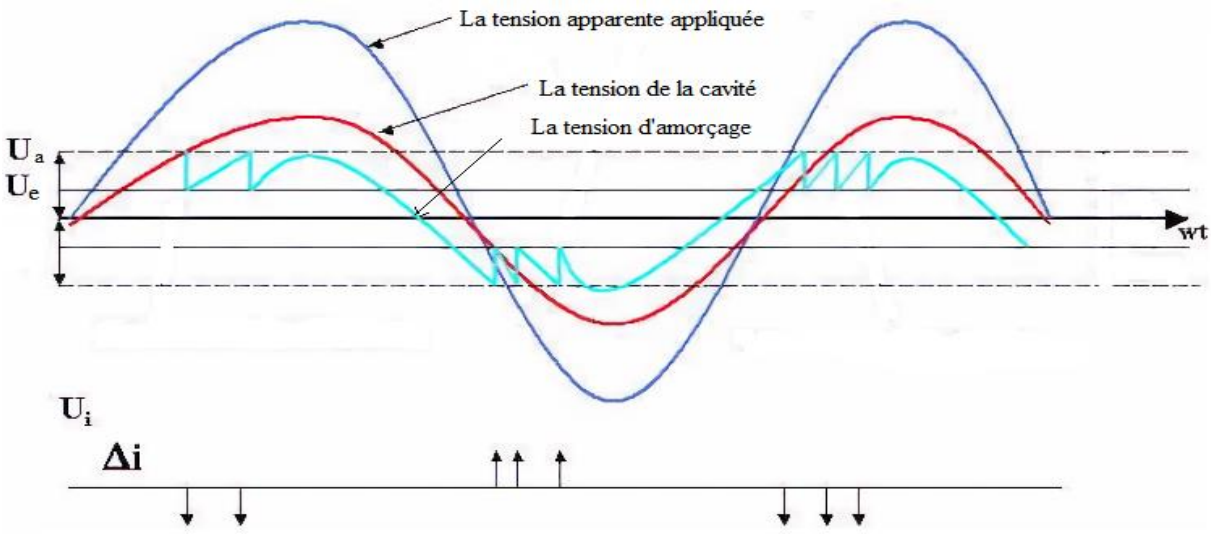


FIGURE1.16– Courbe de contrainte dans le processus de DP [**39**].

La forme des électrodes, les caractéristiques du matériau et toutes les capacités parasites qui entourent le montage de mesure ont un impact sur la charge apparente.

1.9 Méthodes de détection et de mesure des décharges partielles

La conception et la qualité des matériaux utilisés peuvent réduire le phénomène de DPs lors de la production de l'équipement. Des méthodes de détection peuvent être utilisées pour vérifier l'absence de décharge partielle, tant lors de la fabrication que pendant la durée de vie de l'installation.

Il est donc essentiel pour les industries électriques de prévenir les décharges partielles afin de garantir un service de qualité à long terme.

On peut décrire les différentes méthodes qui peuvent être utilisées, directement ou indirectement, pour identifier la présence d'une activité de décharge partielle et la caractériser comme suit :

1.9.1 Détection par mesure électrique

La méthode électrique implique la détection des impulsions électriques produites par les décharges partielles des cavités. Différents appareils de détection ont été mis au point par le passé, ils peuvent être classés en trois catégories [**43**]:

- Mesure de la tangente (dissipation de la puissance) ;
- Repérage par des dispositifs à large bande ;
- Repérage à bande ultra-large.

La détection des décharges partielles utilisant la dissipation de puissance (tan) n'était pas suffisamment précise pour obtenir des résultats satisfaisants. Des systèmes utilisant des oscilloscopes ont été créés et sont aujourd'hui largement utilisés. Ces détecteurs, appelés détecteurs à bande large, offrent une sensibilité élevée et une résolution rapide. La détection repose principalement sur la capture des différents modèles d'impulsion de courant produits par la décharge dans le fil de l'échantillon. Autrement dit, la grandeur de la décharge et la position de la phase sont principalement enregistrées. En revanche, le détecteur à ultra-large bande offre la possibilité de distinguer les décharges individuelles dont la durée est d'environ

nanosecondes et dont la réponse en fréquence est bien connue, ce qui n'est généralement pas le cas dans un dispositif industriel complexe.

Selon la possibilité de relier l'échantillon test à la terre, le circuit de mesure des DPs peut être réalisé selon deux configurations électriques : couplage direct (a, Figure 1.17) lorsque l'objet test est relié é la terre ou couplage indirect (b, Figure 1.7) lorsque ce dernier n'est pas relié à la terre [**53**].

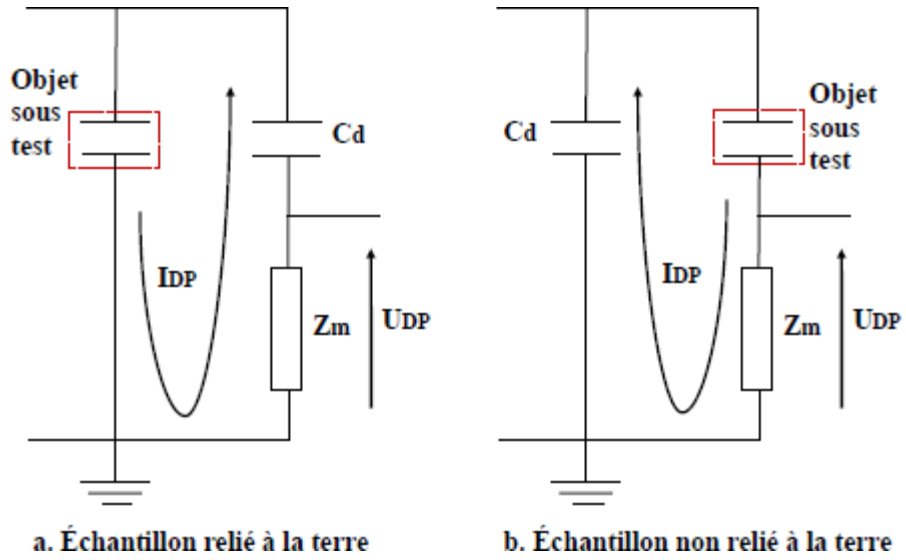


FIGURE1.17– Circuit de détection des décharges partielles [**43**].

L'approche de mesure consiste à utiliser un condensateur de couplage haute tension (Cd, Figure 1.17) et une impédance de mesure (Zm Figure 1.17) pour créer un capteur à impédance très faible à haute fréquence, ce qui permet la circulation libre des courants transitoires de DP. Dans l'exemple présenté (Figure 1.17), le condensateur Cd retire la partie continue de l'alimentation à haute tension pour protéger les équipements de mesure. D'autre part, dans le cas b, le condensateur Cd constitue une alternative favorable pour la circulation des courants de DP qui, sans celui-ci, devraient passer par l'alimentation haute tension dont l'impédance n'est pas régulée. L'impédance de mesure Zm transforme le courant de décharge en une tension de sortie, qui peut être évaluée à l'aide d'un oscilloscope.

Cette méthode de mesure a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre. Cependant, elle présente une grande sensibilité aux perturbations électriques provenant de l'alimentation et de l'environnement de mesure. Ces mesures requièrent donc l'utilisation de cages blindées [**54**].

La norme IEC 60270 [**53**] définit les principes de détection classiques, suggérant des largeurs de bande de 100 kHz à 400 kHz pour ces capteurs capacitifs [**55**]. Pour calibrer cette norme IEC, il est nécessaire d'injecter une charge connue dans le système et de mesurer la charge apparente en sortie. Les techniques de détection non conventionnelles [**56**] permettent, de leur côté, d'adapter cette bande passante. Les capteurs utilisés ne correspondent pas à la norme établie.

Les détecteurs classiques comprennent des systèmes d'acquisition à bandes très larges, pouvant atteindre 1 GHz, une mémoire très étendue et une fréquence d'échantillonnage précise. Les méthodes de détection non conventionnelles permettent donc, à la différence des détecteurs conventionnels, de préserver la forme initiale des pulses de DP qui peuvent renfermer des informations cruciales sur la nature de la DP et l'état de dégradation de l'isolant dans lequel elles se produisent. En outre, les systèmes de détection conventionnels ont une résolution temporelle d'environ 10*m*s, tandis que les systèmes de détection non conventionnels ont une résolution de quelques nano secondes [**56**], cela permet d'éviter la superposition des impulsions de DP et d'enregistrer individuellement un plus grand nombre d'événements DP.

1.9.2 Détection de DP par méthodes non électriques

On peut classer ces méthodes de détection en fonction du type de signal, elles exploitent les phénomènes physico-chimiques qui se produisent lors de l'émergence d'une décharge :

- La détection acoustique (Détection du son) ;
- La détection optique (détection de lumière) ;
- La détection chimique (détection de la transformation chimique et de la pression du gaz).

1.9.2.1. La détection acoustique

Une onde acoustique (voire une onde de choc) est produite par les décharges électriques, qu'elle soit audible ou ultrasonore. Les techniques acoustiques de détection reposent sur l'emploi de microphones à ultrason, comme une céramique piézoélectrique [**57**]. Dans certaines situations, cette approche peut aider à repérer les décharges et à évaluer leur énergie, qui est proportionnelle au carré de l'intensité des signaux détectés. Ce type de détection présente l'avantage principal de ne pas être affecté par les perturbations électromagnétiques,

contrairement à la détection électrique. Elle présente aussi l'avantage de ne pas être intrusive. La détection acoustique présente des limites en raison de la complexité de la propagation de l'onde acoustique [**58**].

1.9.2.2. La détection optique

Les décharges partielles se manifestent fréquemment par une émission optique dans le domaine visible ou ultraviolet [**59**]. Il est possible de détecter les signaux lumineux émis par les DP en utilisant un tube photomultiplicateur et une caméra rapide avec un intensificateur d'image. La particularité de cette méthode réside dans sa grande sensibilité et sa capacité à localiser les signaux des DP avec une grande précision. De plus, elle présente l'avantage d'être moins sensible aux perturbations électromagnétiques. Toutefois, elle a le désavantage d'être sensible à la lumière ambiante. Il est possible de réaliser les mesures dans l'obscurité, mais cela n'est pas toujours réalisable lorsqu'il s'agit de réaliser des mesures sur site, par exemple [**60**].

1.9.2.3. La détection chimique

Parfois, une activité de décharges partielles se combine avec l'émergence de substances chimiques (ozone, NOx,...). Cela s'applique particulièrement aux décharges produites en plein air, comme en cas de décharge de surface ou de décharge couronne (ce n'est pas le cas en cas de décharge dans une vacuole fermée). Lors de tests de DP, il est possible d'utiliser un testeur d'Ozone situé au plus près de l'isolation afin d'obtenir des informations supplémentaires sur l'existence de DP [**61**]. La composition des autres produits gazeux permet également d'obtenir des données sur le niveau de dégradation des isolants organiques [**62**].

1.10 L'Analyse de la Réponse en Fréquence (FRA)

L'analyse par réponse fréquentielle (FRA : The frequency response analysis) est un outil qui permet d'évaluer les défauts mécaniques et électriques dans les enroulements des transformateurs. Cela se fait par une simple mesure, tout en constatant à quel point un enroulement du transformateur peut transmettre un signal de basse tension avec une fréquence variable. Cela varie en fonction de son impédance, avec une répartition étroite des composants capacitifs et inductifs dans la structure physique du transformateur [**63**] [**64**].

La FRA peut détecter divers défauts, à la fois mécaniques et électriques. La variation de la réponse en fréquence est toujours le signe des changements physiques à l'intérieur de l'enroulement du transformateur, ce qui nous amène à identifier et à analyser les causes de ces changements [**65**]. En tenant compte de la configuration physique du transformateur, il peut être considéré comme un réseau complexe constitué d'une cascade de cellules RLC magnétiquement couplées, ce que nous allons voir en détail dans le deuxième chapitre. Ces trois éléments (RLC) sont représentés par la résistance des enroulements de cuivre, l'inductance des bobines d'enroulement et la capacité des couches d'isolation entre les bobines, entre un enroulement et un noyau, entre un noyau et la cuve, entre la cuve et un enroulement, etc.. [**66**].

La FRA a pour but principal de mesurer le comportement de l'impédance d'un transformateur soumis une tension sinusoïdale de faible amplitude sur une large bande de fréquence allant de quelques Hz jusqu'à quelque MHz. On appelle fonction de transfert le rapport entre la sortie et l'entrée de la réponse en fréquence d'un réseau RLC, lorsque les états initiaux d'un tel réseau sont nuls. Les résultats de la fonction de transfert permettent d'obtenir la corrélation entre la phase et l'amplitude. La FRA a été employée afin de mesurer l'état d'enroulement du transformateur en prenant en compte le fait que le déplacement ou le défaut dans l'enroulement affecte les caractéristiques électriques du transformateur, qui sont liées à ses paramètres capacitifs et inducteurs internes. Ainsi, les ajustements de ces paramètres influencent les réponses de fréquence d'enroulement, ce qui entraîne des changements. Il est comparable à une excitation d'un circuit résonant d'appliquer une faible tension à des fréquences variables sur l'enroulement du transformateur, ce qui provoque une ou plusieurs coupures de la réponse de l'enroulement, qui peuvent être interprétées comme des indicateurs de l'état de l'enroulement [**67**] [**68**].

1.10.1 Principe de la méthode

Un transformateur est un circuit très complexe, car il est constitué d'un grand nombre de capacitances, d'inductances et de résistances (FIGURE 1.18). Lorsque des signaux sont injectés à des fréquences discrètes, ce circuit génère une empreinte numérique ou une signature unique, et les réponses sont représentées sous forme de courbes [**69**].

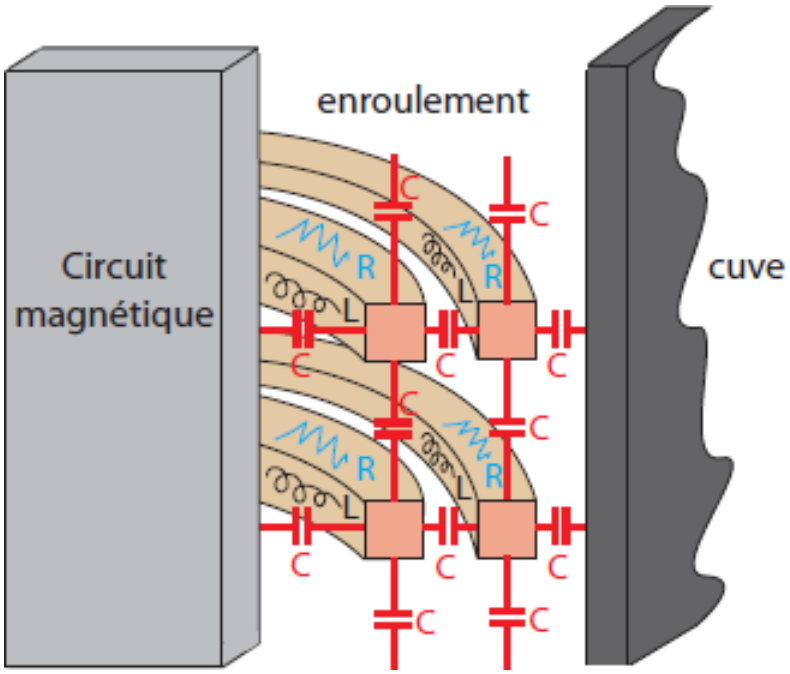


FIGURE 1.18– Modèle d'un enroulement de transformateur [**70**].

Le circuit magnétique à l'intérieur du transformateur de puissance est directement lié à la configuration géométrique des enroulements et à la répartition de ses composants, tels que les résistances, les inductances et les capacitances. On peut repérer ce réseau RLC en utilisant des fonctions de transfert qui varient en fonction de la fréquence. Cependant, la modification de sa configuration entraîne une variation de l'impédance du réseau, ce qui affecte la fonction de transfert. Les modifications apportées à la fonction de transfert vont mettre en lumière de nombreux types de problèmes. Ainsi, l'utilisation de la mesure par FRA permet de repérer les variations dans la fonction de transfert d'un enroulement à l'intérieur du transformateur de puissance, ce qui permet d'identifier un mouvement ou une distorsion dans sa structure [**70**].

La méthode de fonctionnement implique l'injection d'un signal d'excitation électrique dans l'un des enroulements et la mesure du signal de réponse sur une large plage de fréquences (méthode de balayage en fréquence). En comparant ces deux signaux, la réponse requise est obtenue. On appelle ce rapport la fonction de transfert du transformateur, qui permet d'obtenir la grandeur et la phase [**70**].

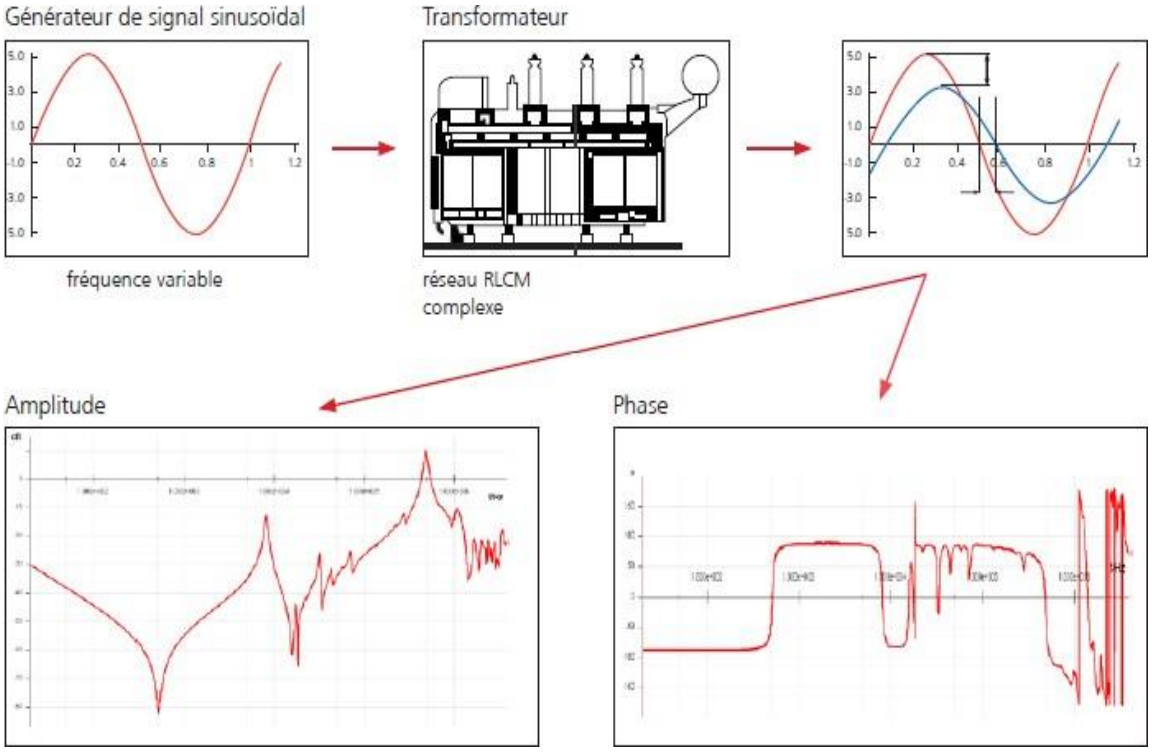


FIGURE1.19– Principe de la FRA **[70]**.

1.10.2 Zones de fréquences d'analyse FRA

Le domaine d'interprétation est illustré dans le Tableau 1.2 en tenant compte des contraintes découlant de la géométrie des installations d'essai. La forme de la courbe est généralement modifiée aux basses fréquences par les spires court-circuitées, l'aimantation et d'autres défauts liés au noyau magnétique. Quant aux fréquences moyennes, elles correspondent aux mouvements axiaux ou radiaux de l'enroulement, tandis que les fréquences hautes signalent des défauts liés aux connexions entre les enroulements, les traversées et les changeurs de prise [**70**].

Plage de fréquence	Défauts
f<2000Hz	• Magnétisme résiduel ; • Déformations du noyau.
2000Hz<f<20KHz	• Circuits ouverts. • Court-circuit entre spires,
20KHz<f<200KHz	• Déplacement relatifs entre les enroulements
200KHz<f<2MHz	• Déformations propres de l'enroulement.
2MHz<f<10MHz	• Disposition de couplages et câbles de mesure.

TABLE1.2– Domaines typiques d'interprétation de la méthode FRA [**70**].

1.10.3 Interprétation de la méthode

La FRA consiste à évaluer l'état des transformateurs de puissance de manière comparative. La comparaison des courbes des informations actuelles avec les informations de référence est généralement utilisée pour évaluer les résultats de FRA. Il existe trois méthodes pour obtenir des références [**70**] :

A. Evaluation par les empreintes digitales : On obtient une empreinte digitale lors du contrôle de réception de l'usine, ce qui peut être considéré comme la référence la plus fiable pour l'évaluation du test de FRA. Dans le cas où le test technique est très respecté, il est envisageable d'obtenir des résultats de FRA identiques s'il n'y a pas de modifications électromécaniques dans le transformateur.

B. Comparaison entre des transformateurs jumeaux : Il n'est pas toujours possible de consulter les résultats d'empreinte digitale pour évaluer les résultats de FRA. Les transformateurs conçus et assemblés de manière identique présentent généralement des courbes identiques lors de l'essai. Les transformateurs jumeaux présentent des légères déviations qui sont causées uniquement par des tolérances et des effets de fabrication de magnétisation du noyau.

C. Comparaison entre phases des enroulements du transformateur : On utilise ce genre de comparaison lorsqu'il n'y a pas d'empreinte de référence. La méthode consiste à comparer les différentes phases du transformateur.

1.11 Conclusion

Ce chapitre a permis d'établir une vue d'ensemble sur le fonctionnement de ces équipements, basés sur les principes d'induction électromagnétique, et d'explorer les différents types de transformateurs, en mettant en évidence les spécificités techniques et les configurations courantes dans les réseaux électriques. Nous avons également examiné les principaux composants internes, tels que les enroulements, le noyau magnétique et les systèmes d'isolation, en soulignant leur importance pour garantir la performance et la fiabilité du transformateur. Ce chapitre pose ainsi les bases nécessaires pour aborder les sujets plus complexes qui suivront, notamment les phénomènes de vieillissement, les mécanismes de défaillance comme les décharges partielles, et les méthodes de diagnostic utilisées pour assurer une détection précoce des défauts.

Par ailleurs, nous avons passé en revue les principales caractéristiques des DP, leurs mécanismes de génération ainsi que les facteurs favorisant leur apparition dans les enroulements des transformateurs. Nous avons également souligné l'importance de la détection précoce des DP, qui permet de prévenir des défaillances majeures, d'optimiser les interventions de maintenance et de prolonger la durée de vie des équipements.

Le chapitre suivant se concentre sur la modélisation des enroulements d'un transformateur de puissance en haute fréquence dans le but de comprendre et d'analyser le comportement de cet équipement lors de phénomènes transitoires rapides, comme les surtensions atmosphériques (causées par la foudre) ou les commutations électriques. À ces fréquences élevées, les caractéristiques électromagnétiques et les effets parasites des enroulements, tels que les inductances distribuées, les capacités parasites et les phénomènes de couplage électromagnétique, deviennent prépondérants et influencent fortement le comportement global du transformateur.

Chapitre 2

Modélisation haute fréquence des enroulements de transformateurs

2.1. Introduction

La modélisation haute fréquence des enroulements de transformateurs est cruciale dans la conception de transformateurs pour diverses applications à haute fréquence telles que les convertisseurs de puissance, les alimentations électriques à découpage et les réseaux de distribution d'énergie électrique **[71]**.

La modélisation des enroulements de transformateurs implique la prise en compte de plusieurs phénomènes électromagnétiques tels que les pertes dans le noyau, et dans les enroulements, ainsi que l'effet de peau et l'effet de proximité. Ces phénomènes électromagnétiques sont d'autant plus importants à haute fréquence, car ils peuvent avoir un impact significatif sur les performances du transformateur **[71]**.

Il existe plusieurs approches pour modéliser les enroulements de transformateurs à haute fréquence. L'une des approches les plus courantes consiste à utiliser des modèles électriques équivalents. Ces modèles sont basés sur des circuits électriques qui représentent les caractéristiques électromagnétiques des enroulements de transformateurs. Les paramètres du modèle sont déterminés à partir de mesures expérimentales ou de simulations numériques **[72,73]**.

Une autre approche consiste à utiliser des simulations électromagnétiques en trois dimensions pour modéliser les enroulements de transformateurs. Cette approche permet de prendre en compte de manière plus précise les phénomènes électromagnétiques tels que l'effet de proximité et l'effet de peau. Cependant, elle est plus coûteuse en termes de temps de calcul

et de ressources informatiques [**73**].

En résumé, la modélisation haute fréquence des enroulements de transformateurs est un domaine important pour la conception de transformateurs pour les applications à haute fréquence. Les approches de modélisation électrique équivalente et de simulation électromagnétique en trois dimensions sont deux approches courantes utilisées pour modéliser les enroulements de transformateurs à haute fréquence.

2.2 Modèle d'un transformateur de puissance à 50Hz

Si le transformateur est composé d'un bobinage primaire réparti et d'un bobinage secondaire avec une section de fil différente, et que chaque bobinage est réparti en m phases avec des bobines mises en série réparties régulièrement dans des encoches sur tout le circuit magnétique, on peut représenter le modèle du transformateur par un circuit équivalent couplé magnétiquement [**74**].

Une approche simplifiée est utilisée pour représenter le comportement magnétique du transformateur en déterminant ce modèle en tenant compte des hypothèses selon les quelles, le fer est de perméabilité infinie et que le circuit magnétique est linéaire.

Ce modèle simplifié du transformateur peut être représenté par un schéma équivalent qui comprend des éléments tels que des résistances, des inductances et des transformateurs idéaux.

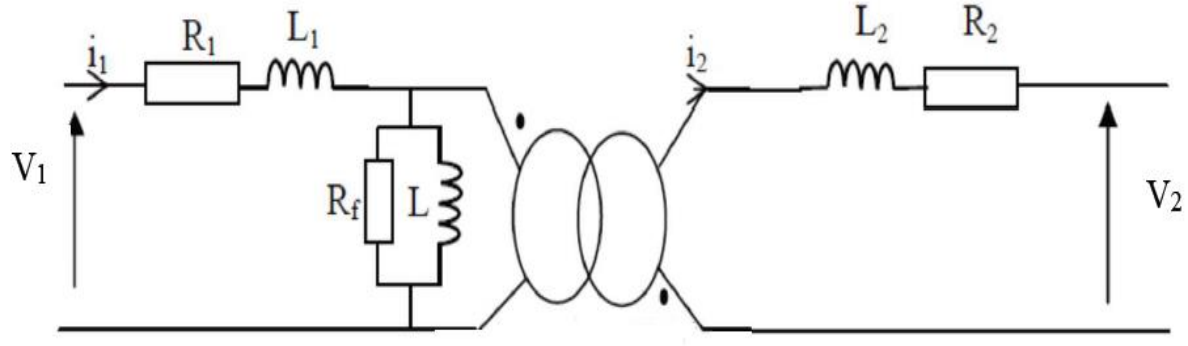


FIGURE 2.1– Schéma électrique équivalent d'un transformateur [**75**].

Cette approche simplifiée peut servir à étudier le comportement du transformateur dans diverses conditions de charge et à élaborer des systèmes électriques plus complexes. Les paramètres du modèle peuvent être calculés en fonction des caractéristiques du transformateur et des conditions de fonctionnement particulières [**75**].

2.3 Généralités sur la modélisation à haute fréquence

Un transformateur connecté à un réseau HT est exposé à diverses tensions (surtensions causées par les ondes de choc rapides et les oscillations internes). C'est pourquoi il est crucial de disposer d'un modèle qui reproduise le comportement du transformateur dans le régime transitoire de manière aussi fidèle que possible.

La modélisation des transformateurs en haute fréquence en régime transitoire peut être complexe, car elle nécessite de prendre en compte les effets non linéaires et les pertes dues aux phénomènes magnétiques, électriques et thermiques [**76**].

Dans ce chapitre, nous donnerons une brève description des principaux modèles physiques et mathématiques de transformateurs présents dans la littérature, ainsi que leurs caractéristiques.

2.4 Modèles physiques

On désigne sous le nom de modèle physique ou modèle basé sur les mesures tout modèle basé sur la présentation d'un prototype qui décrit le transformateur étudié à une échelle d'assimilation géométrique et électromagnétique précise [**76**].

2.4.1 Modèle basé sur la construction d'un prototype de taille réelle

En développant un modèle du transformateur à échelle unitaire, il est possible d'analyser de manière fiable la diffusion des phénomènes à haute fréquence dans les conduits du transformateur. Cette méthode est clairement la plus précise, à condition que les différents paramètres (géométriques, électriques et magnétiques) du prototype soient identiques à ceux du transformateur testé [**77**]. Cependant, les résultats obtenus en réalisant des mesures sur un modèle ne sont applicables que sur les mêmes types de transformateurs. Pour un autre type de transformateur, avec des paramètres géométriques, électriques et magnétiques sont variés, il est nécessaire de créer un nouveau prototype, ce qui constitue son principal inconvénient. Cette solution est donc onéreuse et sa mise en place requiert un investissement considérable, en particulier lorsqu'il s'agit de transformateurs de grande taille, dont la masse unitaire des parties actives est importante. En outre, il est complexe de simuler les diverses contraintes auxquelles le transformateur est soumis lorsqu'il est connecté au réseau électrique en laboratoire.

Une autre difficulté liée aux mesures est que pour les transformateurs secs à bobines

enrobées et blindées, il est quasiment impossible de réaliser des recherches et des mesures, car l'enrobage empêche l'accès aux spires de l'enroulement des bobines. Les transformateurs de grandes puissances rencontrent des difficultés particulières avec ces mesures [**78**].

Toutefois, malgré ces désavantages, cette méthode a l'avantage d'être applicable à tous les types de transformateurs [**79**]. Cependant, il convient de souligner que la fiabilité des résultats obtenus par cette méthode est fortement conditionnée par la qualité des mesures réalisées (précision des appareils de mesure, et surtout du câblage).

2.4.2 Prototype de taille réduite avec similitude géométrique

Chadek a été le premier à développer cette méthode. Elle implique la création d'un transformateur prototype de petite taille et la réalisation de mesures. Les lois de similitude physique et les résultats des mesures réalisées, permettent de déterminer le comportement où les paramètres du transformateur concret **[80]**.

Quelques exemples fournis par Heller et Veverka **[80]** démontrent que cette méthode peut fournir des résultats fiables. Toutefois, en plus des désavantages mentionnés précédemment, Il existe des difficultés concernant la fiabilité du modèle et les problèmes de facteur d'échelle [**81**].

En effet, il est difficile de concevoir un prototype qui respecte tous les aspects du transformateur réel, même si c'est l'une des conditions indispensables pour obtenir des résultats fiables. De même, la réduction de l'échelle temporelle, qui découle de la réduction des dimensions géométriques du prototype, nécessite l'utilisation d'ondes à front très fortes, elles-mêmes difficiles à réaliser [**81**].

2.4.3 Prototype de taille réduite avec similitude électromagnétique

Ce modèle présente une similitude avec l'original, à la fois en ce qui concerne les dimensions extérieures et la disposition et les dimensions géométriques des enroulements. Toutefois, il est possible que le nombre de spires du modèle équivalent (à la différence du modèle réduit précédent) diffère de celui de l'original.

De plus, une chaîne de condensateurs est connectée à la partie électromagnétique pour reproduire la partie diélectrique du modèle initial. Il semble que ce modèle ait été validé grâce à une concordance satisfaisante avec les résultats expérimentaux **[82]**, Il est toutefois important de souligner que son utilisation n'est pas très courante et que sa mise en œuvre est

très longue.

2.5 Modèles mathématiques

De nombreux travaux ont été réalisés pour trouver un modèle original du transformateur en HF. Cette finalité est loin d'être réalisable en raison de la dépendance des phénomènes associés aux différentes structures de chaque transformateur.

En effet, il a été constaté que la modélisation du transformateur de puissance est souvent basée soit sur l'analyse du régime transitoire, soit sur la répartition de la tension dans l'enroulement pour évaluer la protection des isolants contre les surtensions. Le transformateur peut donc être divisé en deux grandes tendances :

- **Modèle détaillé :** L'objectif de ce genre de modèle est de présenter le transformateur à travers un vaste réseau de capacités. Pour calculer ces paramètres, il est nécessaire de résoudre des équations électromagnétiques complexes et d'obtenir des données sur les matériaux et la géométrie détaillée de chaque transformateur. La modélisation minutieuse de chaque spire fait que ce type de modèle est principalement destiné à l'analyse de la répartition de la tension dans les enroulements [**83**].
- **Modèle entrée-sortie** : Dans ce mode de fonctionnement, le transformateur est considéré comme une boîte noire et la modélisation s'appuie sur les propriétés en domaine fréquentiel des impédances du transformateur à partir de ses extrémités. À partir de ces caractéristiques, un circuit semblable sera élaboré. Ce schéma est adapté à l'étude de l'interaction du transformateur avec le réseau [**83**].

2.5.1 Modèle universel

Les réseaux électriques en régime transitoire sont analysés à l'aide du programme EMTP (Electromagnetic Transients Program). Ce programme est utilisé comme norme dans les recherches sur le temps et la fréquence [**84**]. L'utilisation de ce code de calcul permet de représenter un transformateur en utilisant un schéma électrique équivalent, qui comprend :

- des transformateurs parfaits ;
- une branche magnétisante qui peut être saturée, symbolisant le noyau de fer ;
- Les inductances de fuite des groupes tels que les galettes, les couches ou les bobines. et, les résistances des enroulements et les capacités de couplage.

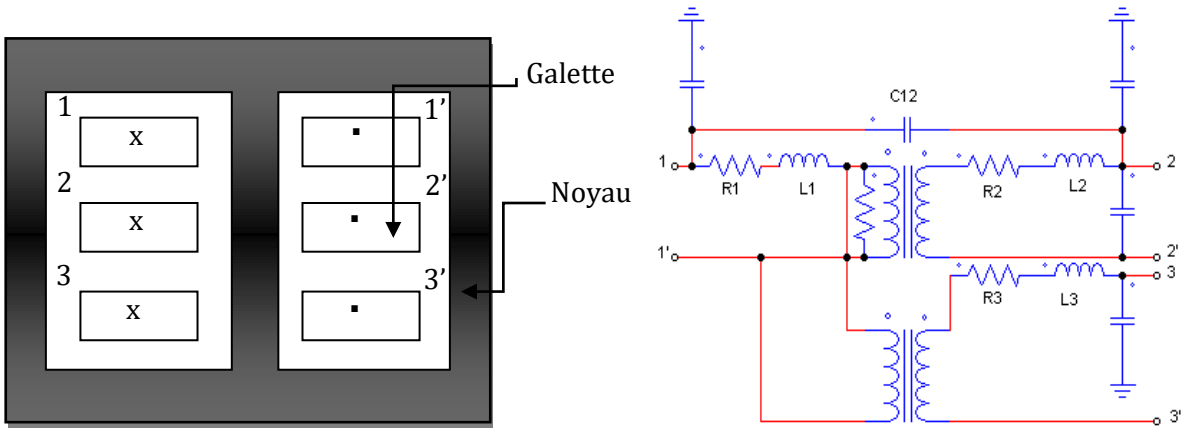


FIGURE 2.2–Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP **[85]**.

a) Coupe transversale du transformateur ;

b) Circuit équivalent.

On obtient les différents paramètres du schéma équivalent présenté dans la FIGURE 2.2 (R1 résistance de la galette 1, 2....) soit par mesure (essais à vide, essais en court-circuit,...), soit par calcul numérique, soit par analyse, en se basant sur la forme du transformateur et en faisant des hypothèses simplificatrices (symétrie, perméabilité du noyau magnétique constante,...).

Le programme EMTP tient compte de la variation des paramètres inductifs et résistifs en fonction de la fréquence (courants induits) pour la représentation à haute fréquence, en utilisant des circuits R, L placés en cascade ou en parallèle, remplaçant ainsi les dipôles de résistance et d'inductance [**87**] (FIGURE 2.3).

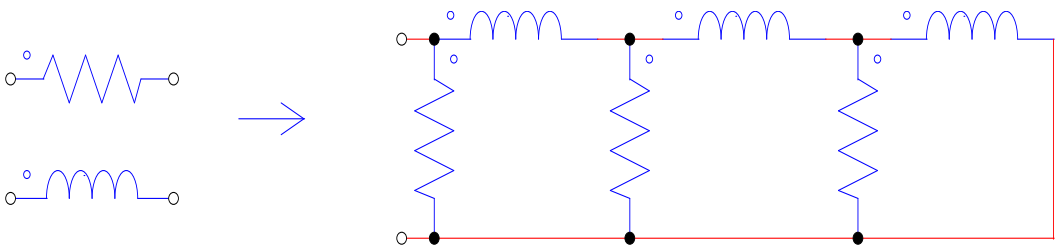


FIGURE 2.3–Modèle HF d'un enroulement (R et L) **[87]**.

Un avantage important de l'utilisation du modèle EMTP est qu'il permet de voir la relation entre le transformateur et le réseau dans des configurations quasi-réelles (avec des protections,...). En effet, outre les éléments linéaires (résistances et inductances linéaires), il

traite aussi des éléments non linéaires (parafoudres).

Toutefois, l'emploi du code de calcul EMTP pour représenter un transformateur n'est pas toujours conforme à la réalité. En effet, ce modèle n'est pas parfaitement symétrique dans le cas d'un transformateur monophasé à deux enroulements égaux (haute tension et basse tension), et l'inductance de court-circuit est différente du point de vue primaire et secondaire.

Le modèle est idéal pour les recherches sur les réseaux, mais il ne correspond pas aux recherches internes sur le transformateur.

2.5.2 Modèle de Leon

Leon et Semlyeh **[88]** ont exposé dans leurs recherches la création d'un modèle de transformateur de puissance à haute fréquence. Il offre la possibilité d'étudier en profondeur le noyau et les enroulements. Pour les enroulements, on calcule ce qui suit :

- Une matrice d'inductances de fuite entre les paires de spires (ou sections/galettes) ;
- Une matrice de capacités entre spires (ou sections/galettes) et entre les spires et les masses ;
- Une matrice de résistance basée sur la fréquence et qui prend en considération les courants de Foucault.

On calcule un système de trois matrices pour chaque colonne du circuit magnétique, puis on les transforme en une équation d'état. Par la suite, nous élaborerons un circuit de Foster en série (FIGURE 2.4) afin d'approximer la caractéristique de l'enroulement sur chaque colonne.

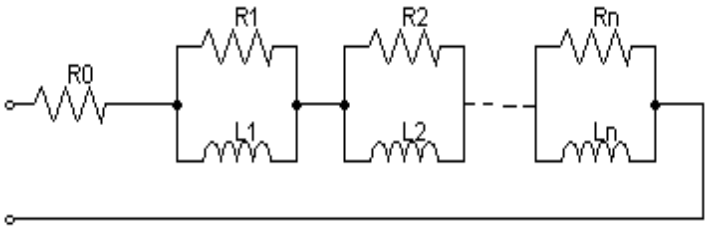


FIGURE 2.4 – Circuit de Foster en série [**88**].

Le noyau est illustré par l'effet des courants de Foucault en utilisant un circuit de Cauer [**88**] (FIGURE 2.5).

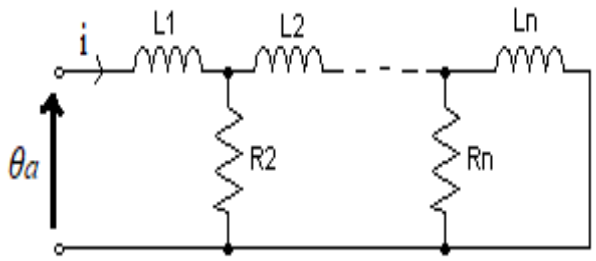


FIGURE 2.5 – Modèle de Cauer pour le noyau de fer [**88**].

Ce modèle ne prend pas en considération l'inductance mutuelle dans l'air entre les enroulements, mais il permet néanmoins de représenter le transformateur par un circuit équivalent.

Cependant, la difficulté demeure assez importante à cause des calculs analytiques et des transformations en circuit équivalent **[86]**.

2.5.3 Modèle Chimklai

Dans ce modèle, les auteurs ont suggéré une approche facile pour représenter un transformateur de puissance **[86]**. Il repose sur le modèle traditionnel du transformateur (à 50Hz). Afin de représenter le transformateur en HF, des mesures sont utilisées pour synthétiser les capacités et les circuits R, L, C, puis intégrés dans le circuit du modèle classique. Chaque circuit ajouté est en fait un phénomène qui se produit à haute fréquence. Les capacités symbolisent les phénomènes électrostatiques de l'enroulement, tandis que les circuits R, L, C symbolisent les phénomènes magnétiques dans le noyau de fer, etc.

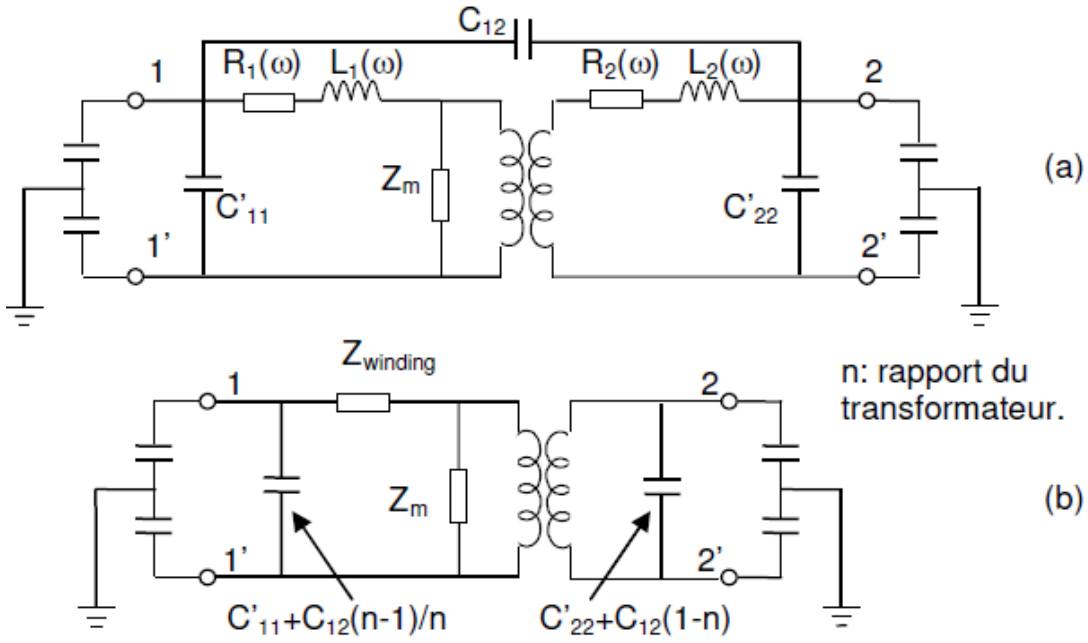


FIGURE 2.6 – Modèle du transformateur de Chimklai.
(a) circuit d'origine, (b) circuit simplifié **[83]**.

Une adaptation à un modèle HF est réalisée en utilisant :

— En prenant en compte la dépendance en fréquence de la résistance et de l'inductance de l'enroulement, appelée impédance de l'enroulement ($Z_{winding}$), comme montré dans la FIGURE 2.7. La méthode d'approximation non linéaire est utilisée pour synthétiser cette impédance afin d'obtenir un circuit R, L, C tel que présenté dans la figure ci-dessous.

— Il est ajouté un système de capacités, avec la capacité entre les enroulements, la capacité entre l'enroulement et la terre, la capacité entre les spires d'un enroulement. Toutes les fréquences étudiées sont considérées comme étant constantes. Il est possible de diviser toutes ces capacités, à l'exception de la capacité entre les spires d'un enroulement, en deux parties, chacune étant reliée à une extrémité de l'enroulement **[83]**.

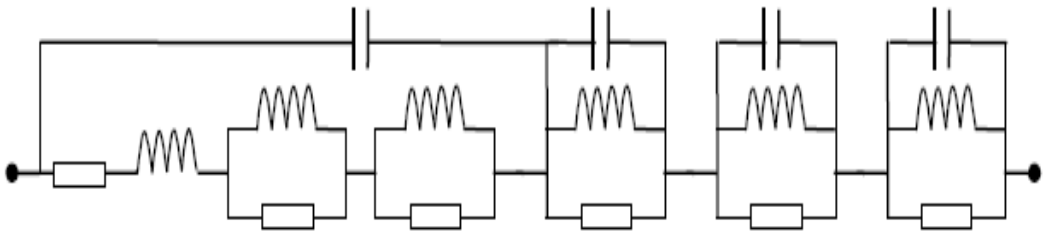


FIGURE 2.7 – L'impédance $Z_{winding}$ **[83]**.

Grâce à cette modélisation, nous disposons d'une solide base pour élaborer un modèle du transformateur en HF. Toutefois, des limites demeurent : il considère que les phases sont symétriques, la fréquence à laquelle le modèle reste valide est de 100 kHz.

2.5.4 Modèle de Gustavsen

Le concept de ce modèle est similaire à celui de Morched, en prenant le transformateur comme une boîte noire. La distinction réside dans la façon dont les éléments de la matrice d'inductance sont approximatifs. Les auteurs de ce modèle ont élaboré une technique appelée "vector fitting" afin d'approximer chaque élément à l'aide d'un circuit R, L, C équivalent.

La distribution gratuite du code d'approximation pour ce modèle permet de réaliser une simulation simple et efficace. Ce modèle a des avantages et des inconvénients similaires à ceux du modèle de Morched, à savoir la difficulté des mesures pour obtenir la matrice d'inductance, qui est très délicate en HF [**86**].

2.5.5 Modèle de Noda

Le modèle de transformateur de puissance en HF a été développé par Noda et Al **[83]**. Ce modèle est basé sur le principe de Chimklai. Ainsi, à partir du modèle à 50Hz, en HF, il prend en considération :

- Capacités entre les disques, et entre les disques d'enroulement et la terre (C_{s1}, C_{s2}, C_{sm}) ;
- Effet de peau du conducteur et du noyau de fer (Z_{skin}) ;
- Résonances créées par les inductances de l'enroulement et capacités entre les spires (Y_1, Z_2).

Un circuit équivalent représentera chaque phénomène. L'ensemble du modèle est illustré dans la FIGURE 2.8.

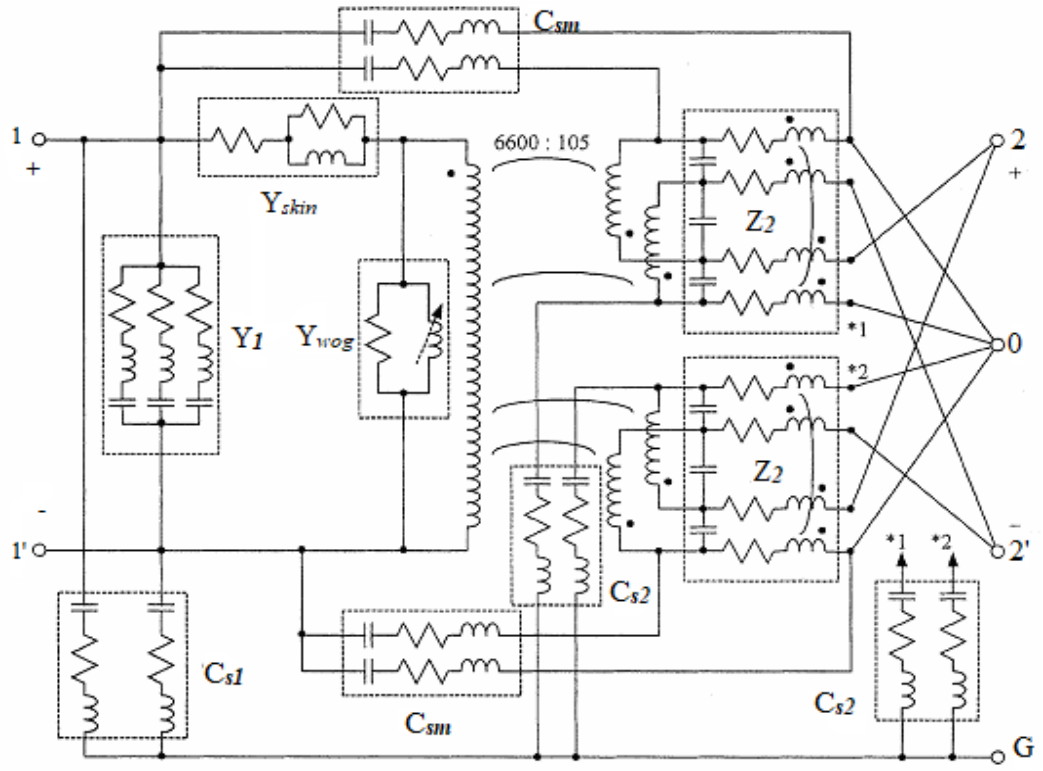


FIGURE 2.8 – Modèle de Noda **[83]**.

Ce travail a dévoilé des techniques fondamentales pour élaborer des circuits équivalents qui représentent des phénomènes tels que les résonances ou les capacités. Cependant, en raison de la structure du transformateur monophasé et de la configuration de l'enroulement de BT, il demeure encore difficile d'appliquer ce modèle **[83]**.

2.5.6 Modèle d'Andriau

Un modèle de transformateur de distribution triphasée à deux enroulements a été développé par Andrieu et ses collègues en utilisant des principes similaires à ceux du modèle de Chimklai, comme illustré dans la FIGURE 2.9 **[86]**. Afin de représenter un transformateur en HF, on tient compte des phénomènes suivants :

- les capacités ;
- les résonances en HT,
- l'impédance de l'enroulement de BT, dépendant de la fréquence (Z_{CC}).

La procédure suggérée par l'auteur consiste à établir les mesures nécessaires pour créer un modèle à HF. Les différentes mesures incluent les mesures de capacité, les mesures en court-circuit et les mesures en circuit ouverte.

Cependant, la fréquence maximale à laquelle le modèle peut être utilisé est inférieure à 1MHz ; plus la fréquence augmente, plus on observe des divergences entre les résultats de la simulation et les mesures **[83]**.

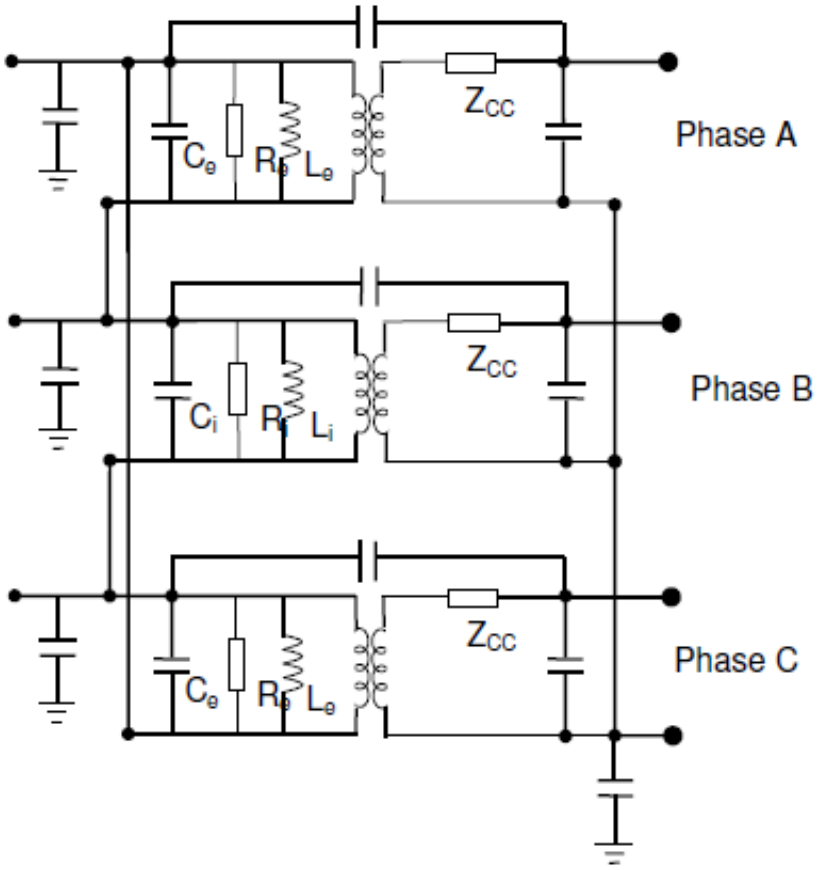


FIGURE 2.9 –Modèle d'Andrieu **[86].**

2.5.7 Modèle à réluctances et sources commandées (Modèle RESEL)

Les circuits magnétiques à basse fréquence sont généralement analysés en se basant sur les réluctances des divers flux. On utilise la loi d'Ohm pour les circuits magnétiques (nI=RΦ) [**85**].

Il est possible d'associer les réluctances en série ou en parallèle pour former un circuit magnétique de transformateur. Les trajets des flux de fuites peuvent aussi être représentés par des réluctances, où des sources de tension (équivalentes aux forces magnétomotrices) sont placées en série avec les réluctances du noyau, dans lesquelles circulent des courants équivalents aux flux [**86**].

La représentation de toutes les équations magnétiques d'un transformateur est ainsi possible.

En connectant ce circuit à un modèle de réseau électrique, on obtient un outil efficace et adaptable pour analyser les phénomènes électriques dans les transformateurs.

Pour représenter un transformateur, il est nécessaire d'utiliser deux types de schémas couplés entre eux :

- un schéma qui représente le comportement électrique du transformateur, composé de forces électromotrices: $n_1 \frac{d\phi_1}{dt}$, $n_1 \frac{d\phi_2}{dt}$, et de plusieurs dipôles RL sont associées : r_1, la résistance primaire, et r_2, la résistance secondaire (leurs branchement varie en fonction des techniques de bobinage utilisées dans les transformateurs).
- et un schéma qui traduit son comportement magnétique, constitué d'un réseau de réluctances ($\mathfrak{R}_{f1}$ et $\mathfrak{R}_{f2}$: réluctances de fuites, et $\mathfrak{R}_{12}$: réluctance principale) ainsi que de forces magnétomotrices (n_1i_1 et n_2i_2).

Les deux schémas sont reliés comme suit : les sources électriques sont associées aux variations de flux du circuit magnétique, tandis que les sources magnétiques sont associées aux courants dans les enroulements.

Il est relativement facile de résoudre les équations de Maxwell en prenant en considération les effets de la fréquence en décomposant le circuit magnétique en éléments de géométries simples. Ainsi, les réluctances obtenues sont formées de cellules RL.

En outre, l'ajout d'éléments (impédances) complexes nous permet de tenir compte de l’effet de peau. Toutefois, il est possible de mentionner deux inconvénients importants du code de calcul RESEL : Il ne concerne que les éléments du réseau ayant des constantes localisées, et il ne permet pas d'analyser de manière systématique la fréquence du transformateur, mais plutôt une analyse temporelle. La FIGURE 2.10 représente le principe de ce modèle.

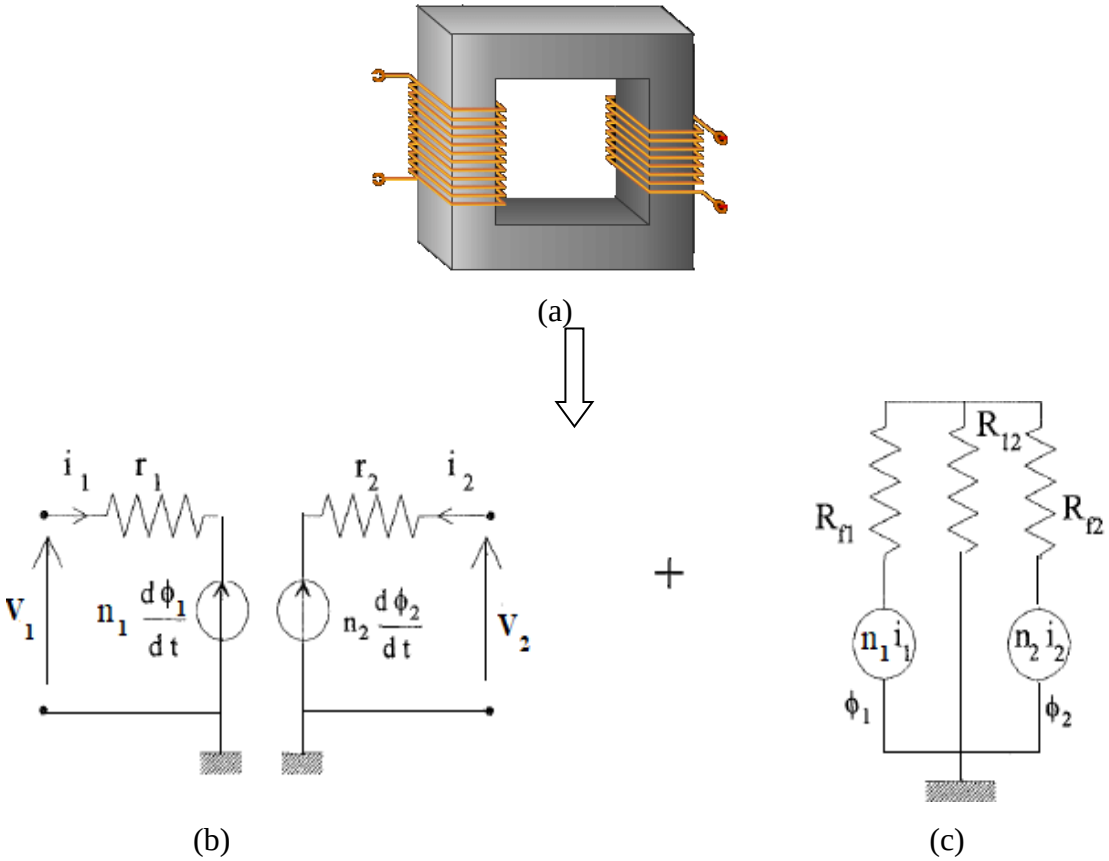


FIGURE 2.10 – Principe du modèle à réluctances et sources commandées (Modèle RESEL) **[90]**.

2.5.8 Modèle basé sur la théorie des lignes

La modélisation des transformateurs à l'aide de la théorie des lignes consiste à décomposer l'enroulement d'un transformateur en spires élémentaires, en supposant un flux magnétique et une vitesse de propagation constants à l'intérieur de l'enroulement. Cette méthode aboutit à une relation linéaire entre la matrice de capacité et la matrice d'inductance, fournissant des résultats valables pour des centaines de nanosecondes. Toutefois, cette approche est limitée aux transformateurs ayant un petit nombre de spires. La méthode implique de transformer la fonction de transfert du transformateur du domaine temporel au domaine de Laplace, puis au domaine z, ce qui nécessite de multiples transformations et des mesures expérimentales avant l'application **[92]**.

Les modèles créés en se basant sur cette théorie simplifient la représentation des transformateurs et des lignes de transmission, en négligeant l'effet de peau, l'effet de sol et les variations de paramètres. Bien que ces modèles offrent des perspectives originales, ils sont limités par des hypothèses trop simples, ce qui restreint leur applicabilité à des études plus larges et nécessite l'inversion numérique des transformées de Laplace sans validation

expérimentale.

La méthode est élargie pour N enroulements, sans validation, pour prendre en compte le noyau magnétique dans le calcul des impédances **[87]**. Les enroulements dotés d'épaisseurs appropriées sont pris en compte et la précision de la méthode est réduite en fonction du degré de discrétisation du transformateur.

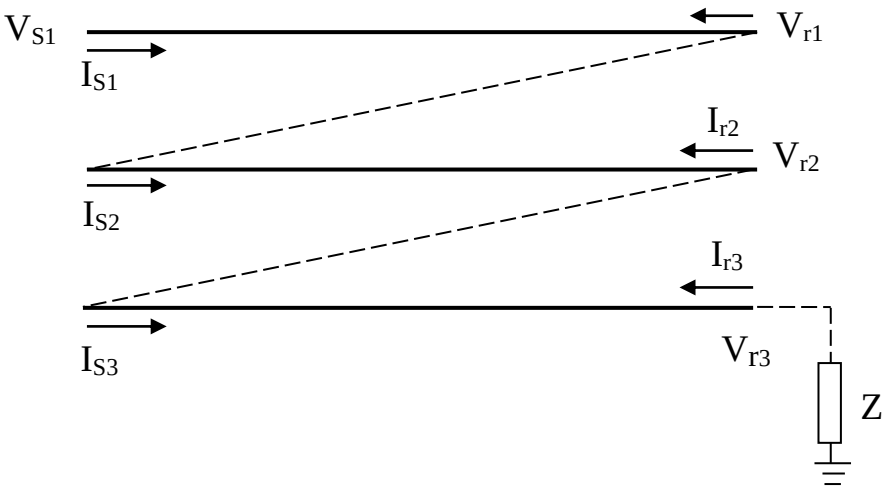


FIGURE 2.11 – Schéma équivalent d'un enroulement **[86]**.

Dans une autre étude, le concept de la ligne a été employé afin de saisir les résonances internes du transformateur lorsqu'il s'agit d'un court circuit de la ligne reliant le transformateur à la terre. L'ensemble du système est répercuté par le circuit résonnant en série, avec le transformateur représenté par un circuit R,L,C à la fréquence de résonance, et la ligne (les bornes du transformateur au défaut) étant représentée par son impédance. Ensuite, les auteurs étudient les réflexions des ondes au point d'interconnexion, transformateur et ligne, en considérant le transformateur comme une ligne de transmission, comme le montre la FIGURE 2.12. Les critères sont complexes à établir et l'application de la méthode demeure limitée pour les études d'interaction entre transformateur et ligne [**87**].

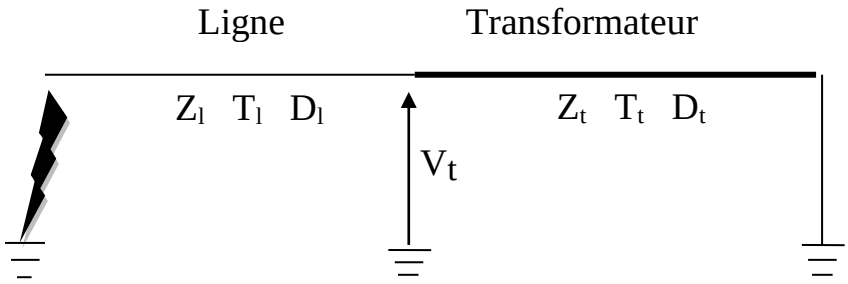


FIGURE 2.12 – Modélisation du transformateur par une ligne.

Z impédance caractéristique, **T** temps de propagation, **D** facteur d'amortissement [**87**].

2.5.9 Modèle obtenu par analyse modale

La méthode de l'analyse modale consiste à décrire un système capable d'osciller en utilisant des paramètres modaux, obtenus à partir des mesures.

L'analyse modale permet de représenter un transformateur comme une boîte noire (quadripôle) et d'examiner les formes d'ondes à ses extrémités (entrée et sortie). La fonction de transfert permet de relier le signal de sortie au signal d'entrée. Quand une tension excitatrice (ondes de manœuvres ou coups de foudre) contient une des fréquences propres du transformateur, elle excite la résonance et provoque des oscillations dans le transformateur [**85**].

Cette méthode s'appuie sur le principe suivant : à chaque fréquence, en mesurant le courant d'entrée I_e et la tension d'entrée Ve du transformateur, et en calculant le rapport I_e/V_e, on obtient l'évolution de son admittance d'entrée en fonction de la fréquence. Par la suite, l'utilisation des paramètres modaux de cette courbe (forme propre, fréquence propre et amortissement) permet d'obtenir le circuit équivalent, ainsi que les fréquences de résonance du transformateur [**85**].

Le transformateur est constitué de circuits oscillants simples R, L et C en parallèle (voir FIGURE 2.13) [**76**].

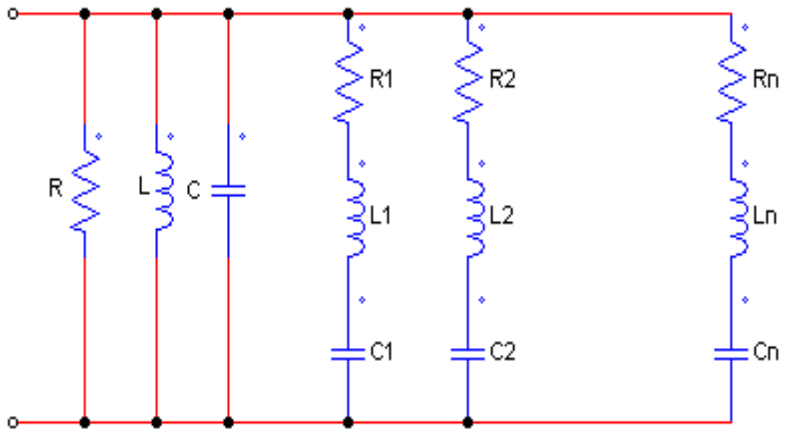


FIGURE 2.13 – Exemple de schéma équivalent modal [**76**].

Une analyse approfondie du comportement oscillatoire des transformateurs de puissance, à partir de l'analyse modale, souligne l'intérêt de cette approche [**93**]. De même, des modèles beaucoup plus modernes pour le calcul des tensions transmises [**85**], mettent en évidence leur utilité dans les études de réseaux : la modélisation par l'analyse modale permet d'une part de calculer les fréquences de résonance de manière précise, et d'autre part de fournir un schéma

équivalent adapté pour y intégrer la réaction sur le réseau d'un transformateur.

Différents circuits de transformateurs équivalents ont été obtenus grâce à l'analyse modale. Les fréquences à les utiliser sont souvent inférieures à 100kHz **[94]**. Des modèles plus précis pour le calcul des tensions transmises mettent en évidence l'intérêt de la méthode pour les études de réseaux avec des transformateurs.

Cependant, ce procédé présente un inconvénient important : pour l'appliquer, il est nécessaire d'avoir effectué des séries de mesures, ce qui entraîne une dépendance de la précision des résultats de ces dernières pour la fiabilité du modèle final.

2.5.10 Modèle basé sur les principes de dualité magnétique-électrique

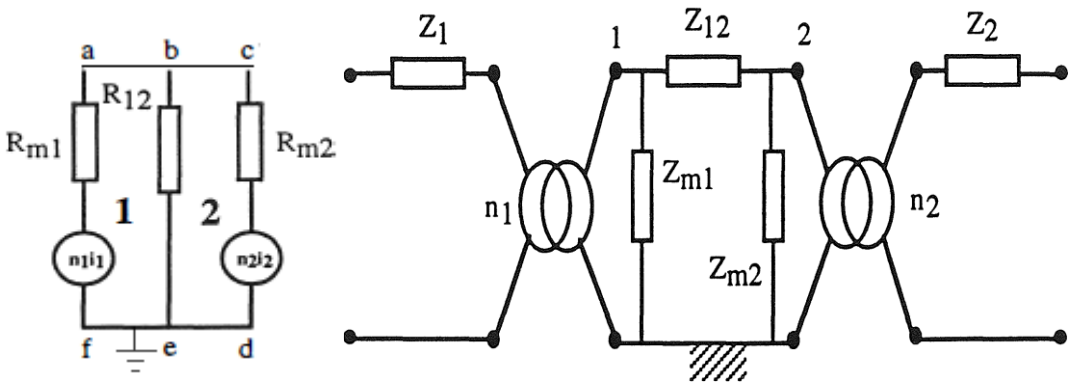
Le lien entre les deux modèles mentionnés précédemment est connu sous le nom de dualité magnétique-électrique (modèle RESEL utilisant des réluctances magnétiques et des sources commandées, et modèle EMTP utilisant des selfs et des transformateurs parfaits) [**85**].

Le modèle a pour principe de créer d'abord un schéma magnétique similaire à la structure du transformateur. Par la suite, on élabore un schéma électrique en se basant sur les règles de dualité présentées dans le tableau 2.l ci-dessous **[94]**.

Grandeurs magnétiques	**Grandeurs électriques**
Force magnétomotrice	Source de courant
Dérivée du flux	Tension
Réluctance	Inductance
Noeud magnétique	Noeud électrique
Maille magnétique	Maille électrique

TABLE 2.1– Règles de dualité magnétique-électrique **[94]**.

Le principe de dualité est appliqué à un transformateur monophasé dans la FIGURE 2.8. Les nœuds électriques sont respectivement créés par les mailles magnétiques (a-b-e-f-a) et (b-c-d-e-b) (FIGURE 2.14.a) (FIGURE 2.14.b). La maille magnétique externe (a-b-c-d-e-f-a) correspond à la double connexion du point de masse. Les transformateurs parfaits T1 et T2 sont les duaux des ampères tours n_1I_1 et n_2I_2.



(a) Schéma magnétique **(b) Schéma électrique**

FIGURE 2.14 – Dualité magnétique-électrique appliqué à un transformateur monophasé [**76**].

Ce modèle convient parfaitement pour évaluer les surtensions à une fréquence précise. Celui-ci permet de représenter de manière précise les pertes par courants de Foucault dans le circuit magnétique et les conducteurs.

Son principal avantage réside dans sa compatibilité avec le programme EMTP. Malheureusement, le comportement du transformateur ne peut pas être simulé avec des programmes de calcul de réseaux simples [**76**].

2.5.11 Modèle basé sur les inductances propres et mutuelles

On peut comparer l'enroulement soumis à une onde de choc à celui d'un système de condensateurs et d'inductances comme détaillé par Heller et Veverka [**80**]. Selon l'étude envisagée, Ces modèles mathématiques exploitent un système semblable de RLC (paramètres concentrés ou répartis). Les résultats obtenus sont plus ou moins coûteux et précis en fonction du niveau de perfection obtenu dans la représentation du bobinage et des méthodes de simulation numérique [**87**].

On peut discrétiser le transformateur en utilisant des spires, une galette ou un groupe de spires, que l'on nommera éléments ou spires équivalentes (FIGURE 2.15). Sur le plan inductif, chaque composant est représenté par sa propre inductance. Des inductances mutuelles relient toutes les autres inductances. Pour chaque élément, il existe des capacités de couplage et une capacité par rapport à la masse. On prend en considération les propriétés géométriques et diélectriques du bobinage, ainsi que les propriétés géométriques et magnétiques du noyau magnétique, pour calculer ces éléments. On peut également les déterminer expérimentalement [**85**].

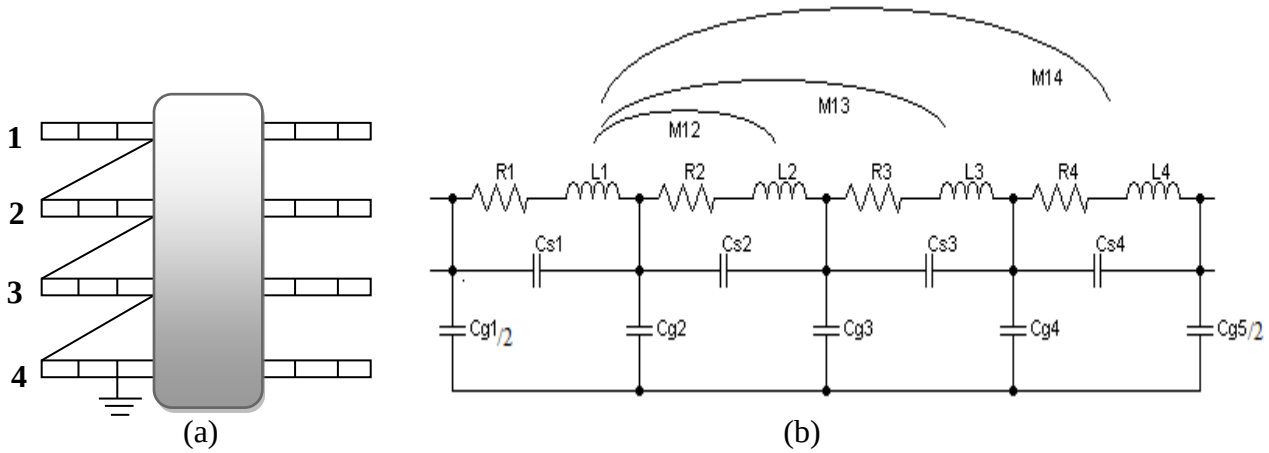


FIGURE 2.15 – Principe de la modélisation par inductances propres et mutuelles [**85**].

(a) Schéma simplifié d'un transformateur à enroulement à 4 galettes ;

(b) Schéma équivalent de la galette 1.

Les éléments sont calculés, quel que soit le type de représentation, selon les caractéristiques géométriques et diélectriques du bobinage, ainsi que les caractéristiques géométriques du noyau magnétique [**87**].

Ce modèle est le modèle le plus couramment utilisé et actuellement utilisé pour représenter un transformateur. Il y a un grand nombre de paramètres à calculer. Il est nécessaire de calculer n(n-1)/2 capacités, n(n+l)/2 inductances et n(n+l)/2 résistances pour n éléments. Les modifications du schéma varient en fonction de chaque cas, dont la mesure ou les calculs analytiques directs de la géométrie sont utilisés pour obtenir les paramètres [**87**].

L'avantage principal de ce modèle est qu'il peut être traité simplement comme un réseau R, L et C classique en utilisant la théorie des réseaux et les méthodes numériques qui y sont liées. Il est donc approprié pour une analyse fréquentielle systématique. En outre, il est idéal pour l'étude de la réponse temporelle à une excitation par une onde de choc à front raide.

Ce modèle est utilisé avec une fréquence élevée et sa validité est liée au niveau de raffinement approprié pour représenter les enroulements et le nombre de paramètres impliqués dans le calcul. Il est aussi adapté aux programmes EMTP et RESEL [**89**].

Les principaux inconvénients de ce modèle sont les suivants :

- Les bobines et les électrodes ont une forme spécifique, ce qui rend le calcul des paramètres plus complexe en raison de la présence du circuit magnétique, de la cuve et des écrans électrostatiques.
- Dès que l'intervalle de la fréquence s'élargie, le nombre de paramètres à calculer

augmente.

Théoriquement, ce modèle présente deux défauts : Il ne correspond pas à la représentation des phénomènes non linéaires et il est difficile de prendre en considération l'effet de peau dans les matériaux conducteurs, ce qui rend la matrice L dépendante de la fréquence [**89**].

Il est néanmoins possible de calculer la matrice L à chaque fréquence, puis d'utiliser la transformée de Fourier pour analyser les réponses transitoires du transformateur. Il est possible d'utiliser cette méthode pour évaluer avec précision les fréquences propres du transformateur [**76**].

L'analyse modale a été créée en utilisant une matrice mathématique particulière. L'objectif de cette méthode matricielle est de rendre la complexité d'un schéma équivalent discrétisé plus simple en rendant systématiquement sa représentation : c'est un modèle réciproque [**76**].

Il semble que cette approche soit encore peu courante : en effet, la théorie qui en résulte ne permet pas d'aborder le problème sous son aspect physique concret ; Il s'agirait plutôt de transformer les modélisations existantes en une représentation mathématique plus étendue mais moins pratique sur le plan physique.

2.5.12 Modèle basé sur les inductances de fuite

Comme nous l'avons vu plus haut, la présence du noyau magnétique, caractérisé par une grande perméabilité, accroît le couplage entre les bobinages. Ainsi, les valeurs des inductances propres peuvent être extrêmement similaires à celles des mutuelles. De plus, il a été constaté que l'évaluation précise de la matrice d'inductance ne garantit pas la validité des effets de fuite (inductances de fuite).

Les valeurs des inductances propres étant très proches de celles des mutuelles, le calcul des inductances de fuite à partir de ces dernières donnera des valeurs non précises. En outre, il arrive que le transformateur soit en court-circuit, et dans ce cas, ce sont les inductances de fuite qui ont un impact significatif. Il est donc nécessaire d'adopter une méthode (modèle) qui repose sur les inductances de fuite pour obtenir plus de précision.

Cette méthode a été développée par Blume et a été ensuite validée par de nombreux auteurs **[86,91]**. Brandwajn a développé sa généralisation pour les transformateurs triphasés. Par la suite, Dugan a employé la même méthode pour représenter un transformateur cuirassé. Les inductances de fuite des transformateurs (en charge ou en court-circuit) sont modérées de

manière assez précise par elle. Cependant, le noyau magnétique n'est pas pris en compte de manière adéquate, ce qui entraîne une différence entre les résultats obtenus expérimentalement et ceux obtenus par calcul [**86**].

2.6. Conclusion

Dans cette recherche bibliographique, nous avons présenté les différents modèles existants dans la littérature, qui représentent en haute fréquence le transformateur de puissance. Le modèle le plus adéquat pour notre travail est bien le modèle RLC basé sur les inductances propres et mutuelles, et donc retenu pour étudier le comportement des transformateurs de puissance en présence des décharges partielles.

Chapitre 3

Analyse FRA de la présence des décharges partielles dans un enroulement d'un transformateur de puissance

3.1. Introduction

L'effet des décharges partielles dans les enroulements du transformateur est un sujet important pour la fiabilité et la durée de vie du transformateur. Les décharges partielles peuvent causer des dommages progressifs aux enroulements, qui peuvent éventuellement entraîner une défaillance du transformateur. Par conséquent, il est crucial de comprendre l'effet des décharges partielles sur les enroulements du transformateur **[94]**.

Une des méthodes pour étudier l'effet des décharges partielles dans les enroulements du transformateur est l'analyse de la distribution de charge dans les enroulements **[94]**. Les décharges partielles produisent des charges électriques qui se répartissent dans les enroulements du transformateur, créant des gradients de potentiel électrique. Ces gradients peuvent entraîner des dégradations des isolants, des arcs électriques, des pertes d'énergie et des dommages thermiques dans les enroulements. L'analyse de la distribution de charge dans les enroulements peut aider à identifier les zones à risque et à prendre des mesures pour réduire les décharges partielles.

Une autre méthode pour étudier l'effet des décharges partielles dans les enroulements du transformateur est la mesure de la perte diélectrique **[95]**. Les décharges partielles produisent

des pertes diélectriques qui peuvent être mesurées pour évaluer l'état des enroulements. Des mesures régulières de la perte diélectrique peuvent aider à détecter les dommages causés par les décharges partielles et à planifier les réparations nécessaires.

Enfin, une troisième méthode pour étudier l'effet des décharges partielles dans les enroulements du transformateur est l'analyse de l'impédance de dispersion **[96]**. L'impédance de dispersion est une mesure de la réponse électrique des enroulements aux signaux à haute fréquence. Les décharges partielles produisent des signaux à haute fréquence qui peuvent être détectés et analysés à l'aide de l'impédance de dispersion. L'analyse de l'impédance de dispersion peut aider à détecter les dommages causés par les décharges partielles dans les enroulements du transformateur.

3.2. Modélisation de la décharge partielle

La modélisation d'une décharge partielle dans une cavité est un domaine important dans l'étude des décharges électriques et de leurs effets sur les équipements électriques. Les décharges partielles se produisent généralement dans des cavités ou des défauts présents dans l'isolation des équipements électriques haute tension, comme les transformateurs.

Pour modéliser une décharge partielle dans une cavité, il faut tout d'abord définir la géométrie de la cavité dans laquelle la décharge partielle se produira. Cela peut inclure des caractéristiques telles que la taille, la forme et la position de la cavité par rapport au matériau isolant environnant. Il est important aussi de définir les conditions de fonctionnement du système dans lequel la décharge partielle se produit, telles que la tension appliquée, la fréquence, la pression et la température [**95**]. Ces paramètres peuvent avoir une influence significative sur le comportement de la décharge partielle. La modélisation du champ électrique dans la cavité est aussi essentielle pour comprendre comment la décharge partielle se développe et évolue. Une fois que le modèle de la cavité et du champ électrique est établi, des simulations peuvent être effectuées pour étudier le comportement de la décharge partielle dans différentes conditions de fonctionnement. Cela peut aider à prédire les caractéristiques de la décharge, telles que sa forme d'onde, sa magnitude et sa localisation dans la cavité **[95]**.

De nombreux modèles de DP ont été suggérés par divers chercheurs. Le modèle capacitif proposé par Gemant et Philippoff en 1932 est le premier modèle, qui peut être considéré comme le plus simple **[96]**. La Figure 3.1 présente ce modèle.

- c : est la capacité du vide (la cavité) dans le solide.
- b : est la capacité du matériau d'isolation connecté à la cavité.

— a : est la capacité de l'isolation restante. Cette capacité correspond à la partie saine de l'isolant.

— V_a : la tension appliquée aux bornes du diélectrique.

— V_c : la tension aux bornes de la cavité.

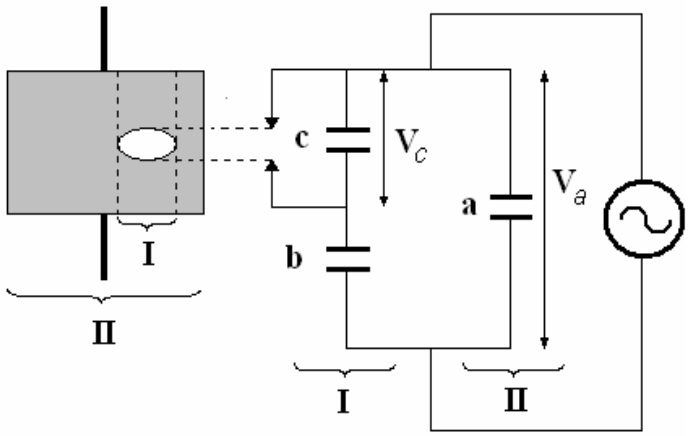


FIGURE 3.1 – Modèle classique des capacités équivalentes d'un diélectrique avec une cavité interne **[97]**.

En cas de non-claquage dans le condensateur c, si une tension alternative Va est appliquée sur le diélectrique, il y a une tension Vc0 à travers la cavité.

$$V_{c0} = \frac{b}{c+b} V_a \tag{3.1}$$

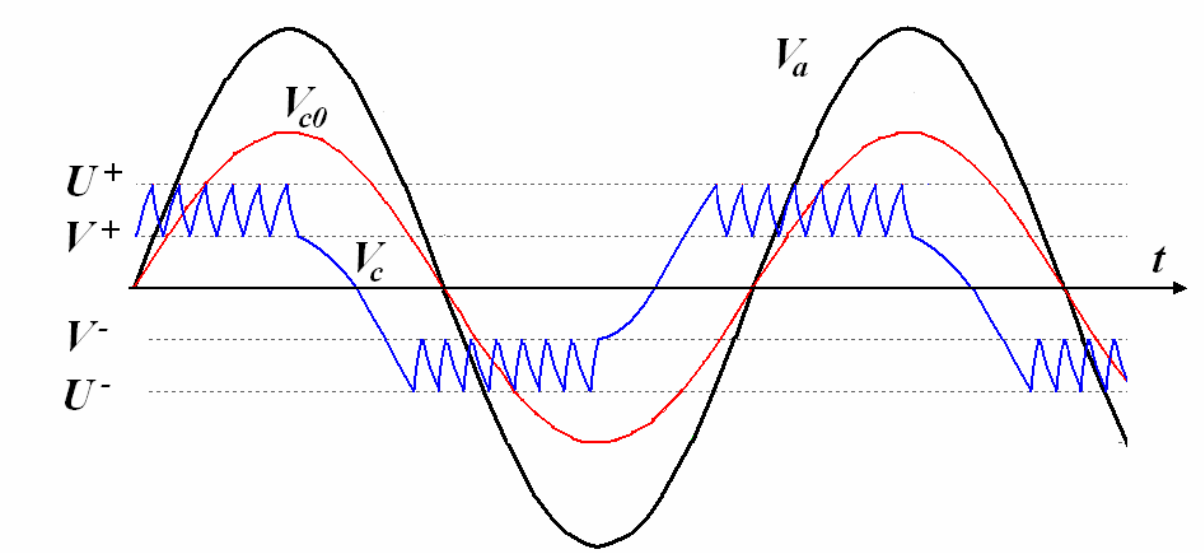


FIGURE 3.2 – Récurrence des DP dans une cavité **[97]**.

Une décharge partielle se produit lorsque la tension Vc dépasse une certaine valeur limite U+ (tension d'ignition). La décharge disparaît lorsque la valeur de Vc baisse à une valeur d'extinction V+. Il y a une chute de tension très rapide (environ nano-secondes) par rapport à la période de tension sinusoïdale appliquée (50Hz). Lorsque la valeur U+ est atteinte, la tension aux bornes de la cavité augmente à nouveau, ce qui provoque une nouvelle décharge. Ce processus continue jusqu'à ce que la tension appliquée Va cesse d'augmenter (phase φ = 90°). Le même phénomène se produit lors de l'alternance négative (arrêt des décharges à 270°), avec des seuils d'apparition et d'extinction de décharges à U- et V-. Les décharges dans la cavité produisent des impulsions de courant rapides (environ nanosecondes) dans l'échantillon et le circuit externe, comme le montre la FIGURE 3.2 [**97**].

3.3. Modélisation par inductances propres et mutuelles

Étant donné l'analyse bibliographique que nous avons effectuée, et pour garantir la continuité de notre travail, nous avons choisi le modèle basé sur les inductances propres et mutuelles.

Dans la plage de fréquence associée à la DP (décharge partielle), l'enroulement du transformateur fonctionne comme un réseau complexe en échelle composé d'une cascade d'inductances, de capacités et de résistances.

3.3.1. Présentation du schéma équivalent

Ce modèle peut représenter toutes les propriétés physiques des enroulements telles que les couplages magnétiques entre les enroulements et les disques, et le couplage électrique entre les enroulements et entre les spires, et entre l'enroulement et la terre par des inductances propres et mutuelles, des capacités en série entre les spires, et des capacités en dérivation entre l'enroulement et la terre respectivement (FIGURE 3.3).

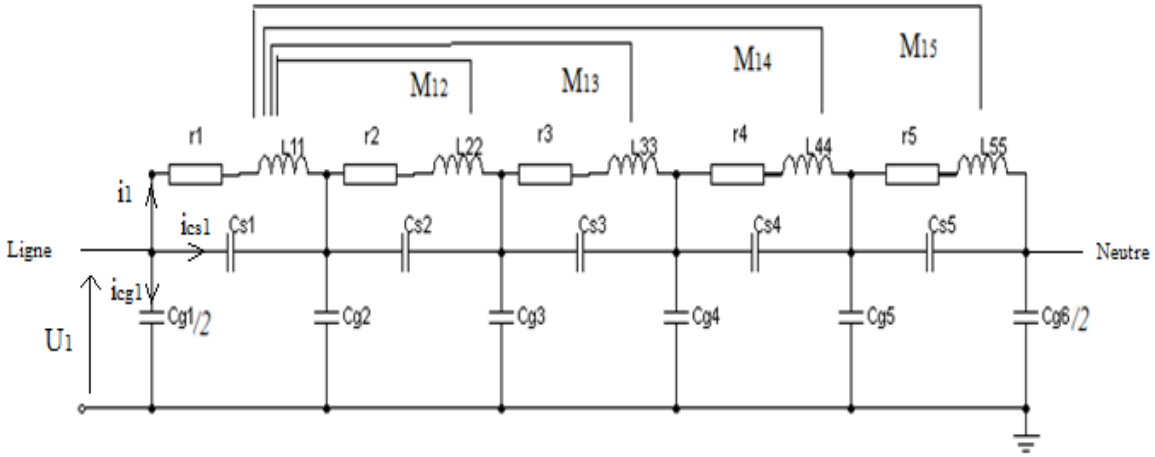


FIGURE 3.3 – Schéma équivalent de l'enroulement du transformateur.

Avec : L_{sn} inductance propre de la spire n, M_{in} les mutuelles, r_n résistance de la spire n C_{sn} shunt capacité, C_{gi} capacités à la terre.

Selon ce modèle, l'enroulement est modélisé en utilisant un nombre limité de cellules. Chacun de ces éléments est caractérisé par son propre inductance, sa résistance et sa capacité. Ces paramètres peuvent être déterminés en se basant sur les propriétés géométriques et diélectriques du bobinage.

3.3.2. Équations du schéma équivalent

En appliquant les lois de Kirchhoff au circuit équivalent, nous déterminerons les équations des courants et des tensions de l'enroulement, en le discrétisant en N éléments (N est le nombre de cellules).

3.3.2.1. Équations des tensions

En appliquant les lois de Kirchhoff au circuit équivalent, nous déterminerons les équations des courants et des tensions de l'enroulement, en le discrétisant en N éléments (N est le nombre de cellules).

L'équation suivante donne l'expression de la tension d'entrée :

$$U_e = U_{\max} \sin wt = r_g \times i_e \qquad (3.2)$$

Avec : - U_e et i_e : la tension et le courant appliqués à l'entrée de l'enroulement.

- r_g : la résistance interne du générateur.

Les équations de tension utilisées pour l'enroulement du transformateur, qui est divisé en 5

éléments, sont :

$$U_1 - U_2 - r_1 i_1 = L_{11}\frac{di_1}{dt} + M_{12}\frac{di_2}{dt} + M_{13}\frac{di_3}{dt} + M_{14}\frac{di_4}{dt} + M_{15}\frac{di_5}{dt} \quad (3.3)$$

$$U_2 - U_3 - r_2 i_2 = L_{22}\frac{di_2}{dt} + M_{21}\frac{di_1}{dt} + M_{23}\frac{di_3}{dt} + M_{24}\frac{di_4}{dt} + M_{25}\frac{di_5}{dt} \quad (3.4)$$

En généralisant sur tout l'enroulement on aura :

Pour $1 \leq k \leq n$:

$$U_k - U_{k+1} - r_k i_k = L_{kk}\frac{di_k}{dt} + \sum_{m=1}^{k} M_{km}\frac{di_m}{dt} \quad (3.5)$$

Avec $m \neq k$

3.3.2.2. Équations des courants

L'équation suivante représente le courant à l'entrée du transformateur, au nœud (1) :

$$i_e = i_1 + i_{ics1} + i_{cg1/2} \quad (3.6)$$

$$i_e - i_1 = i_{ics1} + i_{cg1/2} \quad (3.7)$$

Avec :

$$i_{cs1} = C_{s1}\frac{d(v_1 - v_2)}{dt} \quad (3.8)$$

$$i_{cg1/2} = C_{g1/2}\frac{dv_1}{dt} \quad (3.9)$$

En remplaçant (3.8) et (3.9) dans (3.7), nous obtiendrons :

$$i_e - i_1 = C_{s1}\frac{d(v_1 - v_2)}{dt} + C_{g1/2}\frac{dv_1}{dt} = (C_{s1} + C_{g1/2})\frac{dv_1}{dt} - C_{s1}\frac{dv_2}{dt} \quad (3.10)$$

L'équation des courants au nœud 2 est comme suit :

$$i_1 - i_2 = C_{S2}\frac{dv_2}{dt} - C_{S1}\frac{dv_1}{dt} + C_{S1}\frac{dv_2}{dt} - C_{S2}\frac{dv_3}{dt} + C_{g2}\frac{dv_2}{dt} \quad (3.11)$$

Et comme :

$$C_{S1} = C_{S2} = ... = C_{S5} = C_S \quad (3.12)$$

$$C_{g1} = C_{g2} = ...= C_{g5} = C_g \quad (3.13)$$

On aura :

$$i_1 - i_2 = -C_S\frac{dv_1}{dt} + (2C_S + C_g)\frac{dv_2}{dt} - C_S\frac{dv_3}{dt} \quad (3.14)$$

Pour $0 \leq k \leq n-1$

$$i_k - i_{k+1} = -C_S\frac{du_k}{dt} + \left(2C_S + C_g\right)\frac{du_{k+1}}{dt} - C_S\frac{du_{k+2}}{dt} \quad (3.15)$$

3.3.2.3. Équations du modèle représentées sous forme de matrice

Après avoir établi les équations qui régissent le schéma équivalent du transformateur, et après avoir intégré les équations (3.5) et (3.15), on obtient :

— Pour les tensions : $\int_0^t (U_k - U_{k+1})dt = \int_0^t L_{kk} di_k + \int_0^t \sum_{m=1}^{k} M_{km} di_m + \int_0^t r_k i_k dt$ (3.16)

— Pour les courants : $\int_0^t (i_k - i_{k+1})dt = -\int_0^t C_S du_k + \int_0^t (2C_S + C_g)du_{k+1} - \int_0^t C_S du_{k+2}$ (3.17)

Les deux équations obtenues peuvent être présentées de la manière suivante sous forme condensée :

$$\begin{cases} U = C^{-1}\int_0^t \Delta I dt \\ I = L^{-1}\int_0^t (\Delta U - RI)dt \end{cases} \quad (3.18)$$

Donc : $$\begin{cases} \Delta I = (I_k - I_{k+1}) \\ \Delta U = (U_k - U_{k+1}) \end{cases} \quad (3.19)$$

Les tensions et les courants sont représentés par les paramètres U et I, qui sont illustrés de la manière suivante :

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ \dots \\ U_n \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Les trois matrices de capacité, d'inductance et de résistance de ce modèle sont [C], [L] et [R], et sont présentées de la manière suivante :

$$[C] = \begin{bmatrix} C_S + C_{g1}/2 & -C_S & \Lambda & \Lambda & 0 \\ -C_S & 2C_S + C_{g2} & \Lambda & \Lambda & 0 \\ \text{M} & \text{M} & \text{M} & \text{M} & \text{M} \\ \text{M} & \text{M} & \text{M} & \text{M} & \text{M} \\ 0 & 0 & \Lambda & \Lambda & 2C_S + C_{gn} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$[L]=\begin{bmatrix} L_{11} & M_{12} & \Lambda & \Lambda & M_{1n} \\ M_{21} & L_{22} & \Lambda & \Lambda & M_{2n} \\ M_{31} & M_{32} & \Lambda & \Lambda & M_{3n} \\ \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} \\ M_{1n} & M_{2n} & \Lambda & \Lambda & L_{nn} \end{bmatrix} \tag{3.22}$$

Les inductances propres de la matrice L sont les éléments diagonaux, tandis que les inductances mutuelles sont les éléments non diagonaux.

$$[R]=\begin{bmatrix} r & 0 & \Lambda & \Lambda & 0 \\ 0 & r & \Lambda & \Lambda & 0 \\ \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} \\ \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{M} \\ 0 & 0 & \Lambda & \Lambda & r \end{bmatrix} \tag{3.23}$$

3.4. Calcul des paramètres du schéma équivalent

Pour un enroulement sain, les paramètres tels que la capacité série, la capacité avec la terre et les inductances propres et mutuelles sont identifiés en utilisant la méthode d'optimisation par essaim de particules (PSO).

L'enroulement étudié est divisé en cinq disques, chacun contenant 30 spires sur trois couches, avec une hauteur totale de 500mm et un diamètre de 220mm. Chaque disque a une hauteur de 56mm [**110**].

L'enroulement testé présente les caractéristiques suivantes :

- Un total de 500 mm de hauteur ;
- Une section de cuivre de 10 mm^2 ;
- Un diamètre intérieur et extérieur de 200 mm et 220 mm respectivement ;
- 05 disques avec 30 spires chacun.

$$Z(S) = R_{dc} + SL_{eq} \tag{3.24}$$

L_{eq} et R_{dc} sont les valeurs équivalentes de l'inductance et de la résistance de l'enroulement mesurées.

Les mesures réalisées sur l'enroulement sont indiquées de la manière suivante :

L_{eq}=1,55 mH ;

C_{geff}= 60 pF ;

R_{dc}= 0.25 Ω.

3.4.1. Identification des éléments du circuit équivalent de l'enroulement

La résistance totale de l'enroulement est mesurée afin de déterminer la résistance de chaque cellule du modèle. Elle est exprimée par l'équation ci-dessous.

$$r = \frac{R_{dc}}{n} \tag{3.25}$$

Le modèle du circuit équivalent de l'enroulement du transformateur inclut les capacités parallèles et les capacités reliées à la masse (CS, Cg), ainsi que les inductances propres et mutuelles (Lnn, Min).

Les contraintes suivantes doivent être respectées par les éléments inductifs du modèle équivalent afin d'obtenir une inductance équivalente totale proche ou égale à l'inductance mesurée :

$$0.4L_{nn} \langle m_1 \langle 0.8L_{nn} \tag{3.26}$$

$$0.4m_{i-1} \langle m_i \langle m_{i-1} \quad \forall i = 2,.....n-1 \tag{3.27}$$

La capacité en parallèle et la capacité relié à la masse sont données par:

$$C_S = \frac{n \times C_{geff}}{\alpha^2} \tag{3.28}$$

α : la constante de distribution est une quantité reliée au modèle de l'enroulement.

$$C_g = \frac{C_{geff}}{n} \tag{3.29}$$

La capacité équivalente de l'enroulement et donné par l'équation :

$$C_{eq} = \frac{C_g}{2} + \frac{1}{\frac{1}{C_S} + \frac{1}{Cg + \frac{1}{\frac{1}{C_S} + ...}}} \tag{3.30}$$

La figure suivante illustre l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement étudié.

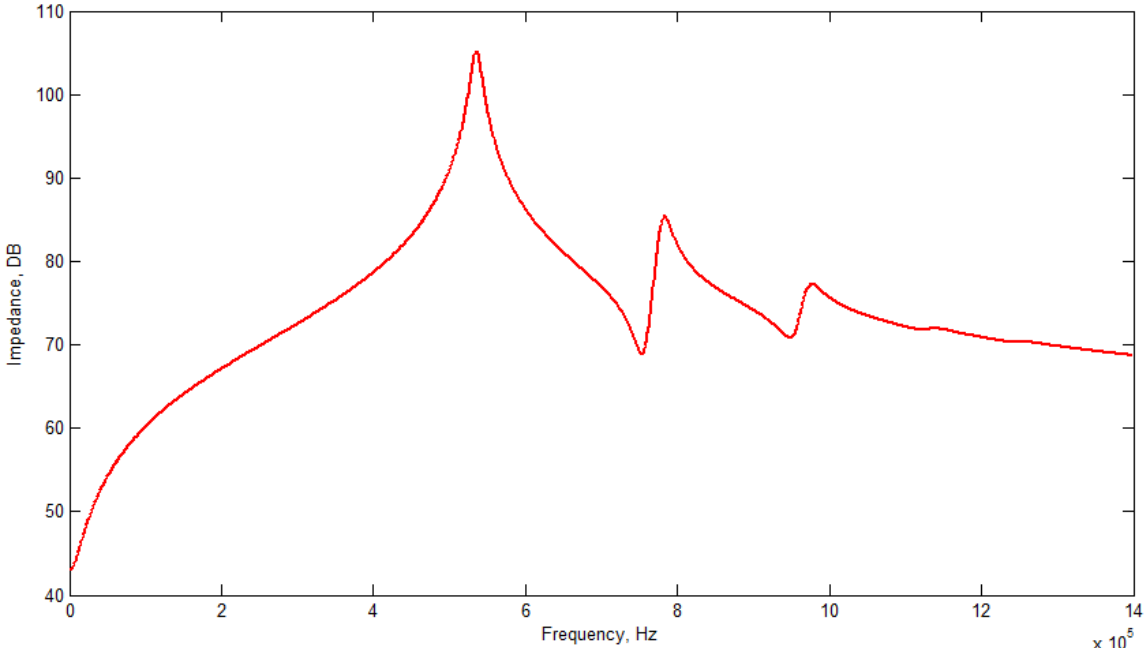


FIGURE 3.4 – Impédance de l'enroulement en fonction de la fréquence.

3.4.2. Optimisation par essaim de particules

L'optimisation par essaim de particules (OEP), aussi appelée PSO en anglais (Particle Swarm Optimization), est un algorithme évolutif qui utilise différentes solutions possibles pour trouver une solution optimale au problème. Cet algorithme a été introduit en 1995 par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) [**98**]. Sa source d'inspiration est l'univers vivant, plus précisément le comportement social des animaux en essaim, tels que les bancs de poissons et les vols groupés d'oiseaux. Effectivement, ces animaux ont des mouvements de déplacement assez complexes, tandis que chacun d'eux a une « intelligence » très faible et ne connais dans l'essaim que des connaissances locales de sa nature [**99**].

3.4.2.1. Principe général

Le PSO fait appel à plusieurs particules qui forment un essaim. Toutes les particules traversent l'espace de recherche en quête de l'optimum global (minimum ou maximum). Les particules volent dans un espace de recherche multidimensionnel dans un système PSO. Chaque particule, durant le vol, ajuste sa position selon sa propre expérience et l'expérience des particules voisines, en se basant sur la position la plus favorable rencontrée par elle-même et ses voisins. La direction d'essaim d'une particule est déterminée par l'ensemble des particules voisines de la particule et son expérience antérieure [**98**].

Les trois éléments suivants influencent le mouvement d'une particule :

- Un élément d'inertie : la particule tend à suivre sa trajectoire de déplacement habituelle.
- Un élément cognitiviste : la particule a tendance à se diriger vers le meilleur point par lequel elle est déjà passée.
- Un élément social : la particule peut se référer à l'expérience de ses pairs et donc se diriger vers le meilleur endroit déjà atteint par ses voisins.

La figure ci-dessous illustre la manière dont une particule se déplace [**100**] :

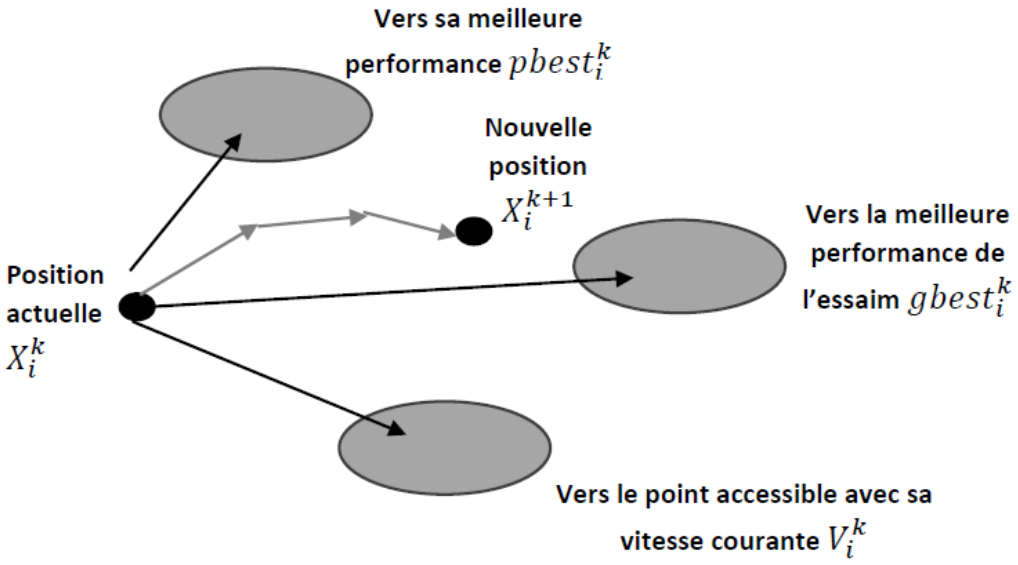


FIGURE 3.5 –Mouvement de chaque particule [**100**].

3.4.2.2. Algorithme de PSO:

Dans la méthode PSO, on évalue le déplacement de chaque particule dans la population en se basant sur sa position (coordonnée de la particule x) et sa vitesse (vitesse de parcours v). Au cours du mouvement, la vitesse de la particule est évoluée dans le temps et sa position sera donc mise à jour en conséquence. Lorsqu'on applique un problème d'optimisation à n dimensions, les vecteurs de position et de vitesse de la particule Pr sont représentés respectivement par **[99]**:

$$x_{pr} = \lfloor x_{1pr}, x_{2pr} \text{ K K } x_{npr} \rfloor \text{ et } v_{pr} = \lfloor v_{pr}, v_{2pr}, \text{K K } v_{npr} \rfloor \tag{3.31}$$

Le meilleur emplacement précédent de la particule Pr repose sur l'évaluation de la fonction de fitness représentée par :

$$pbest_{pr} = \lfloor p_{1pr}, p_{2pr} \text{K K}, p_{npr} \rfloor \tag{3.32}$$

C'est la particule la plus performante de toutes les particules représentées par gbest. On peut calculer la vitesse et la position modifiées de chaque particule selon la formule suivante :

$$V_i^{k+1} = C_0 V_i^k + C_1 \times rand_1 \times \left(p_{best_i}^{\ k} - X_i^k\right) + C_2 \times rand_2 \times \left(gbest_i^k - X_i^k\right) \tag{3.33}$$

Avec :

C_0 : Coefficient d'inertie.

C_1, C_2 : Coefficient d'accélération.

$rand$: Nombre aléatoire entre 0 et 1.

${}_i V_i^k$: La vitesse de la particule à l'itération k.

${}_i X_i^k$: La position de la particule à la l'itération k.

$p_{best_i}^{\ k}$: La meilleure position de la particule i jusqu'à l'itération k.

$gbest_i^k$: La meilleure position de l'essaim jusqu'à l'itération k.

x_{pr} : Vecteur de position de la particule.

v_{pr} : Vecteur de vitesse de la particule.

$pbest_{pr}$: La meilleure particule parmi toutes les particules.

La vitesse modifiée de chaque particule est ajoutée à la nouvelle position en utilisant l'équation suivante **[99]**:

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \tag{3.34}$$

Avec : X_i^{k+1} : La nouvelle position de la particule.

Le coefficient d'inertie C_0 diminue généralement de max C_1 à min C_2, comme indiqué dans l'équation suivante :

$$C_0 = C_{\max} - \frac{C_{\max} - C_{\min}}{iter_{\max}} \times iter \tag{3.35}$$

Avec : $iter$: Le nombre des itérations actuel.

$iter_{\max}$: Le nombre maximal des itérations.

3.4.2.3. Etapes de la méthode PSO

On peut décrire l'algorithme de cette méthode de la manière suivante [**99**] :

- **Première étape :** Initialisation des coefficients C_1 et C_2, ainsi que du coefficient d'inertie C_0.
- **Deuxième étape :** La population initiale est générée de façon aléatoire (les positions et les vitesses des particules sont aléatoirement initiés) et le calcul de la fitness de chaque particule Pbest et gbest.
- **Troisième étape :** Calcul de la nouvelle vitesse et position de chaque particule.
- **Quatrième étape :** Calcul et comparaison de la meilleure fitness de la population actuelle par rapport à la précédente pour déterminer la meilleure de toutes les populations (gbesti).
- **Cinquième étape :** Incrémentation du nombre d'itération $k = k + 1$.
- **Sixième étape :** Après avoir rempli un critère d'arrêt, on passe à la septième étape. Autrement, retrouver la troisième étape.
- **Septième étape :** La solution la plus optimale est la position enregistrée dans ($gbest_i$).

3.4.3. Identification des paramètres de l'enroulement par la méthode PSO

Le développement de la version standard de la méthode d'optimisation par essaims de particules (PSO) a été très enrichissant. . La sélection des paramètres joue un rôle essentiel dans la réussite de l'algorithme [**101**]. Plusieurs études ont été réalisées afin d'améliorer la convergence de la méthode PSO, notamment en optimisant le poids d'inertie, le facteur de constriction et le coefficient d'accélération.

Dans cette situation, la méthode de PSO sera employée pour évaluer les paramètres du modèle de l'enroulement du transformateur à haute fréquence. La FIGURE 3.6 présente le schéma de la méthode proposée.

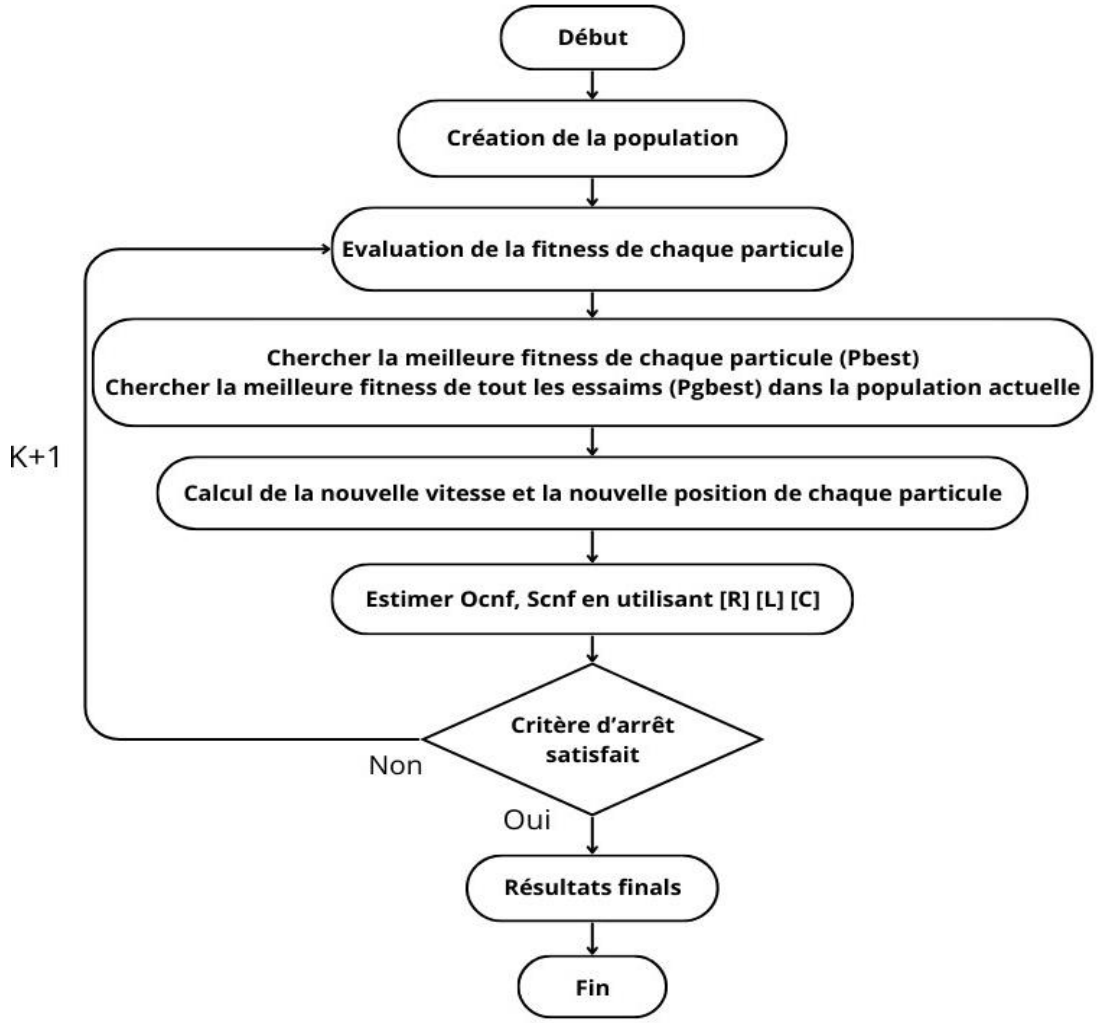


FIGURE 3.6 – Organigramme de la méthode PSO [**101**].

3.4.3.1. Identification des paramètres de l'enroulement étudié

L'organigramme (FIGURE 3.6) est utilisé pour exécuter l'algorithme interprété afin d'identifier les paramètres de l'enroulement étudié.

Une fois que PSO est exécuté, on estime les paramètres du circuit équivalent de l'enroulement. Le tableau ci-dessous résume les résultats finaux.

L_S (mH)	M_1 (mH)	M_2 (mH)	M_3 (mH)	M_4 (mH)
0.18213	0.61286	0.022	0.00794	0.00193

TABLE 3.1–Inductance propre et inductances mutuelles obtenues par PSO.

La FIGURE (3.7) présente l'évolution de l'impédance en fonction de la fréquence du schéma de référence calculé obtenu par la méthode PSO.

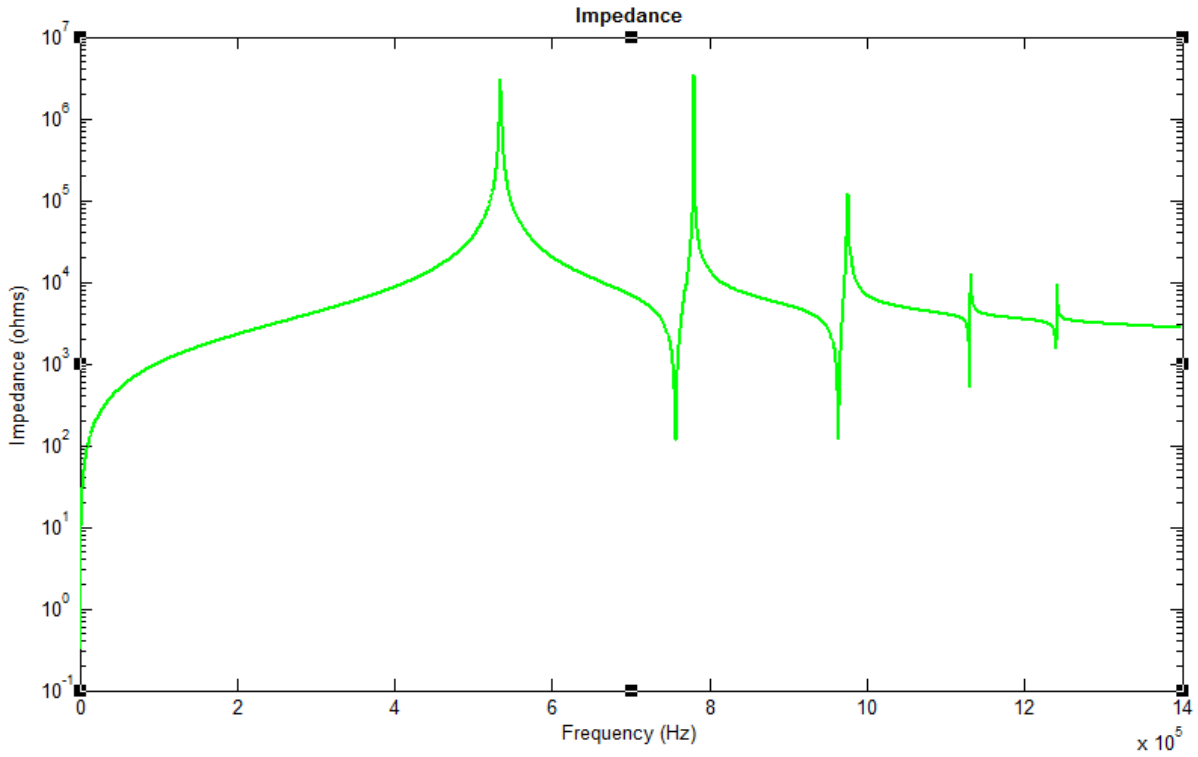


FIGURE 3.7 – Variation de l'impédance en fonction de la fréquence obtenue par PSO.

3.4.3.2. Comparaison des paramètres de l'enroulement étudié mesurées et estimées

Le tableau 3.2 présente les fréquences mesurées et estimées, ainsi que l'écart entre elles. Selon ces résultats, nous confirmons l'efficacité de l'algorithme PSO dans cette situation d'analyse.

Les Valeurs mesurées		**Les Valeurs estimées en utilisant PSO**		**Erreur %**
Ocnf (kHz)	**Scnf (kHz)**	**Ocnf (kHz)**	**Scnf (kHz)**	
536	756	534	757	≤ 1%
779	958	780	963	
970	1127	976	1130	
1129	1246	1132	1239	
1247	/	1241	/	
Leq=1.55mH		Leq=1.5686mH		1.2%

TABLE 3.2– Les mesures et les estimations des fréquences et de l'inductance.

Selon les comparaisons réalisées, il est observé que l'erreur n'excède pas 1 % par rapport à la mesure. Ce qui confirme l'utilisation du modèle.

La figure suivante illustre la comparaison des allures des impédances mesurée et estimée en fonction de la fréquence.

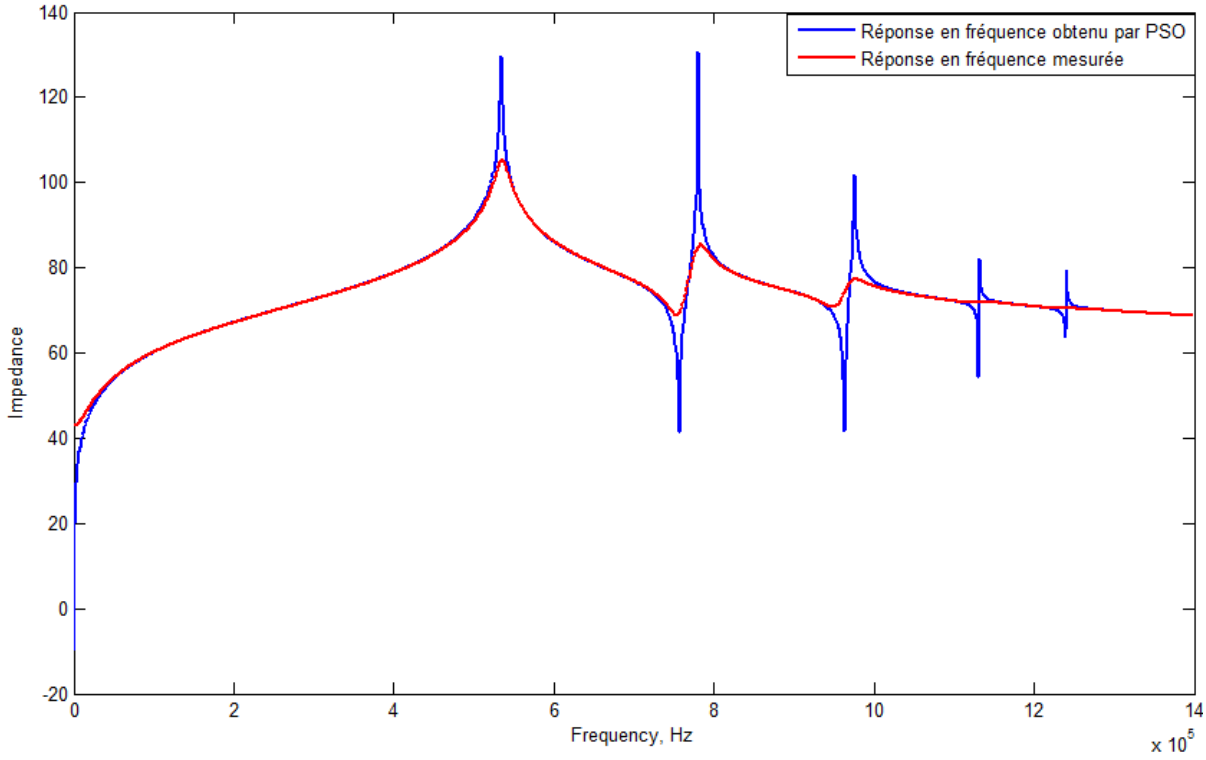


FIGURE 3.8 – Comparaison entre l'estimation et la mesure de l'impédance en fonction de la fréquence.

L'utilisation de l'algorithme PSO a permis d'obtenir des résultats qui montrent que l'écart entre les valeurs mesurées et estimées est d'ordre de1%.

Le choix adéquat des paramètres est crucial pour assurer la convergence de l'algorithme. La méthode PSO, basée sur l'initialisation aléatoire, a considérablement simplifié le traitement des données. D'après la figure et le tableau, il est possible de constater que les paramètres identifiés par la méthode PSO sont très similaires à ceux de référence.

3.5. Défauts de décharge partielle dans l'enroulement

La présence d'un tel défaut dans l'enroulement du transformateur de puissance entraîne une variation de sa réponse en fréquence, et par conséquent une variation des éléments du circuit équivalent, comme le montre la figure suivante :

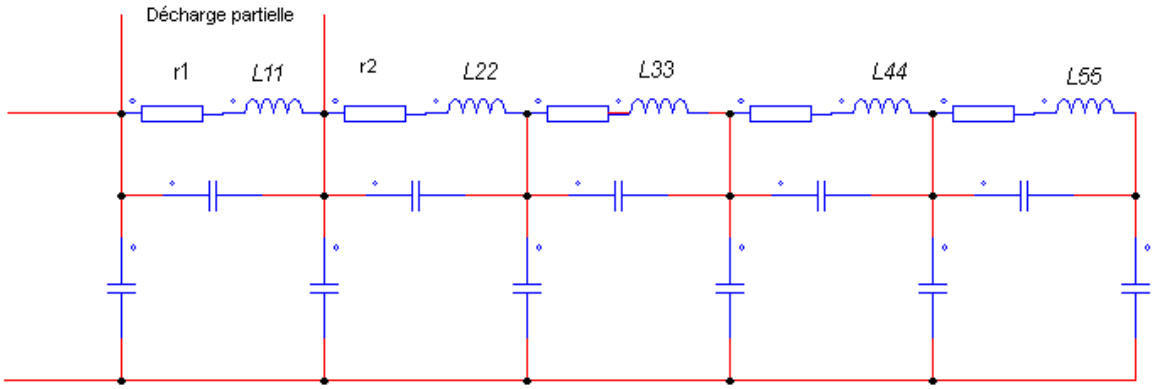


FIGURE 3.9 – Schéma équivalent du bobinage avec décharge partielle dans la première cellule.

Afin de localiser le point défaut de décharge partielle, nous avons effectué une simulation de son déplacement dans les différentes cellules du bobinage [**111**].

3.5.1. Décharge partielle dans la 1ère cellule

La figure suivante illustre comment l'impédance varie en fonction de la fréquence lorsque la première cellule est injectée avec une décharge partielle.

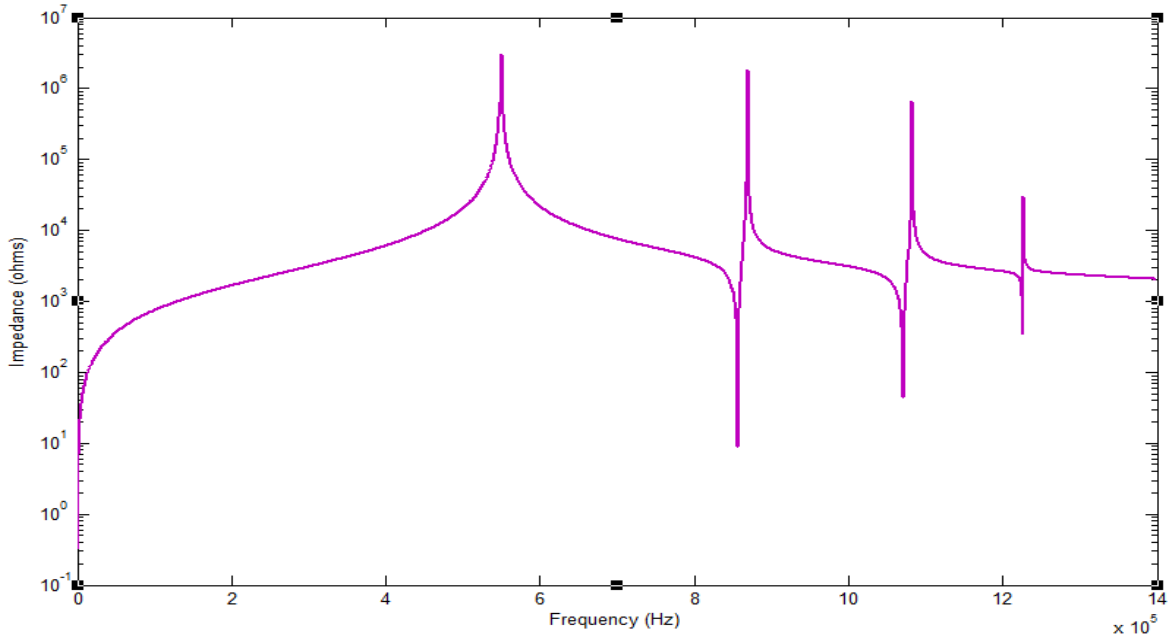


FIGURE 3.10 – Variation de l'impédance en fonction de la fréquence avec présence d'une DP dans le 1ier disque de l'enroulement.

Les fréquences de l'enroulement sain et celles avec décharge partielle sont montrées dans le tableau 3.3, ainsi que l'écart observé entre ces grandeurs.

Enroulement sain		**Enroulement avec décharge**		**Décalage**	
Ocnf (KHz)	Scnf(KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf(KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf(KHz)
534	757	550	856	16	99
780	963	869	1071	89	108
976	1130	1082	1226	106	96
1132	1239	1227	/	95	/
1241	/	/	/	/	/

TABLE 3.3– Tableau comparatif de la réponse en fréquence entre un enroulement avec décharge partielle dans la première cellule et un enroulement sain.

En comparant l'allure de l'impédance d'un enroulement sain à celle d'un enroulement en défaut de décharge partielle dans la première cellule, nous constatons un écart entre les fréquences (Ocnf) et (Scnf) d'environ 16 k Hz -100 k Hz respectivement.

En appliquant un défaut, les fréquences de coupures au niveau de la dernière cellule disparaissent également, ce qui est observé dans le cas d'un enroulement sain.

3.5.2. Décharge partielle dans la 2ème cellule

La figure suivante montre comment l'impédance varie en fonction de la fréquence de l'enroulement avec une décharge partielle injectée dans la deuxième cellule par une décharge partielle.

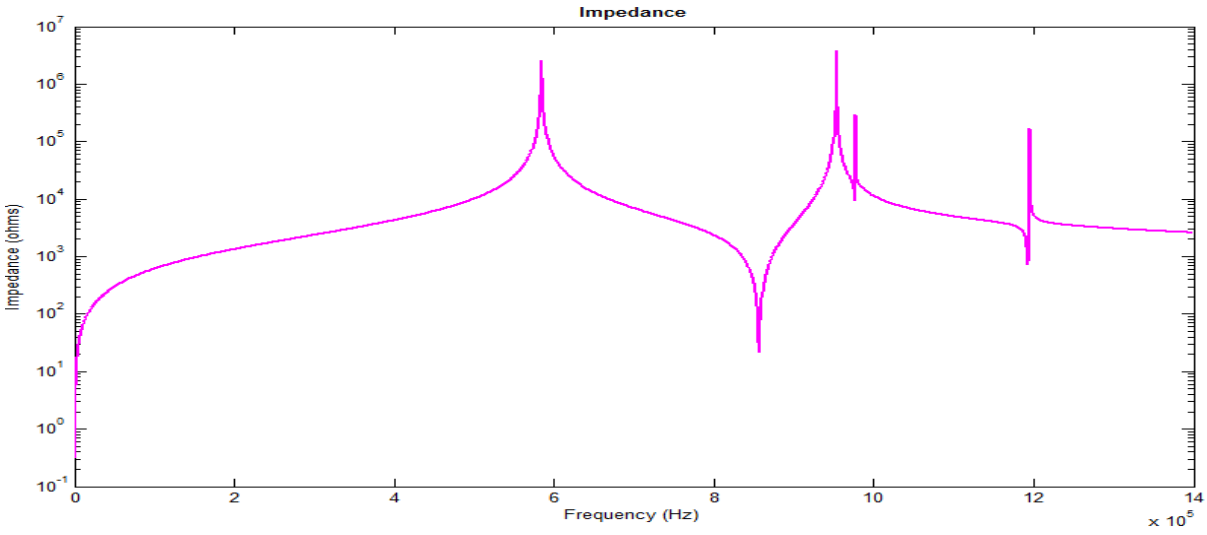


FIGURE 3.11 – Variation de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement en

présence d'une DP dans la 2ème cellule.

Les fréquences de l'enroulement sain et celles avec DP sont montrées dans le tableau 3.4, ainsi que l'écart observé entre ces deux grandeurs.

Enroulement sain		**Enroulement avec décharge**		**Décalage**	
Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)
534	757	584	857	50	100
780	963	953	976	173	13
976	1130	977	1192	1	62
1132	1239	1195	/	63	/
1241	/	/	/	/	/

TABLE 3.4– Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un DP partielle entre la 2ème cellule et un enroulement sain.

En comparant les empreintes d'impédance d'un enroulement sain avec celles d'un enroulement qui présente un défaut de décharge partielle dans la deuxième cellule, nous avons constaté un écart entre les fréquences (Ocnf) et (Scnf) d'environ 13KHz-60KHz respectivement.

Les fréquences de coupures au niveau de la dernière cellule disparaissent également lors de l'application de défaut, ce qui est observé dans le cas d'un enroulement sain.

3.5.3. Décharge partielle dans la 3ème cellule

La FIGURE 3.12 montre comment l'impédance varie en fonction de la fréquence du schéma de référence avec une décharge partielle injectée dans la troisième cellule.

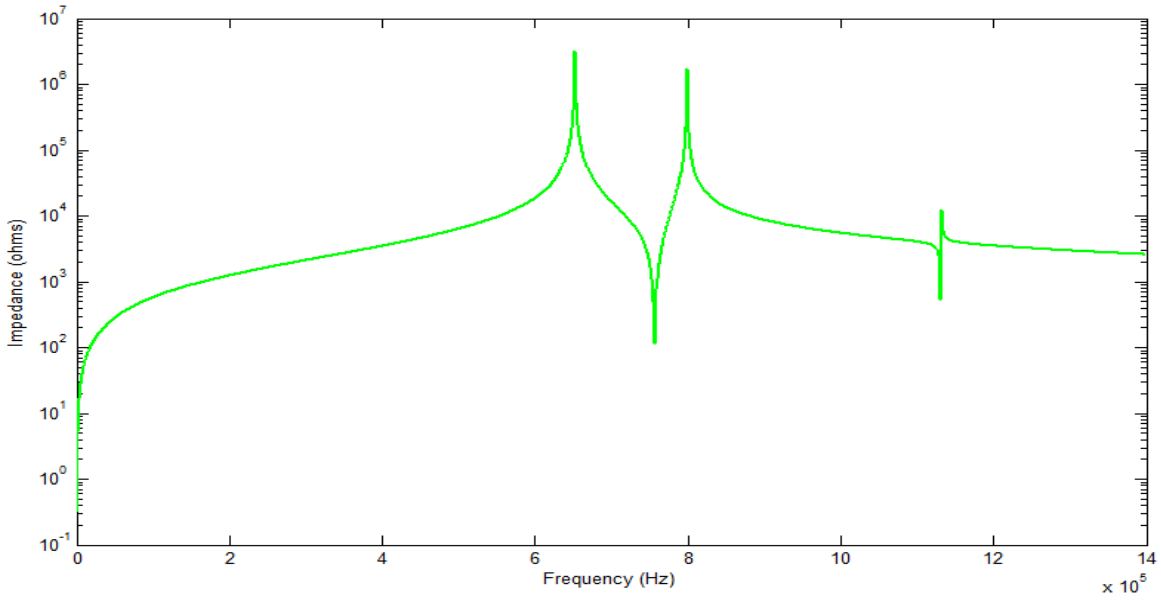


FIGURE 3.12 – Variation de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement en présence d'une DP dans la 3ème cellule.

Les fréquences de l'enroulement sain et celles avec décharge partielle sont présentées dans le tableau 3.5, de même pour la différence enregistré entre ces deux grandeurs.

Enroulement sain		**Enroulement avec décharge**		**Décalage**	
Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)
534	757	650	757	116	0
780	963	799	1130	19	167
976	1130	1132	/	156	/
1132	1239	/	/	/	/
1241	/	/	/	/	/

TABLE 3.5– Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un DP partielle entre la 3ème cellule et un enroulement sain.

Dans la troisième cellule, nous avons observé une différence entre l'empreinte d'impédance d'un enroulement sain et celle d'un enroulement avec un défaut de DP, avec des écarts de fréquences (Ocnf) et (Scnf) d'environ 20 KHz-150 KHz respectivement.

Une fois le défaut appliqué, les fréquences de coupures sont également absentes au niveau des deux dernières cellules observées lors d'un enroulement normal.

3.5.4. Décharge partielle dans la 4ème cellule

L'impédance varie en fonction de la fréquence du schéma de référence avec une décharge partielle injectée dans la quatrième cellule, comme le montre la FIGURE 3.13.

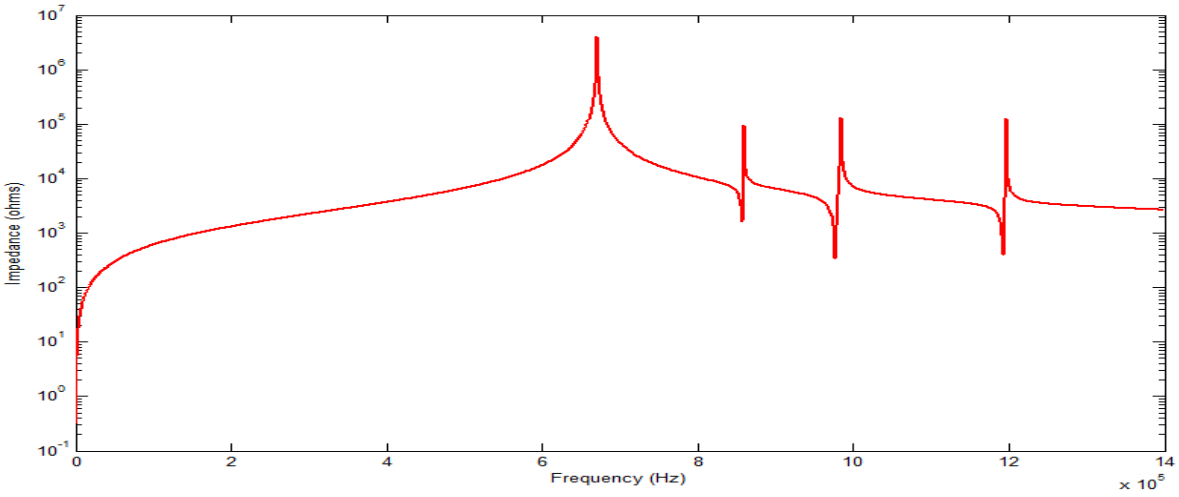


FIGURE 3.13 – Variation de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement en présence d'une DP dans la 4ème cellule.

La différence enregistrée entre ces deux grandeurs est présenté dans le tableau III.6, qui présente les fréquences de l'enroulement sain et celle avec décharge partielle.

Enroulement sain		**Enroulement avec décharge**		**Décalage**	
Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)
534	757	670	856	136	99
780	963	859	976	80	13
976	1130	984	1193	8	63
1132	1239	1197	/	65	/
1241	/	/	/	/	/

TABLE 3.6– Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un DP partielle entre la 4ème cellule et un enroulement sain.

Par comparaison de l'impédance d'un enroulement sain et d'un enroulement présentant un défaut de décharge partielle dans la quatrième cellule, nous avons constaté un écart entre les fréquences (Ocnf) et (Scnf) d'environ 8 khz -60 khz respectivement.

Les fréquences de coupures au niveau de la dernière cellule disparaissent également lors de l'application de défaut, ce qui est observé dans le cas d'un enroulement sain.

3.5.5. Décharge partielle dans la 5ème cellule

La FIGURE 3.14 montre comment l'impédance varie en fonction de la fréquence de l'enroulement avec une décharge partielle injectée dans la cinquième cellule.

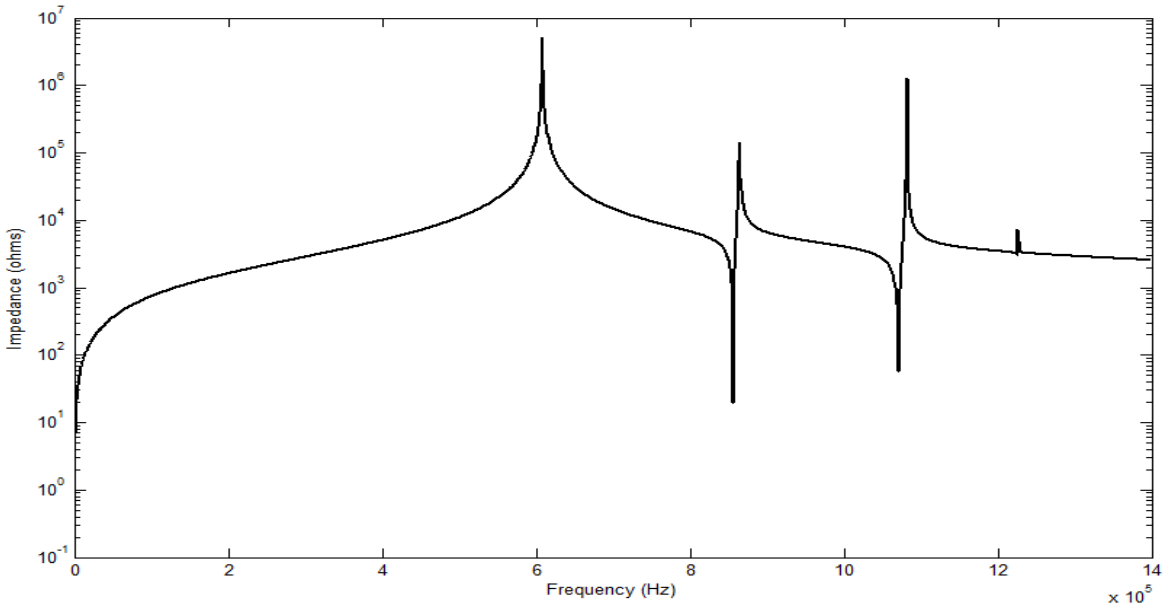


FIGURE 3.14 – Variation de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement en présence d'une DP dans la 5ème cellule.

Les fréquences de l'enroulement sain et de l'enroulement avec une décharge partielle dans la 5ème cellule sont représentées dans le tableau 3.7, ainsi que l'écart observé entre ces deux résultats.

Enroulement sain		Enroulement avec décharge		Décalage	
Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)
534	757	608	856	74	99
780	963	865	1071	85	108
976	1130	1082	1225	106	95
1132	1239	1226	/	94	/
1241	/	/	/	/	/

TABLE 3.7– Tableau comparatif de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un DP partielle entre la 5ème cellule et un enroulement sain.

En comparant les empreintes d'impédance d'un enroulement sain à celles d'un enroulement présentant un défaut de DP dans la cinquième cellule, nous avons constaté un écart entre les

fréquences (Ocnf) et (Scnf) d'environ 70khz -150khz respectivement.

L'application de défaut entraîne également la disparition des fréquences de coupures au niveau des deux dernières cellules, ce qui n'est pas observé dans le cas d'un enroulement sain.

3.5.6. Comparaison entre les défauts de décharge partielle et un enroulement sain

Les impédances pour chaque point de décharge partielle dans l'enroulement sont illustrées dans la figure ci-dessous.

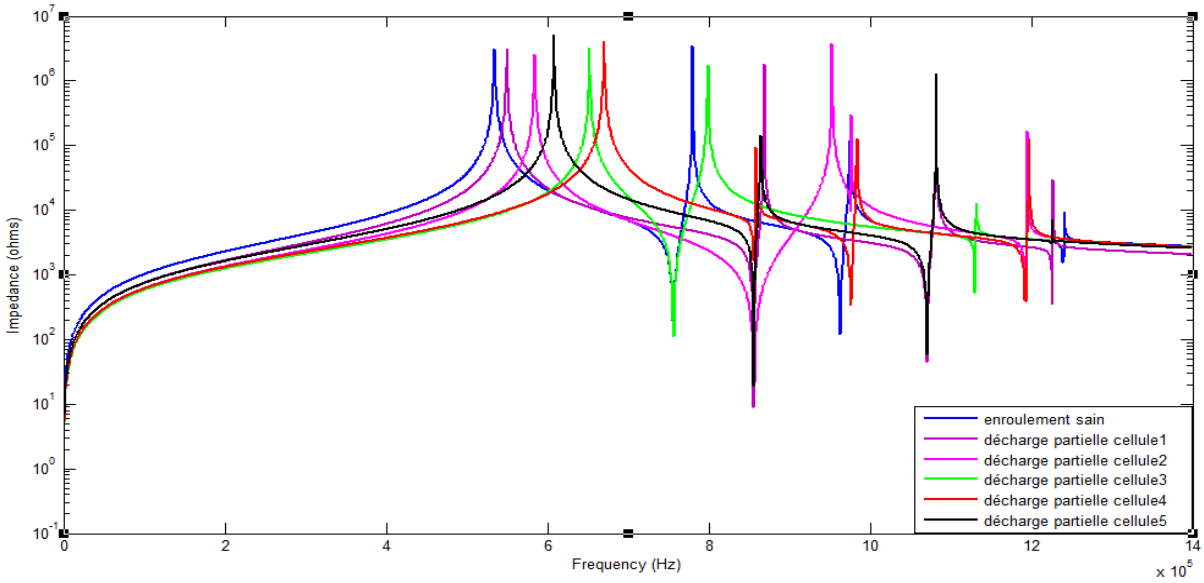


FIGURE 3.15 – Comparaison entre les réponses en fréquence de l'enroulement sain et de l'enroulement affecté par le DP dans chaque cellule.

En comparant les différentes allures fréquentielles des impédances entre un enroulement sain et les enroulements affectés par une décharge partielle dans les différents disques, nous constatons que les fréquences des premiers pics **s**e déplacent légèrement à gauche en présence de DP. Cela reflète une modification des propriétés électromagnétiques locales dans les cellules affectées par les décharges. Le déplacement est souvent subtil, mais il peut être détecté par une analyse de réponse fréquentielle (FRA). L'application du défaut entraîne également la disparition des fréquences de coupure au niveau des deux dernières cellules.

3.6. Défaut du circuit ouvert dans les cellules de l'enroulement

Dans cette section, la résistance de la cellule en question est élevée à une valeur considérable, tandis que les autres paramètres restent inchangés.

Afin de repérer le point d'ouverture de la cellule en défaut dans les divers éléments de la bobine. Le déplacement du point de défaut a été simulé.

3.6.1. Ouverture de la 1ière cellule

Pour un circuit ouvert dans la première cellule de l'enroulement, la variation de l'impédance en fonction de la fréquence de cet enroulement est donnée par la figure suivante.

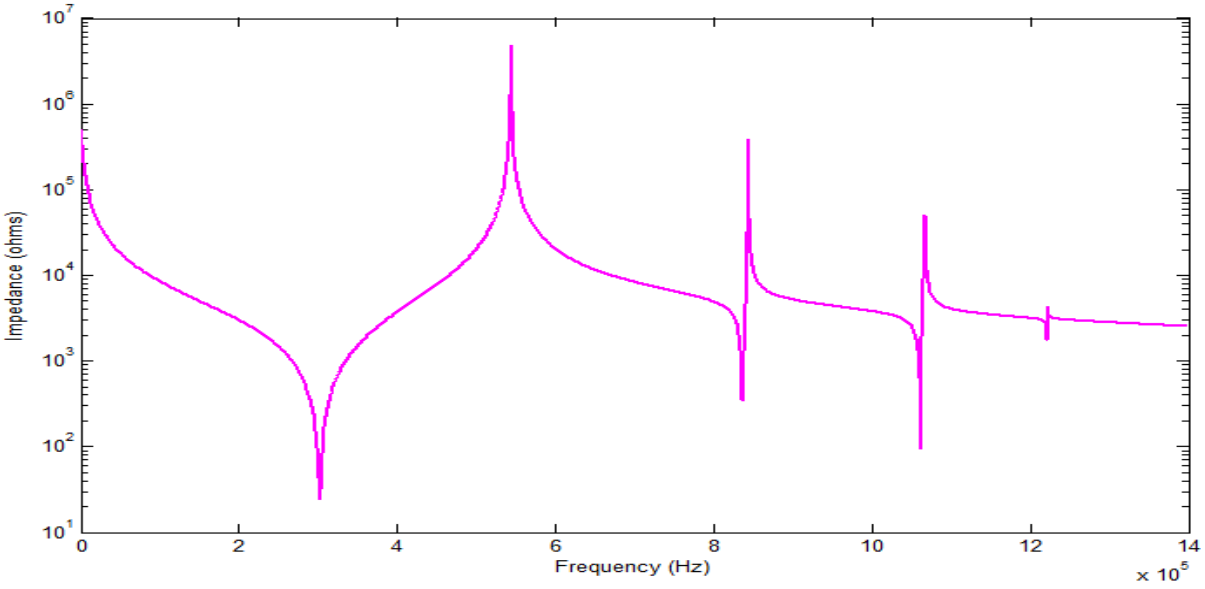


FIGURE 3.16 – Allure de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement avec un défaut d'ouverture de spire à la 1ière cellule.

Le tableau 3.8 présente les fréquences de coupures Ocnfs et Scnfs obtenues dans les deux enroulements, à savoir sain et avec un défaut d'ouverture de la première spire.

Enroulement sain		**Enroulement en ouverture de spire en 1ère cellule**		**Décalage**	
Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)
534	757	0	302	534	455
780	963	544	836	236	127
976	1130	844	1061	132	69
1132	1239	1067	1221	65	18
1241	/	1122	/	119	/

TABLE 3.8– Comparaison de la réponse en fréquence entre l'enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 1ier disque et l'enroulement sain.

3.6.2. Ouverture de la 2ième cellule

La figure suivante illustre la variation de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement pour un circuit ouvert dans la deuxième cellule.

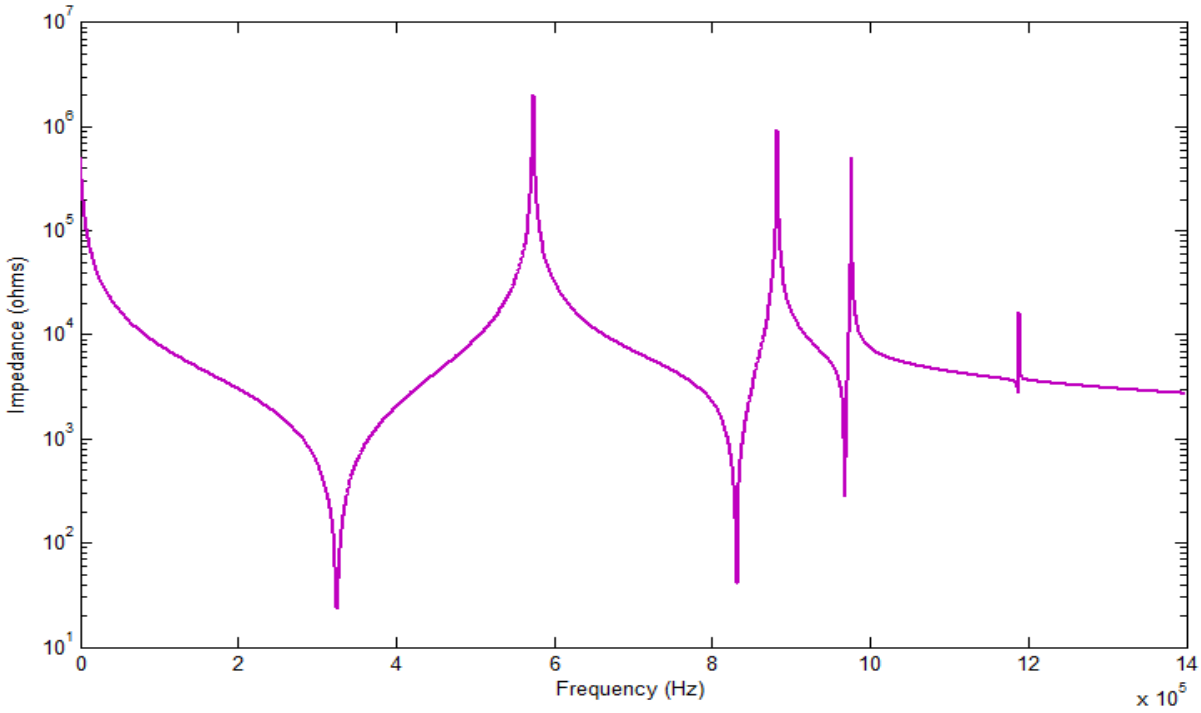


FIGURE 3.17– Allure de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement avec un défaut d'ouverture de spire à la 2ème cellule.

Les fréquences de coupures Ocnfs et Scnfs sont représentées dans la table 3.9, qui montre les deux enroulements.

Enroulement sain		**Enroulement en ouverture de spire en 2ième cellule**		**Décalage**	
Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)
534	757	0	325	534	432
780	963	574	831	206	132
976	1130	882	968	94	162
1132	1239	976	1187	156	52
1241	/	1188	/	53	/

TABLE 3.9– Comparaison de la réponse en fréquence entre l'enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 2ième disque et l'enroulement sain.

3.6.3. Ouverture de la 3ième cellule

La figure suivante illustre la variation de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement pour un circuit ouvert dans la troisième cellule de l'enroulement.

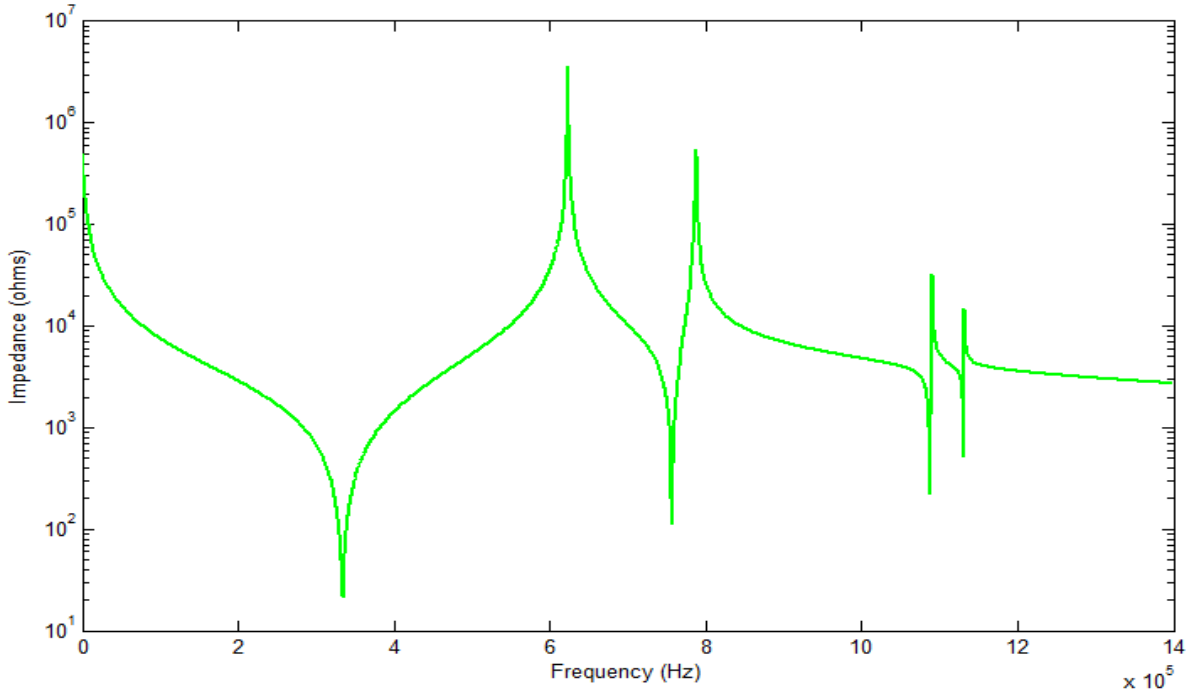


FIGURE 3.18 – Allure de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement avec un défaut d'ouverture de spire à la 3ème cellule.

Le table 3.10 présente les fréquences de coupures Ocnfs et Scnfs obtenues dans les deux enroulements, à savoir sain et avec un défaut d'ouverture de la 3ième cellule.

Enroulement sain		**Enroulement en ouverture de spire en 3ième cellule**		**Décalage**	
Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)
534	757	0	334	534	423
780	963	623	757	79	206
976	1130	787	1087	189	43
1132	1239	1091	1130	41	109
1241	/	1132	/	109	/

TABLE 3.10– Comparaison de la réponse en fréquence entre l'enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 3ième disque et l'enroulement sain.

3.6.4. Ouverture de la 4ième cellule

La figure suivante illustre la variation de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement pour un circuit ouvert dans la quatrième cellule de l'enroulement.

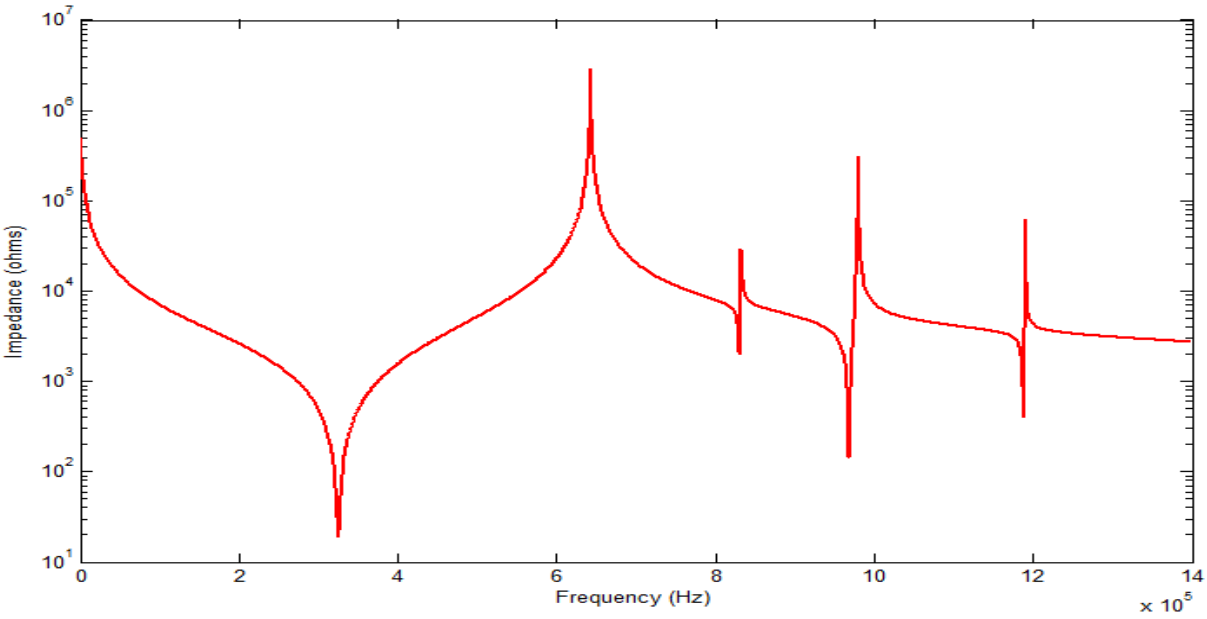


FIGURE 3.19 – Allure de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement avec un défaut d'ouverture de spire à la 4ème cellule.

Les fréquences de coupures Ocnfs et Scnfs obtenues dans les deux enroulements, à savoir en état sain et avec un défaut d'ouverture du quatrième disque, sont présentées dans la table 3.11.

Enroulement sain		**Enroulement en ouverture de spire en 4ième cellule**		**Décalage**	
Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)
534	757	0	325	534	432
780	963	574	831	137	132
976	1130	832	968	144	162
1132	1239	980	1188	152	51
1241	/	1190	/	51	/

TABLE 3.11– Comparaison de la réponse en fréquence entre l'enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 4ième disque et l'enroulement sain.

3.6.5. Ouverture de la 5ième cellule

La figure suivante illustre la variation de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement pour un circuit ouvert dans la cinquième cellule de l'enroulement.

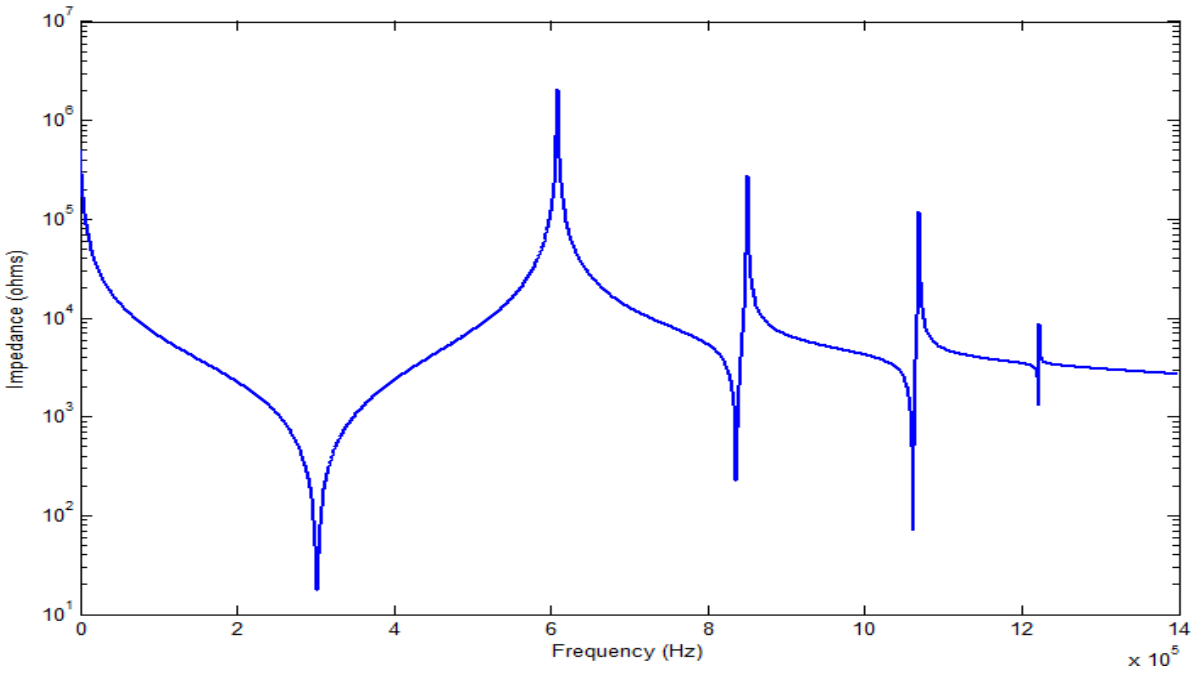


FIGURE 3.20 – Allure de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement avec un défaut d'ouverture de spire à la 5ème cellule.

Les deux enroulements ont obtenu des fréquences de coupures Ocnfs et Scnfs, à savoir en état sain et avec un défaut d'ouverture du quatrième disque, comme indiqué dans le tableau suivant.

Enroulement sain		**Enroulement en ouverture de spire en 5ième cellule**		**Décalage**	
Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)
534	757	0	302	534	455
780	963	609	836	171	127
976	1130	851	1061	125	69
1132	1239	1069	1221	63	18
1241	/	1222	/	19	/

TABLE 3.12– Comparaison de la réponse en fréquence entre l'enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 5ième disque et l'enroulement sain.

3.6.6. Comparaison de la réponse en fréquence entre les défauts d'ouverture des cellules et un enroulement sain

La figure suivante illustre les réponses en fréquence des différents enroulements avec défaut d'ouverture dans différentes cellules et d'un enroulement sain.

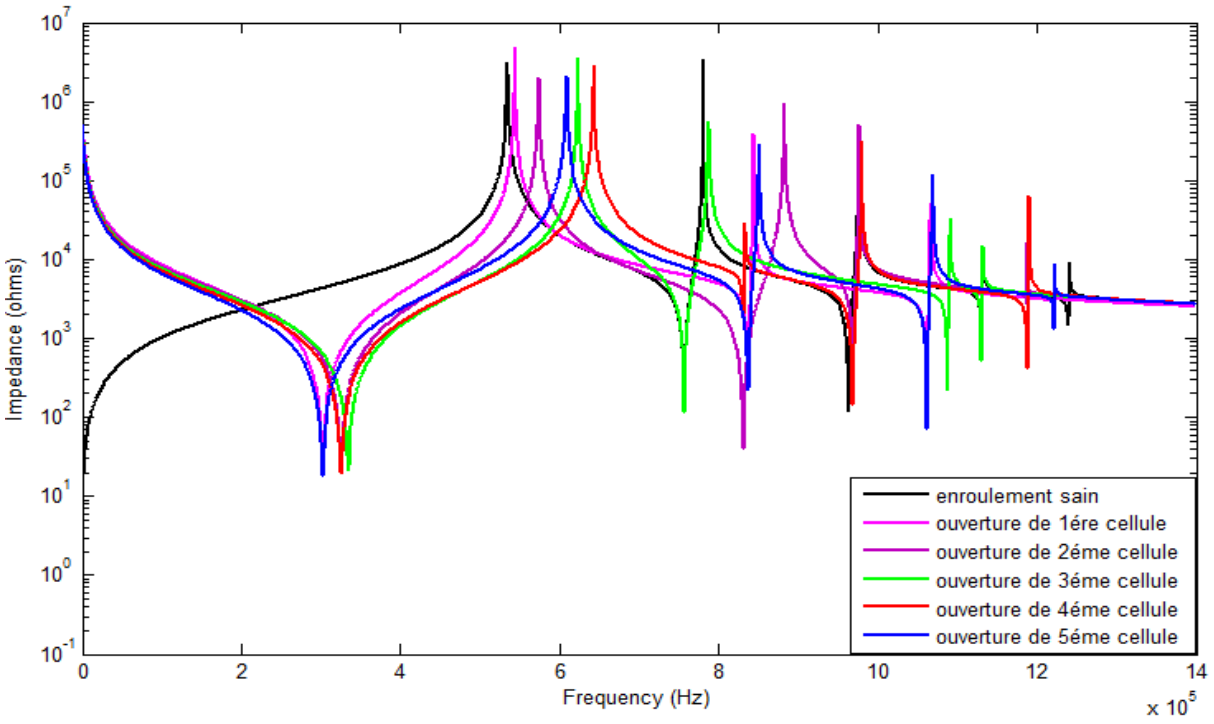


FIGURE 3.21 – Comparaison des impédances de chaque point de circuit ouvert des cellules et celle de l'enroulement sain.

Lorsque des problèmes se présentent avec le circuit ouvert ou la rupture de la spire de l'enroulement, la FRA nous informe de l'émergence d'un pic de résonance Ocnf à 0Hz.

Les tableaux 3.8 à 3.12 montrent une comparaison entre les Ocnf et Scnf des enroulements sains et de ceux ayant une ouverture de la première à la cinquième cellule. Les informations fournies suggèrent que les Ocnfs et Scnfs liés à un enroulement défectueux se décalent vers la droite par rapport à ceux d'un enroulement sain, comme le montre la FIGURE 3.21.

3.7. Défaut de court-circuit sur l'enroulement

Le court-circuit des spires est un défaut très préoccupant dans le bobinage d'un transformateur. Lorsqu'un court-circuit se produit, un courant excessif circule à travers les spires du transformateur, générant une chaleur intense qui peut endommager rapidement l'isolant et les conducteurs. Cela peut conduire à des dommages étendus, voire à la destruction complète du transformateur, ainsi qu'à des risques pour la sécurité des personnes et des équipements environnants.

Dans ce travail, le défaut est simulé par une liaison galvanique de faible résistance entre les cellules touchées par le court-circuit.

Afin de repérer le point de défaillance de court-circuit dans les diverses cellules de l'enroulement. Le déplacement du point de court-circuit a été simulé.

3.7.1. Court-circuit entre la 1ière et la 2ième cellule

La variation de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement affecté par le court circuit est donnée par la figure suivante :

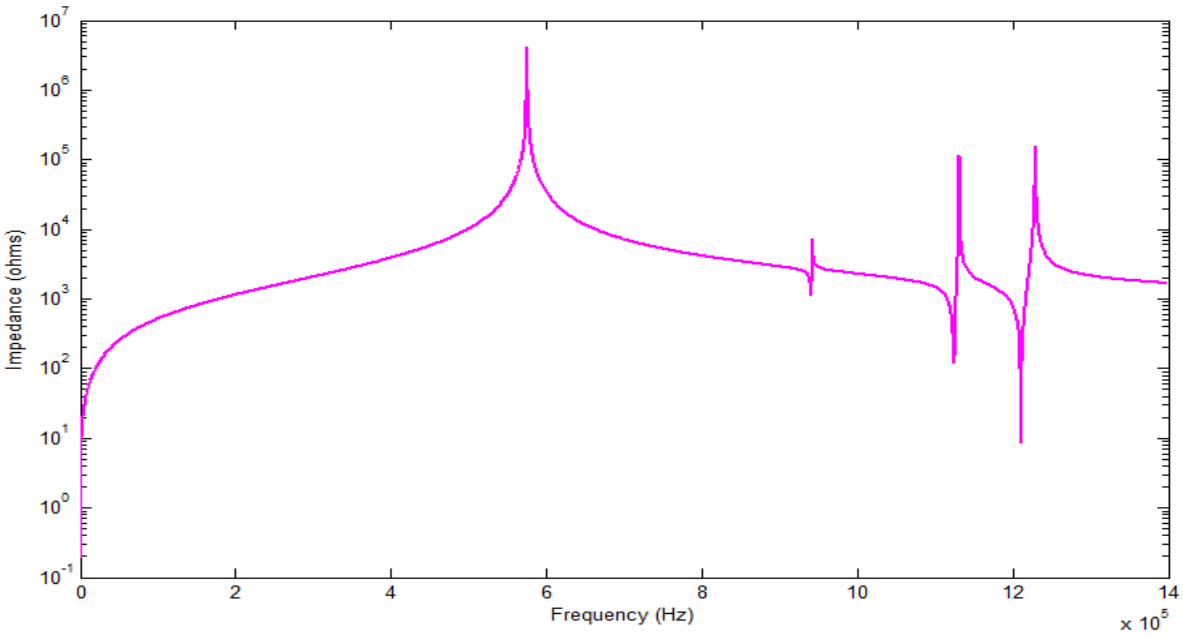


FIGURE 3.22 – Variation de l'impédance en fonction de la fréquence d'un enroulement présentant un court-circuit entre la 1ière et la 2ième cellule.

Le tableau 3.13 présente les fréquences de coupures Ocnfs et Scnfs obtenues dans les deux enroulements, à savoir un enroulement sain et un enroulement avec un court-circuit entre la première et la deuxième cellule.

Enroulement sain		**Enroulement en court-circuit entre la 1ière et la 2ième cellule**		**Décalage**	
Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)
534	757	575	940	41	183
780	963	942	1124	162	161
976	1130	1131	1211	155	81
1132	1239	1229	/	97	/
1241	/	/	/	/	/

TABLE 3.13– Tableau comparatif de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit et entre la 1ière et la 2ième cellule et un enroulement sain.

3.7.2. Court-circuit entre la 2ième et la 3ième cellule

La représentation graphique ci-dessous montre comment l'impédance varie en fonction de la fréquence de l'enroulement avec un court-circuit entre la deuxième et la troisième cellule.

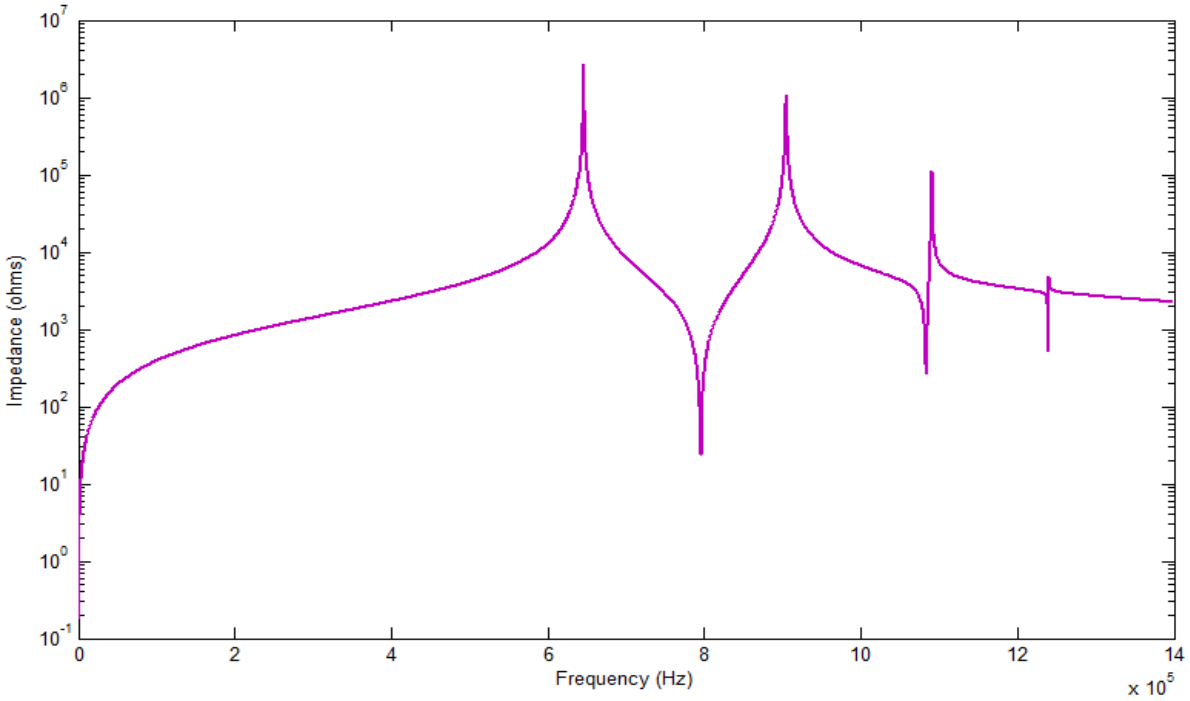


FIGURE 3.23 – Variation de l'impédance en fonction de la fréquence d'un enroulement présentant un court-circuit entre la 2ième et la 3ième cellule.

Le Tableau ci-dessous présente les fréquences de coupures Ocnfs et Scnfs obtenues lors de l'enroulement sain et lors de l'enroulement en court-circuit.

Enroulement sain		**Enroulement en court-circuit entre la 2ième et la 3ième cellule**		**Décalage**	
Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)
534	757	645	796	111	39
780	963	905	1084	125	121
976	1130	1091	1239	115	109
1132	1239	1240	/	108	/
1241	/	/	/	/	/

TABLE 3.14– Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit et entre la 2^{ième} et la 3^{ième} cellule et un enroulement sain.

3.7.3. Court-circuit entre la 3^{ième} et la 4^{ième} cellule

La représentation graphique ci-dessous montre comment l'impédance varie en fonction de la fréquence de l'enroulement avec un court-circuit entre la troisième et la quatrième cellule.

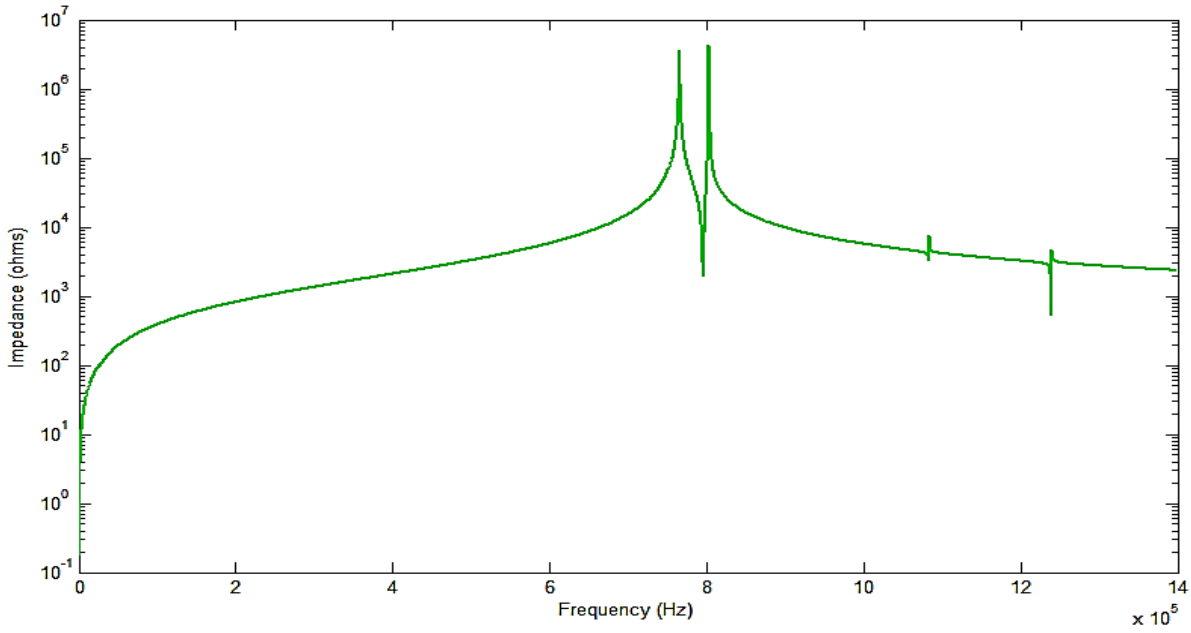


FIGURE 3.24 – Variation de l'impédance en fonction de la fréquence d'un enroulement présentant un court-circuit entre la 3^{ième} et la 4^{ième} cellule.

Le tableau 3.15 présente les fréquences de coupures Ocnfs, Scnfs obtenues dans les deux enroulements, à savoir un enroulement normal et un enroulement avec un court-circuit entre la troisième et la quatrième cellule.

Enroulement sain		**Enroulement en court-circuit entre la 3ième et la 4ième cellule**		**Décalage**	
Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)
534	757	765	796	231	39
780	963	803	1083	23	120
976	1130	1084	1239	108	108
1132	1239	1240	/	108	/
1341	/	/	/	/	/

TABLE 3.15– Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit et entre la 3^{ième} et la 4^{ième} cellule et un enroulement sain.

3.7.4. Court-circuit entre la 4^{ième} et la 5^{ième} cellule

La variation de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement avec court-circuit entre la quatrième et la cinquième cellule est illustrée dans la figure ci-dessous.

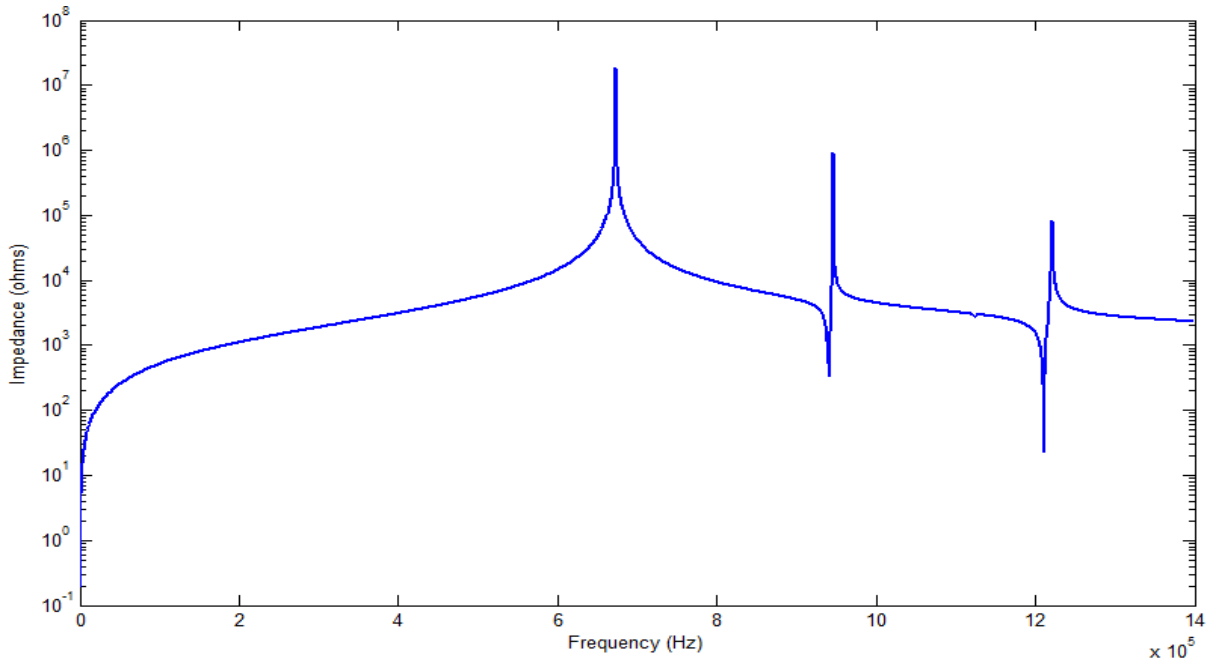


FIGURE 3.25 – Variation de l'impédance en fonction de la fréquence d'un enroulement présentant un court-circuit entre la 4^{ième} et la 5^{ième} cellule.

Le tableau 3.16 présente les fréquences de coupures Ocnfs et Scnfs obtenues dans les deux enroulements, à savoir un enroulement normal et un enroulement avec un court-circuit entre

la troisième et la quatrième cellule.

Enroulement sain		**Enroulement en court-circuit entre la 4ième et la 5ième cellule**		**Décalage**	
Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)	Ocnf (KHz)	Scnf (KHz)
534	757	673	941	139	184
780	963	946	1124	166	161
976	1130	1125	1211	149	81
1132	1239	1221	/	89	/
1241	/	/	/	/	/

TABLE 3.16– Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit et entre la 4^{ième} et la 5^{ième} cellule et un enroulement sain.

3.7.5. Comparaison de la variation d'impédance en fonction de la fréquence entre les défauts de court-circuit et l'enroulement sain

Le schéma ci-dessous illustre les diverses impédances pour chaque point de court-circuit en les comparant avec l'enroulement sain.

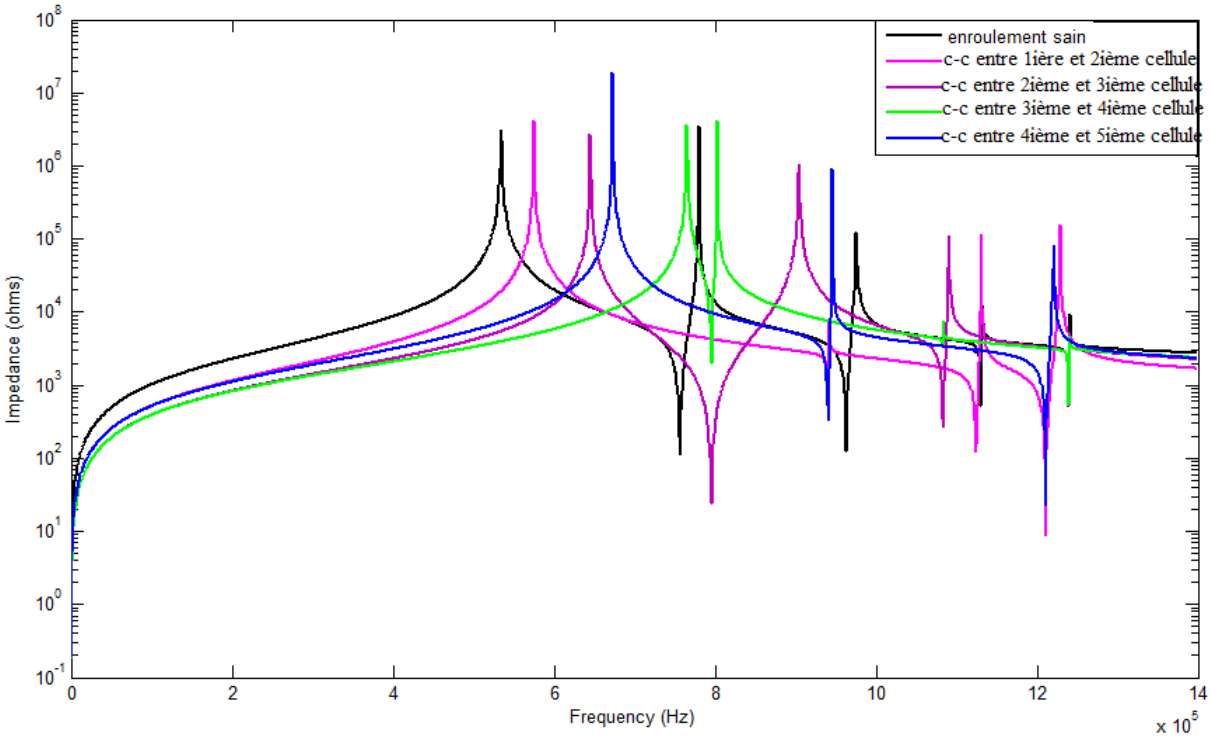


FIGURE 3.26 – Comparaison des impédances de chaque point de court-circuit entre les cellules et celle de l'enroulement sain.

Selon les résultats, on a observé à la présence d'un court-circuit sur l'enroulement, une diminution d'impédance d'environ 30% par rapport à la réponse d'un enroulement sain.

Un décalage de fréquence de coupure de la première résonance vers la droite d'environ 250KHz a été observé sur l'enroulement ayant un défaut de court-circuit par rapport à l'enroulement sain. Il convient de souligner que ce décalage se déplace vers la droite lorsque le court-circuit se déplace de l'entrée vers la sortie de bobinage.

3.8. Localisation des défauts le long de l'enroulement

Afin de repérer un défaut, une analyse a été réalisée en utilisant la fréquence des pics. L'histogramme suivant illustre la comparaison des fréquences de premier pic dans le cas d'un enroulement sain d'une part et dans le cas d'un défaut d'autre part.

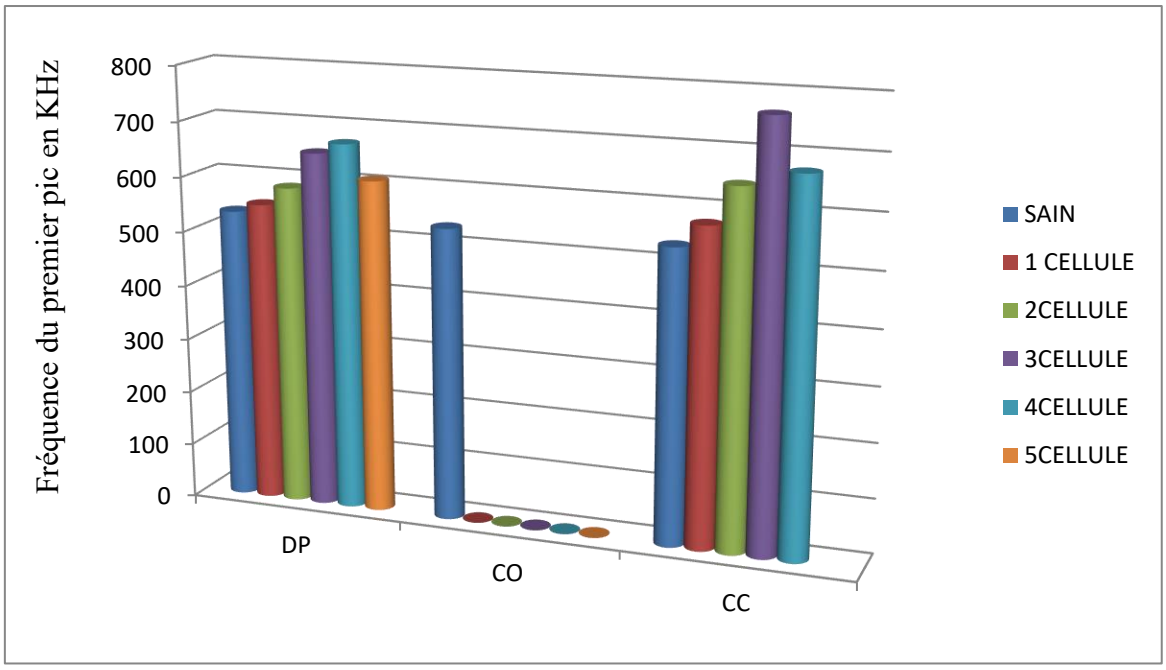


FIGURE 3.27 – Comparaison entre les différentes valeurs des fréquences de premier pic dans le cas d'un enroulement sain d'une part et d'autre part dans le cas d'un défaut.

Dans le transformateur en bon état, les fréquences du premier pic reflètent le comportement normal des enroulements et de l'isolation.

Selon l'histogramme, une hausse des valeurs des fréquences de premier pic tout au long de l'enroulement est observée, cette hausse est particulièrement visible sur la cellule affectée par

le défaut de décharge partielle et aussi de court-circuit.

Les modifications de l'aspect de la réponse fréquentielle d'un transformateur, comme le déplacement, l'apparition ou la disparition des pics de résonances, signalent un défaut dans le transformateur.

Le court-circuit présente une augmentation significative des fréquences par rapport à la décharge partielle, ce qui peut être considéré comme un moyen de classification des défauts.

Dans les deux cas en court-circuit et en décharge partielle,une augmentation des fréquences de premier pic à la position du défaut par rapport à celles observées dans le cas d'un enroulement sain est observée, en revanche dans le cas d'un circuit ouvert on observe une disparition du premier pic. Cette modification des fréquences au point d'injection de défaut peut être considérée comme un moyen de localiser le défaut.

3.9. Conclusion

Nous avons utilisé la méthode PSO dans ce chapitre afin de déterminer les paramètres de l'enroulement du transformateur. Pour atteindre cet objectif, nous avons illustré par simulation la démarche à suivre afin d'obtenir un résultat satisfaisant.

Il a été observé que l'existence d'un défaut comme la décharge partielle dans l'enroulement du transformateur entraîne une variation de sa réponse en fréquence.

L'analyse fréquentielle de l'impédance peut être utilisée pour détecter la nature et la localisation d'un défaut qui se produisant le long de l'enroulement, comme cela a été observé lors de la simulation.

Chapitre 4

Influence de la décharge partielle sur la propagation des surtensions atmosphériques

4.1 Introduction

Une surtension est une élévation brusque et brève de la tension électrique au-delà de la tension nominale du système. Cependant, en général, on qualifie de surtension des phénomènes de courte durée qui se manifestent sous forme de courtes impulsions périodiques ou apériodiques. Dans le cas d'un transformateur de puissance, différentes causes peuvent entraîner une surtension, comme des commutations de machines de grande puissance, des décharges électriques atmosphériques, des couplages capacitifs, ainsi que des erreurs de conception ou de mise en place des éléments inductifs.

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'influence de la présence d'une décharge sur la propagation d'une surtension atmosphérique dans l'enroulement d'un transformateur de puissance.

4.2. Causes d'apparition des surtensions

Lors de son fonctionnement, un transformateur est exposé à des surtensions internes et externes. Les surtensions internes sont dues à des changements brusques de la topologie du réseau, tandis que les surtensions externes sont causées par des décharges provenant de l'atmosphère [**102**].

Les surtensions présentent des risques pour un réseau de distribution et les éléments qui le composent. Effectivement, les dangers se concentrent principalement sur le

dysfonctionnement et la destruction du matériel, notamment des transformateurs de puissance. Ces contraintes de tension peuvent être permanentes en raison de la tension de service, ou être temporaires en raison de surtensions provenant de différentes sources [**102**].

La surtension se propage dans les deux directions, à partir de l'endroit où elle apparaît, à une vitesse proche de celle de la lumière. Elle se manifeste par une impulsion apériodique avec un front raide (Figure IV.1 (a)). Le temps nécessaire pour que la tension augmente de zéro jusqu'à atteindre la valeur maximale t/m, qui correspond au front de l'onde, est de quelques microsecondes ou même de quelques fractions de microseconde. La durée totale de l'impulsion correspondant à une longueur d'onde complète est de quelques dizaines de microsecondes également.

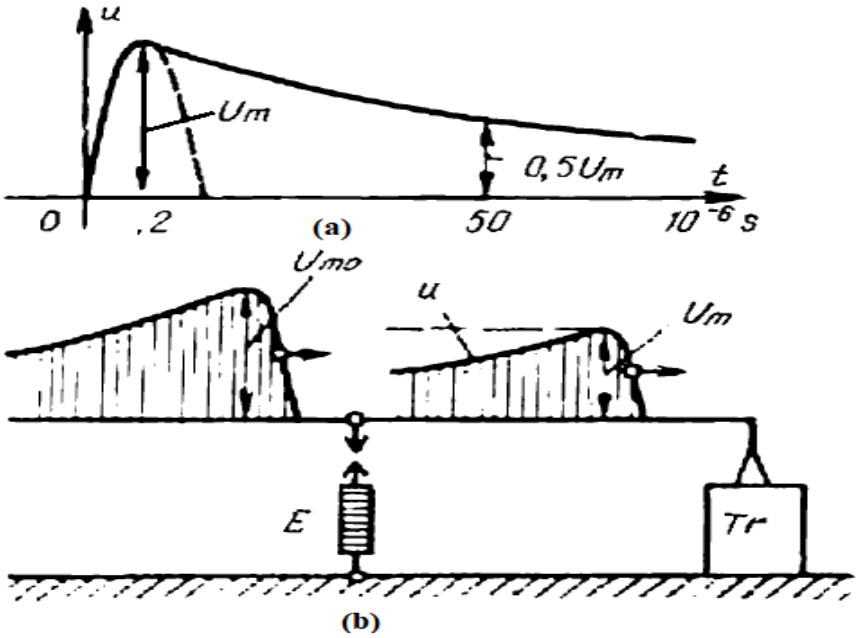


FIGURE 4.1 – Paramètres des ondes de surtensions [**103**].

Une onde complète normale de surtension est illustrée dans la figure IV.1 (a), qui est utilisée pour évaluer la rigidité diélectrique des transformateurs sous une tension impulsionnelle. Sa longueur mesurée par le temps de descente de la tension jusqu'à la moitié de sa valeur maximale vaut 50.10^{-6} s.

Afin de réduire les surtensions (voir figure IV.1, b), les transformateurs Tr sont équipés d'éclateurs E conçus pour contrer la tension U_m. L'onde de surtension peut avoir une amplitude très élevée U_{m0} en amont de l'éclateur, mais en aval de cet appareil, elle doit avoir une valeur maximale U_m qui ne dépasse pas la valeur de la tension impulsionnelle utilisée pour l'essai de rigidité diélectrique de l'enroulement du transformateur [**103**].

Différentes sources peuvent entraîner des surtensions dans les transformateurs :

- Le coup de foudre, qui frappe les lignes, les pylônes ou les fils de garde, est un phénomène atmosphérique ;
- Par décharge électrostatique.
- Les commutations de manœuvre ;
- Les surtensions à fréquence du réseau.

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques des différentes surtensions.

Surtension	**durée**	**Raideur de front de montée ou fréquence**	**Amortissement en fonction de la fréquence**	**Causes**
atmosphérique	Très courte (µs)	Très élevée (1000 kV/µs)	Fort	Coups de foudre
A fréquence du réseau	Longue (s)	Fréquence du réseau	Faible	Défauts
de manœuvre	Courte (ms)	Moyenne (1 à 200 kHZ)	Moyen	– Ouverture de lignes – Mise sous tension.

TABLE 4.1– Caractéristiques des différentes surtensions [**86**].

4.3. Surtensions atmosphériques

Elles résultent d'un coup de foudre direct sur un système électrique ou de l'effet d'un coup de foudre dans l'environnement du système. Ces surtensions ont un impact majeur sur les transformateurs de puissance. Ce type de surtension présente une grande amplitude et une grande raideur, mais leurs durées sont courtes (quelques dizaines à quelques centaines de microsecondes) [**104**].

Il est important de distinguer les deux types de coup de foudre :

- Le coup de foudre direct qui touche directement le transformateur ;
- Le coup de foudre "indirect" qui tombe près d'un transformateur, sur un pylône métallique, ou ce qui revient au même sur le câble de garde (installé à la terre, ce câble relie les sommets des pylônes, il est conçu pour protéger les conducteurs actifs des coups de foudre directs).

4.3.1. Le coup de foudre direct

Les coups de foudre directs se produisent fréquemment sur un conducteur d'une ligne de transport, une onde de tension se propage. L'onde est amortie par l'effet couronne et la longueur de la ligne, est interrompue soit par un isolateur à cornes, soit par les dispositifs de protection positionnés. Étant donné que le courant de la foudre est rarement inférieur à 10kA et que l'impédance typique d'une ligne aérienne est d'environ 300Ω, l'onde de tension atteindra de 1500 kV [**104**].

4.3.2. Le coup de foudre indirect

Dans le cas où la foudre tombe près de la ligne, le courant entraîne une variation très rapide du champ électromagnétique. En raison des vibrations électromagnétiques produites par la foudre, des tensions supplémentaires sont créées dans des conducteurs éloignés du point d'impact. Cela a des effets à plusieurs centaines de mètres, voire à plusieurs kilomètres de distance. Les ondes générées sur la ligne sont de forme et d'ampleur semblables à celles obtenues par choc de foudre direct. Elles sont principalement caractérisées par leur front très raide (environ microseconde) et leur amortissement très rapide **[105]**.

4.3.3. Caractéristiques d'une onde de foudre

Les phénomènes étudiés permettent de déterminer les différents types d'ondes de courant et de tension de foudre.

Les normes CEI distinguent deux catégories d'ondes de courant.

- Une onde de 10/350 µs : utilisée pour définir les ondes de courants des coups de foudre directs [**106**].

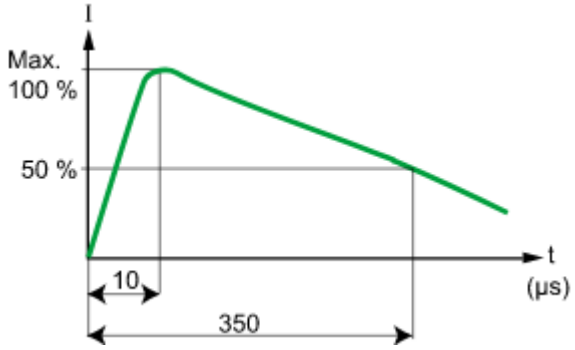


FIGURE 4.2 – Forme d'onde de courant 10/350 µs [**106**].

- Une onde de 8/20 µs : utilisée pour définir les ondes de courants des coups de foudre indirects [**7**].

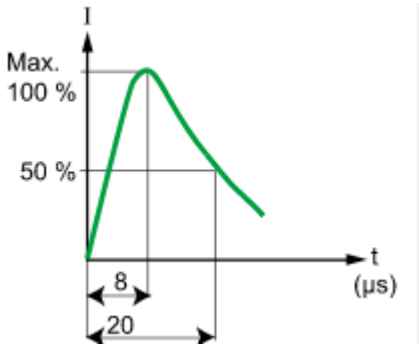


FIGURE 4.3 – Forme d'onde de courant 8/20 µs [**106**].

Les deux catégories d'ondes de courant de foudre sont employées afin de déterminer les tests des parafoudres (conformément à la norme CEI 61643-11) et l'immunité des équipements face aux courants de foudre. L'intensité de l'onde de courant est définie par la valeur crête de l'onde [**106**].

Les coups de foudre engendrent des surtensions qui se manifestent par une onde de tension de 1,2 / 50 µs.

Ce type d'onde de tension est utilisé pour vérifier la résistance des équipements aux surtensions d'origine atmosphérique (tension de choc suivant la norme CEI 61000-4-5).

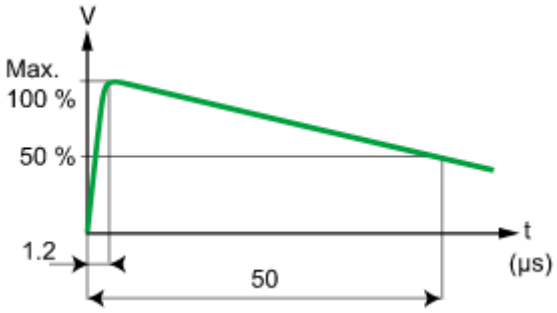


FIGURE 4.4 – Forme d'onde de tension 1,2 / 50 µs [**106**].

4.4. Protection contre les surtensions atmosphériques

Afin d'assurer la sécurité et la fiabilité des transformateurs, il est essentiel de les protéger contre les surtensions atmosphériques. Les parafoudres sont l'une des protections les plus efficaces contre ces surtensions atmosphériques. Placés aux bornes des transformateurs, ces dispositifs agissent en limitant la surtension à une valeur acceptable avec l'isolation des

transformateurs [**107**], [**108**].

Un parafoudre est un dispositif non linéaire qui présente une très faible résistance en cas de surtension, ce qui lui permet de dévier l'excès d'énergie vers la terre, et une haute résistance dans des conditions normales, évitant ainsi de perturber le fonctionnement du réseau électrique. Lorsque la tension dans un système dépasse un certain seuil (appelé tension d'amorçage**),** le parafoudre s'active et permet le passage du courant de surtension directement vers la terre, réduisant ainsi la tension appliquée aux équipements protégés [**109**].

4.5. Influence de la décharge partielle sur la propagation d'une surtension dans un enroulement du transformateur

La propagation des ondes de surtensions en présence d'une décharge partielle (DP) est un phénomène complexe qui joue un rôle crucial dans la fiabilité et la durée de vie des systèmes électriques à haute tension, comprendre ce phénomène est essentiel pour la conception et la maintenance de ces systèmes.

Dans ce qui suit nous allons simuler un enroulement d'un transformateur de puissance en présence d'une décharge partielle en utilisant le logiciel Pspice A/D, et nous appliquons une surtension simulable à un coup de foudre de type $1.2/50\mu s$. Ces simulations ont pour objectif l'évaluation de l'impact des surtensions sur l'enroulement du transformateur en présence de deux types de décharges à savoir des décharges longitudinales et transversales.

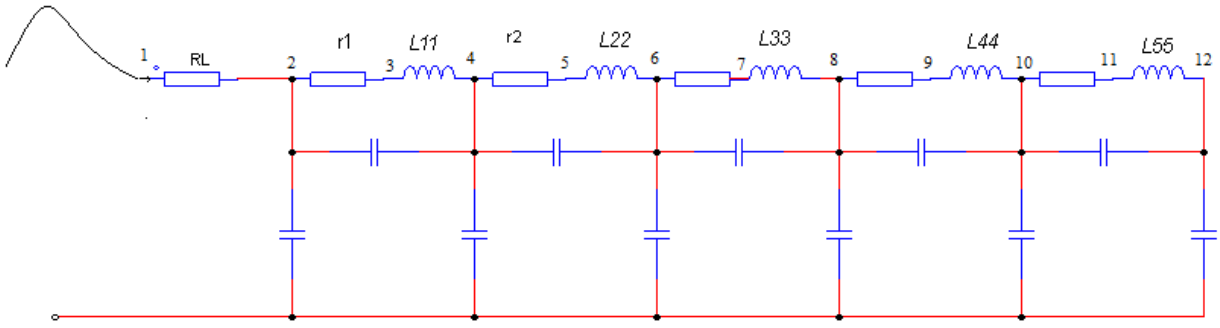


FIGURE 4.5 – Application d'une surtension à l'entrée de l'enroulement.

4.5.1. Propagation des ondes de surtension en présence d'une décharge partielle sans protection par parafoudre et sans mise à la terre

4.5.1.1. Présence d'une décharge partielle en longitudinal

Dans cette partie, l'enroulement du transformateur est sollicité par une surtension de

type $1.2/50\ \mu s$ pour deux cas distincts : un enroulement sain et un enroulement affecté par une décharge partielle longitudinale.Le modèle de la décharge partielle est inséré, à plusieurs positions le long de l'enroulement, entre les bornes de chaque cellule du modèle du transformateur.

Enroulement sain sans décharge partielle

La figure suivante représente les tensions le long de l'enroulement, dans le cas d'un enroulement sain soumis à une surtension atmosphérique, en l'absence de parafoudre et sans mise à la terre.

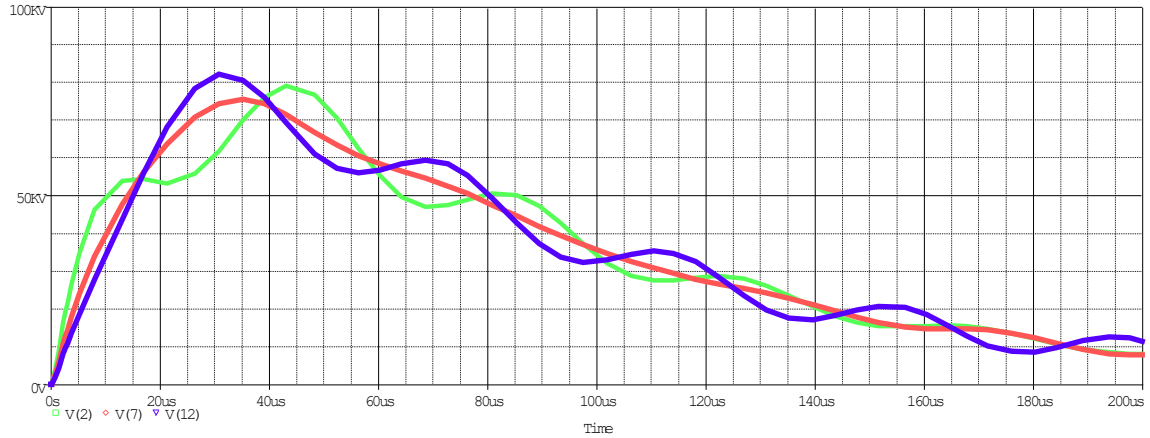


FIGURE 4.6 – Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Sans parafoudre, sans mise à la terre et sans décharge partielle.

Présence d'une décharge partielle au début de l'enroulement

La figure 4.7, représente les tensions dans un enroulement où une décharge partielle à la première cellule.

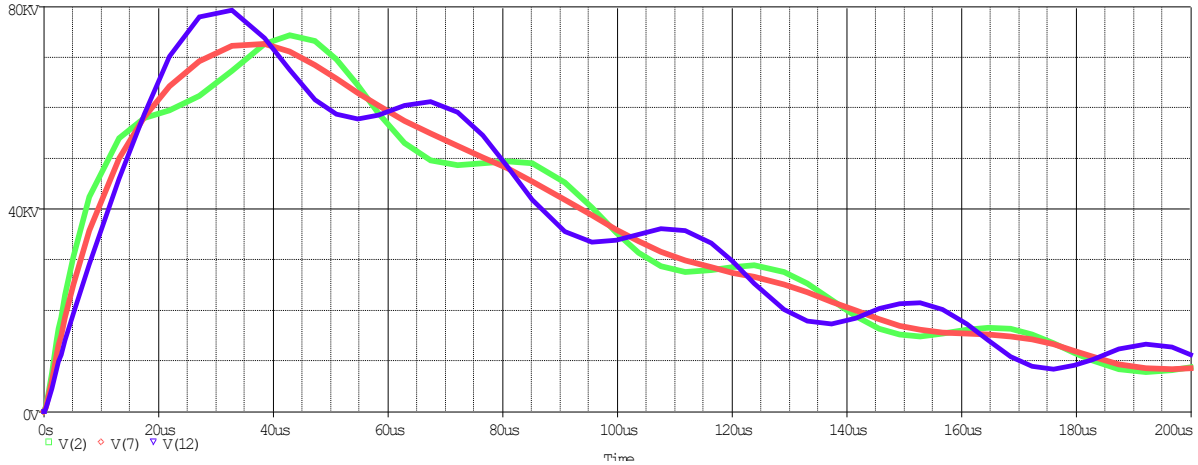


FIGURE 4.7– Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre isolé de la terre et présence de la décharge partielle à la première cellule.

Comme illustré dans les figures 4.6 et 4.7, les tensions diminuent légèrement. Dans la première cellule où une décharge partielle est appliquée, la tension maximale est de 79,6KV en l'absence de décharge et de 74,5KV en présence de décharge. Au milieu de l'enroulement la tension maximale est de 75.8KV sans décharge et de 70.1KV en présence de la décharge. A l'extrémité de l'enroulement, elle est de 82.2KV sans décharge et de 79.4KV avec décharge partielle.

La figure ci-dessous illustre le courant qui circule dans la première cellule, sans et avec décharge partielle.

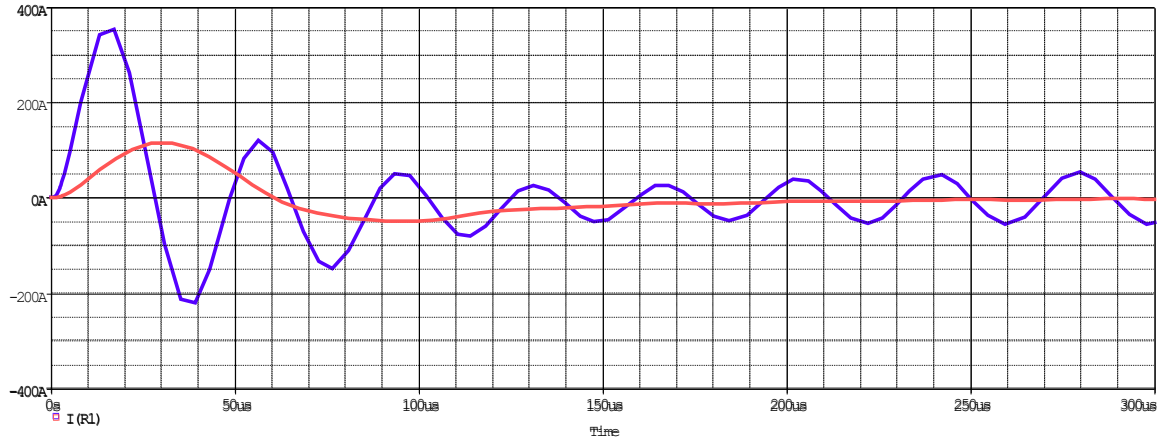


FIGURE 4.8– Comparaison entre le courant circulant dans la première cellule sans (en bleu) et avec décharge partielle (en rouge).

La figure 4.9 compare le courant de la ligne au courant de la DP.

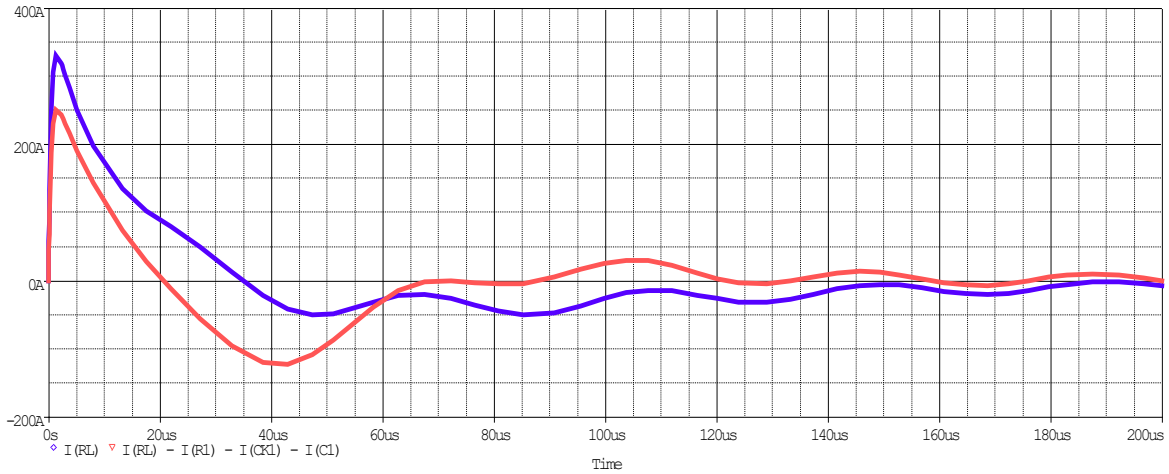


FIGURE 4.9 – Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle (en rouge).

Selon la figure 4.8, il est possible d'observer une diminution significative du courant qui

circule dans la première cellule lorsque la décharge partielle est présente. Sa valeur maximale est de 343A sans décharge et de 116A avec décharge partielle.

La figure 4.9 montre que le courant généré par la foudre ayant une valeur maximale de 330A passe dans la décharge partielle avec une valeur maximale de 252A.

- **Présence d'une décharge partielle au milieu de l'enroulement**

Les allures de tensions le long de l'enroulement en présence d'une DP au milieu de l'enroulement sont montées sur la figure suivante.

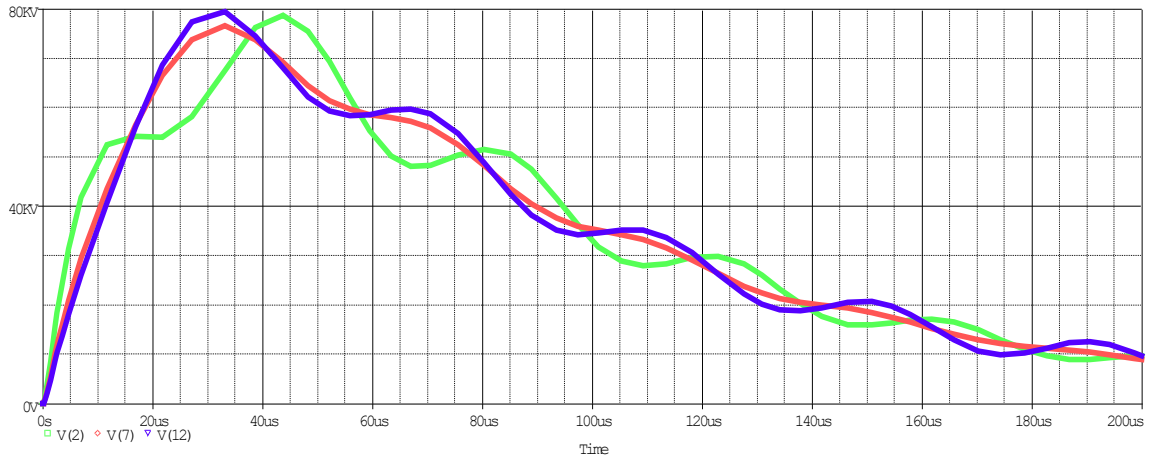


FIGURE 4.10 – Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre isolé de la terre, sans parafoudre et en présence de la décharge partielle à la 3ème cellule.

Une comparaison de la tension au milieu de l'enroulement sans et avec DP est donnéé par la figure 4.11.

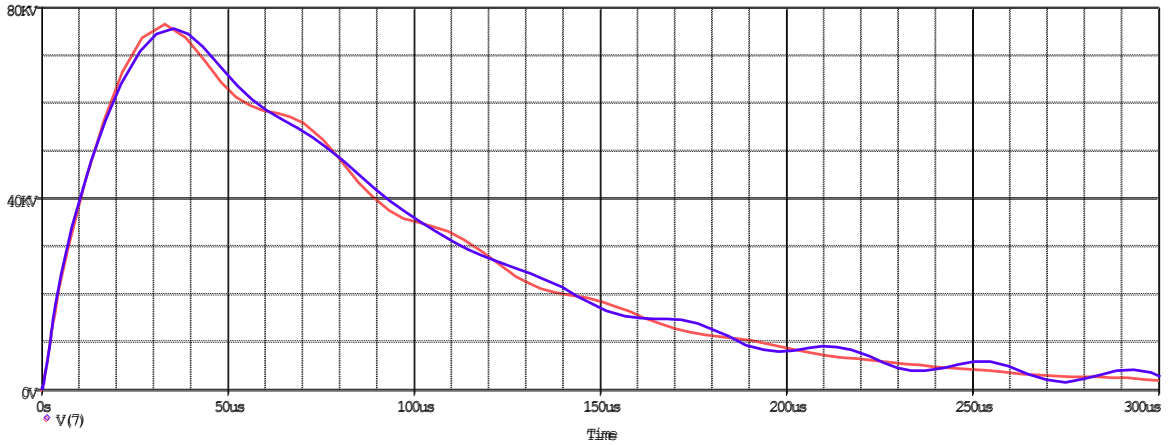


FIGURE 4.11 – Comparaison entre les tensions aux bornes de la 3ème cellule sans (en bleu) et avec décharge partielle entre ses bornes (en rouge).

Le courant dans la troisième cellule sans et avec DP est représenté dans la figure suivante.

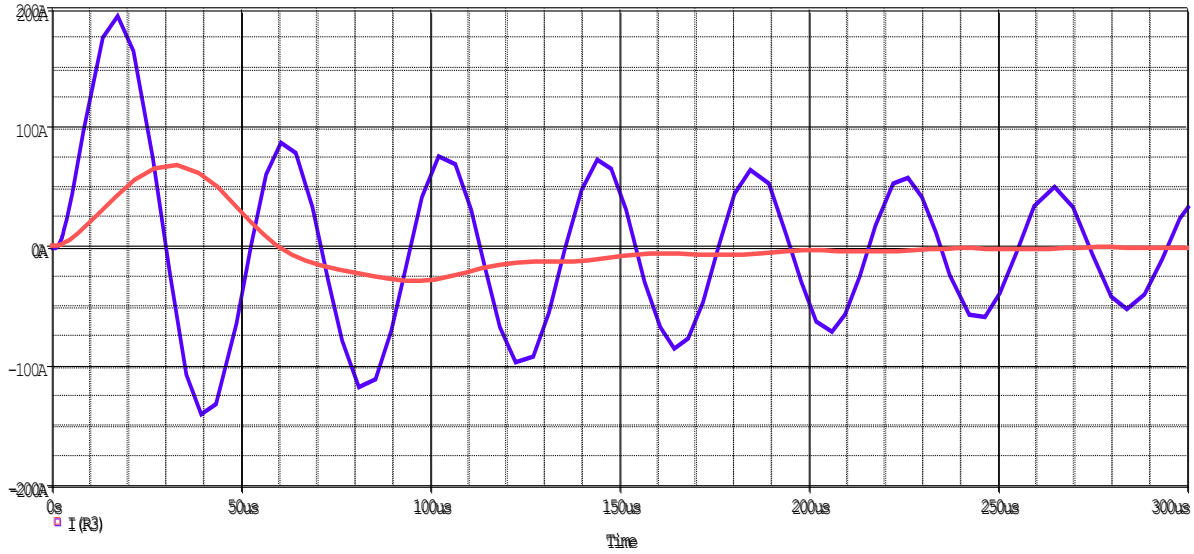


FIGURE 4.12 – Comparaison entre le courant circulant dans la troisième cellule sans (en bleu) et avec décharge partielle (en rouge).

La figure 4.13 compare le courant de la ligne et le courant de la DP au milieu de l'enroulement.

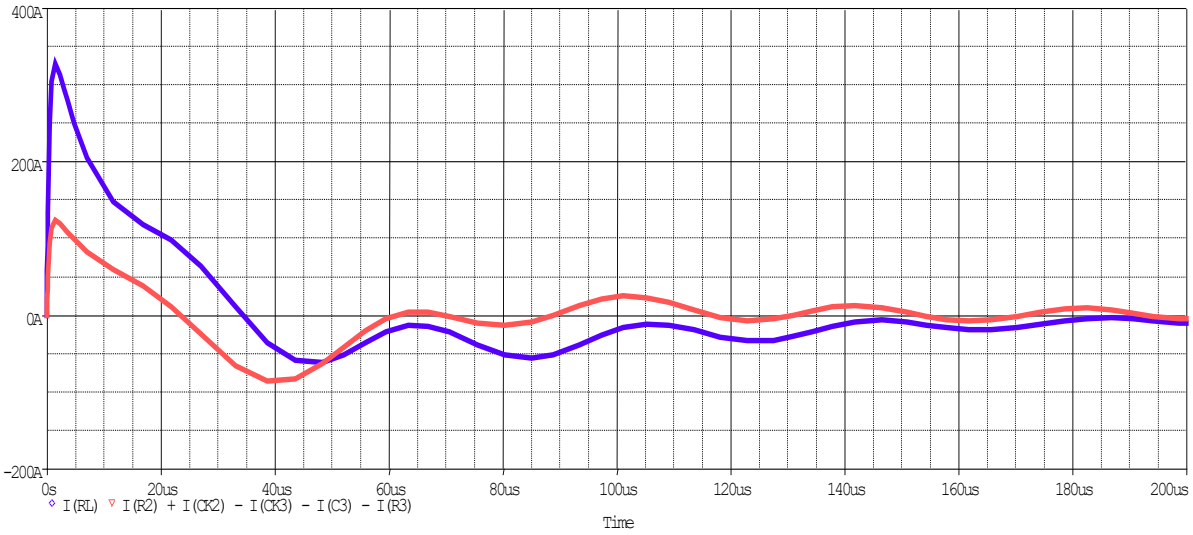


FIGURE 4.13 – Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle au milieu de l'enroulement (en rouge).

Il a été observé que la décharge partielle au milieu de l'enroulement n'a pas d'effet significatif sur les tensions.

En revanche, il a été observé que le courant qui traversant la décharge partielle est élevé, atteignant une valeur maximale de 124A, mais est moins élevé qu'au début de l'enroulement.

Présence d'une décharge partielle à l'extrémité de l'enroulement

Les tensions le long de l'enroulement sont illustrées comme suit :

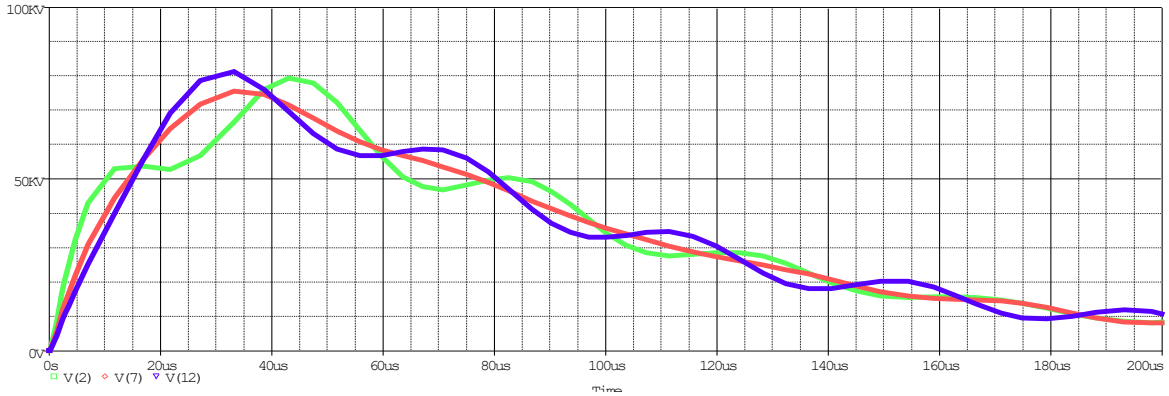


FIGURE 4.14 – Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre isolé de la terre et présence de la décharge partielle à la 5^{ième} cellule.

La tension à l'extrémité de l'enroulement est illustrée sur la figure 4.13.

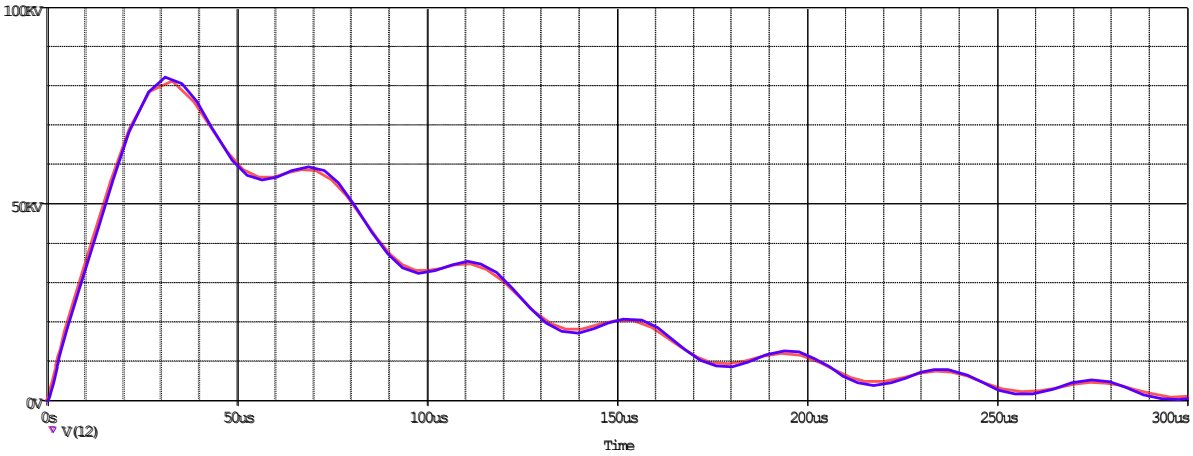


FIGURE 4.13 – Comparaison entre les tensions aux bornes de la 5ème cellule sans (en bleu) et avec décharge partielle entre ses bornes (en rouge).

La figure 4.14 compare le courant de la ligne et le courant de la DP.

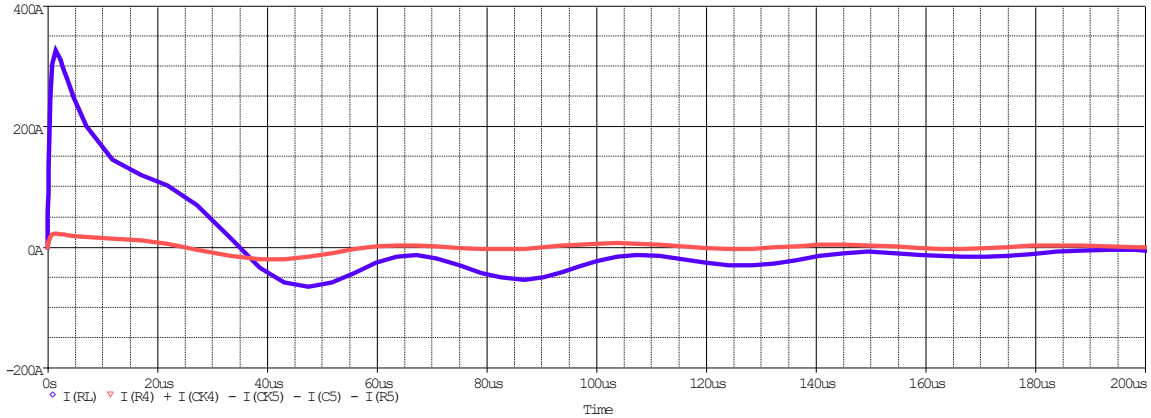


FIGURE 4.14 – Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant dans la décharge partielle à l'extrémité de l'enroulement (en rouge).

2.5.1.2. Présence d'une décharge partielle en transversal

Présence d'une décharge partielle au début de l'enroulement

Dans ce cas, les tensions dans l'enroulement sont comme suit :

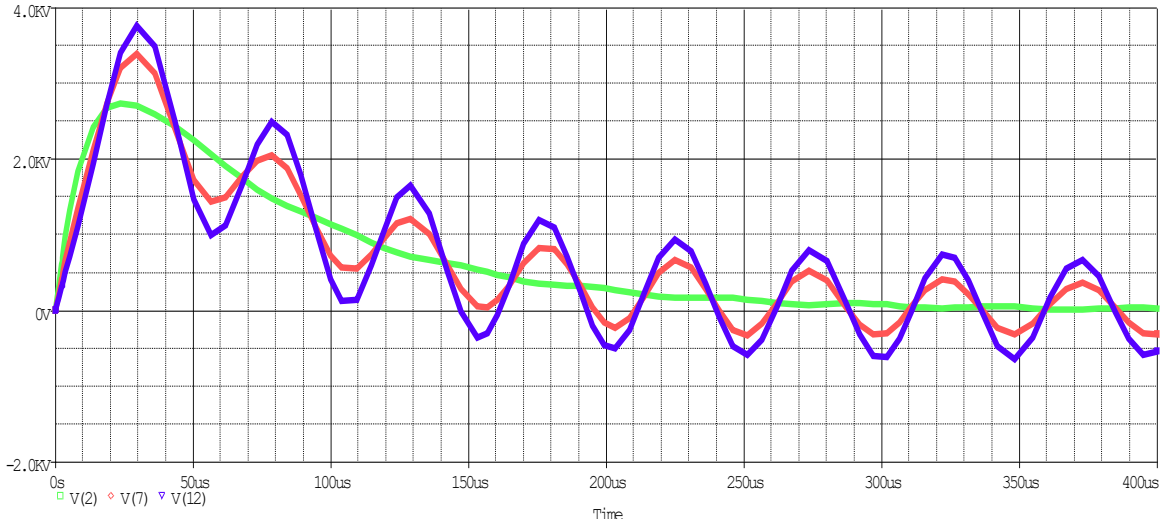


FIGURE 4.15 – Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre isolé de la terre, sans parafoudre et présence de la décharge partielle entre la cuve et la 1^{ière} cellule.

La tension à l'entrée de l'enroulement est illustrée sur la figure suivante.

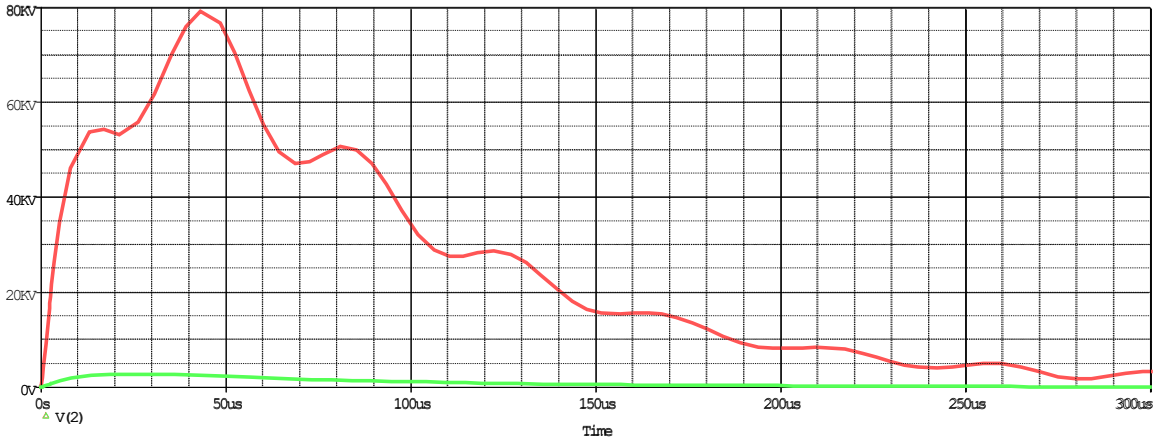


FIGURE 4.16 – Comparaison entre les tensions à l'entrée de l'enroulement sans (en rouge) et avec décharge partielle entre la cuve et la 1^{ière} cellule (en vert).

Dans le cas d'une décharge partielle en transversale c'est-à-dire, une décharge entre une cellule de l'enroulement et la cuve, l'allure de la tension à l'entrée de la 1^{ière} cellule est illustrée dans la FIGURE 4.16, comme nous le voyons une baisse importante ce cette tension dans le cas de la décharge partielle, son maximum est de 79.4KV sans décharge et de 2.74KV

avec décharge.

La FIGURE 4.17 montre que le courant de la ligne généré par la surtension passe quasiment en totalité par la décharge partielle.

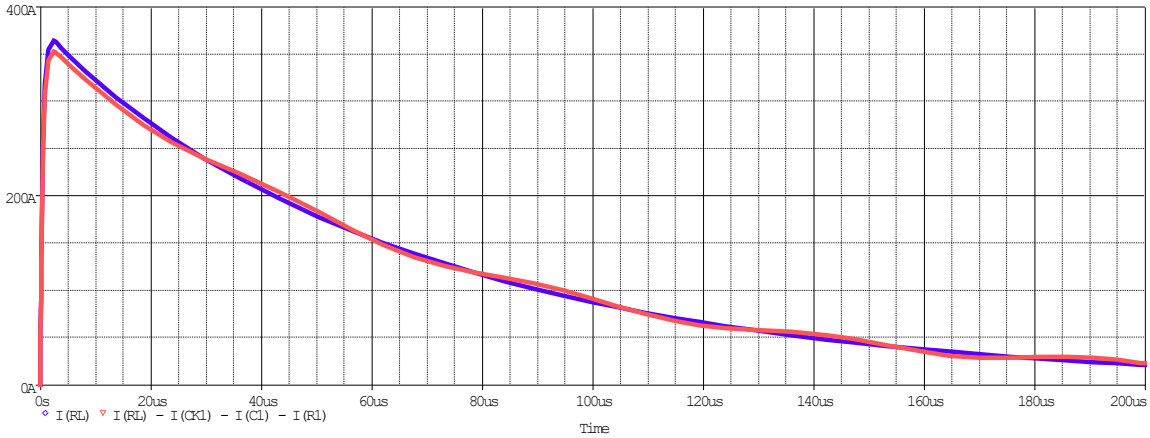


FIGURE 4.17 – Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle à l'extrémité de l'enroulement (en rouge) dans le cas d'une décharge en transversal entre la 1^{ière} cellule et la cuve.

Présence d'une décharge partielle au milieu de l'enroulement

Dans ce cas, les tensions dans l'enroulement sont montrées dans la figure suivante.

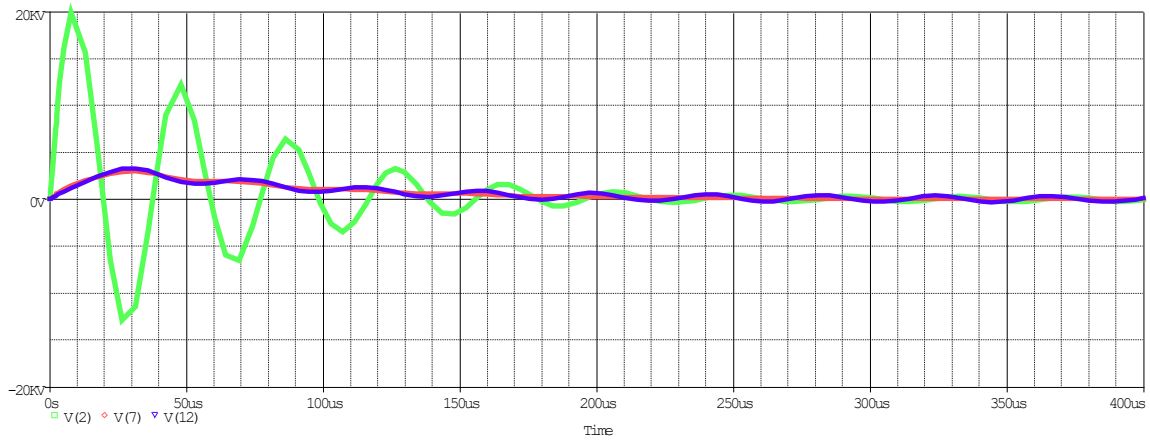


FIGURE 4.18 – Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre isolé de la terre et présence de la décharge partielle entre la cuve et la 3^{ième} cellule.

La comparaison entre le courant de la ligne et le courant circulant dans la DP est

représentée dans la figure ci-dessous.

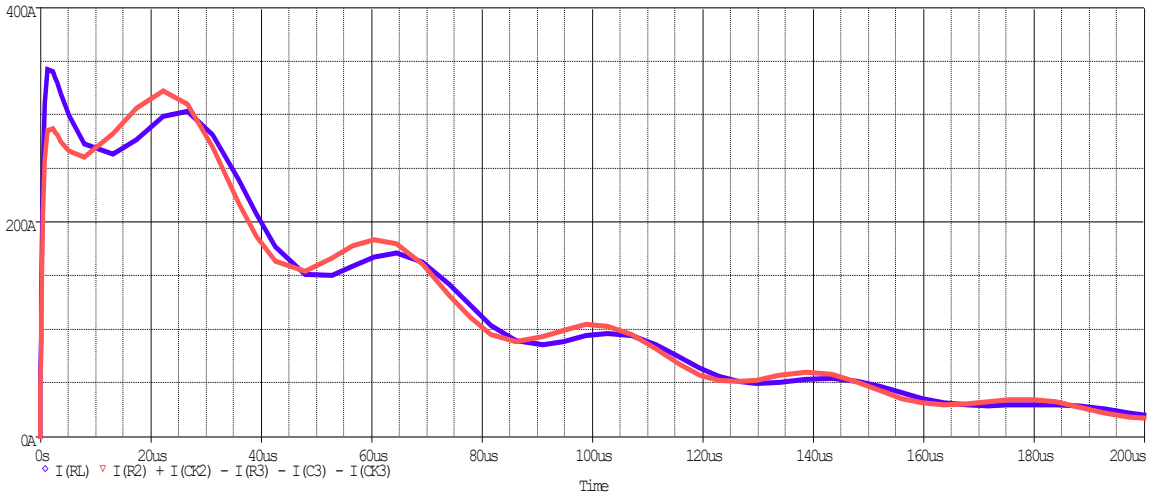


FIGURE 4.18 – Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle à l'extrémité de l'enroulement (en rouge) dans le cas d'une décharge en transversal entre la 3ème cellule et la cuve.

Comme dans le cas d'une décharge partielle au début de l'enroulement la décharge partielle au milieu a le même effet sur la tension et sur le courant.

- **Présence d'une décharge partielle à l'extrémité de l'enroulement**

Dans ce cas les allures des tensions sont comme suit :

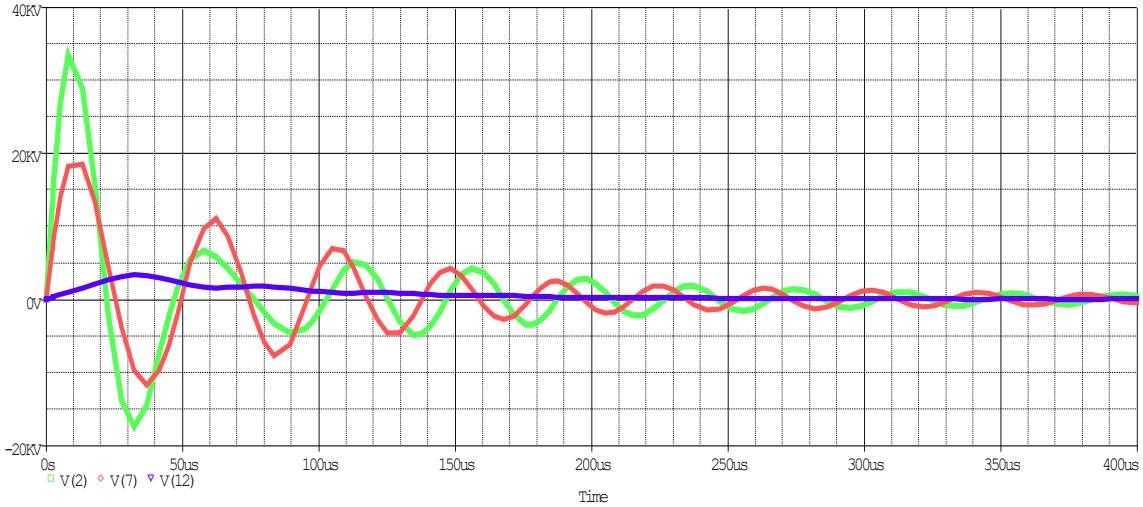


FIGURE 4.19 – Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre isolé de la terre et présence de la décharge partielle entre la cuve et la 5ième cellule.

La figure suivante illustre la comparaison entre le courant de la ligne et le courant de la

DP.

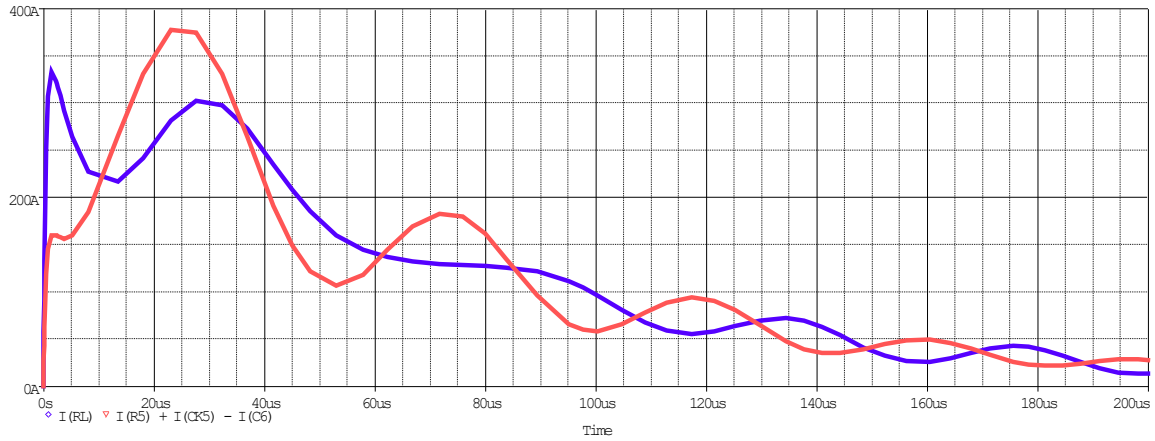


FIGURE 4.20 – Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle à l'extrémité de l'enroulement (en rouge) dans le cas d'une décharge en transversal entre la 5ème cellule et la cuve.

La figure 4.20 illustre la comparaison entre le courant de la ligne qui a un maximum de 332A, et le courant circulant dans la décharge partielle qui a une valeur maximale de 377A.

4.5.2. Propagation des ondes de surtension en présence d'une décharge partielle sans protection par parafoudre avec mise à la terre

4.5.2.1. Présence d'une décharge partielle en longitudinal

Les tensions le long de l'enroulement sont montrées sur la figure suivante.

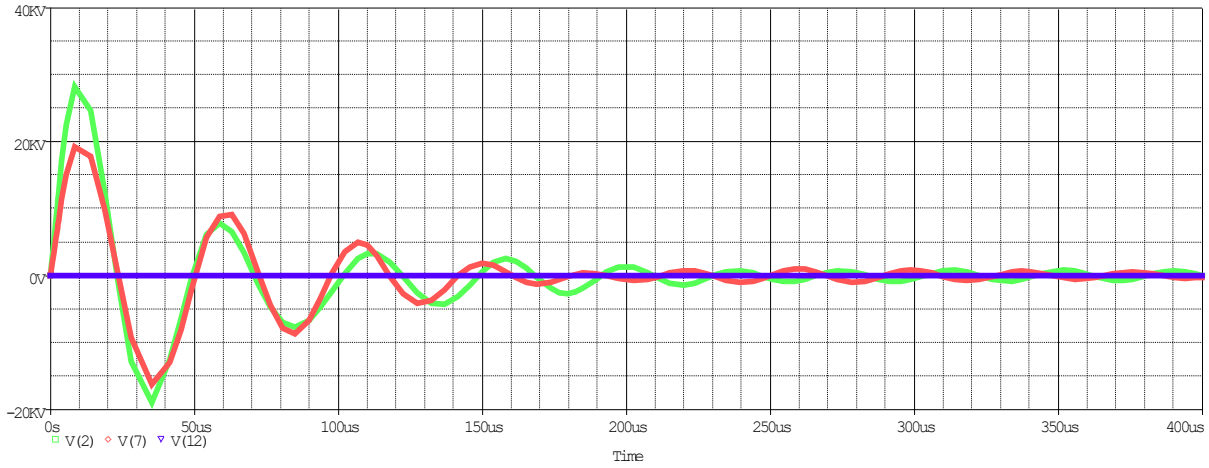


FIGURE 4.21 – Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre mis à la terre, sans parafoudre et présence de la décharge partielle à la première cellule.

La figure 4.22 présente la comparaison entre le courant de la ligne et le courant de la DP.

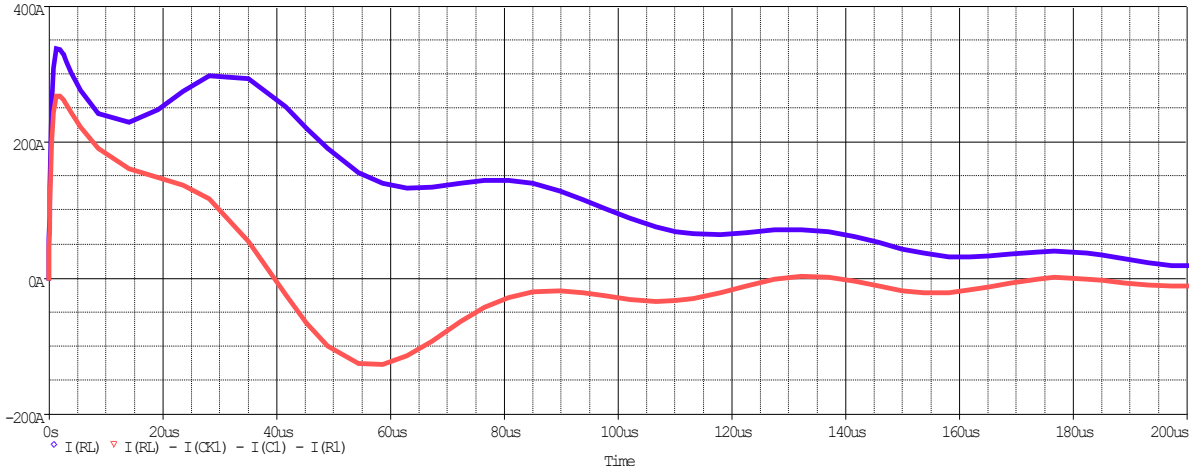


FIGURE 4.22 – Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle (en rouge) entre les bornes de la 1^{ière} cellule.

Pour une décharge partielle au milieu, et à l'extrémité de l'enroulement nous avons les mêmes allures que dans le cas d'une décharge au début de l'enroulement.

4.5.2.2. Présence d'une décharge partielle en transversal

Présence d'une décharge partielle au début de l'enroulement

Dans ce cas, les tensions dans l'enroulement sont montrées sur la figure 4.23.

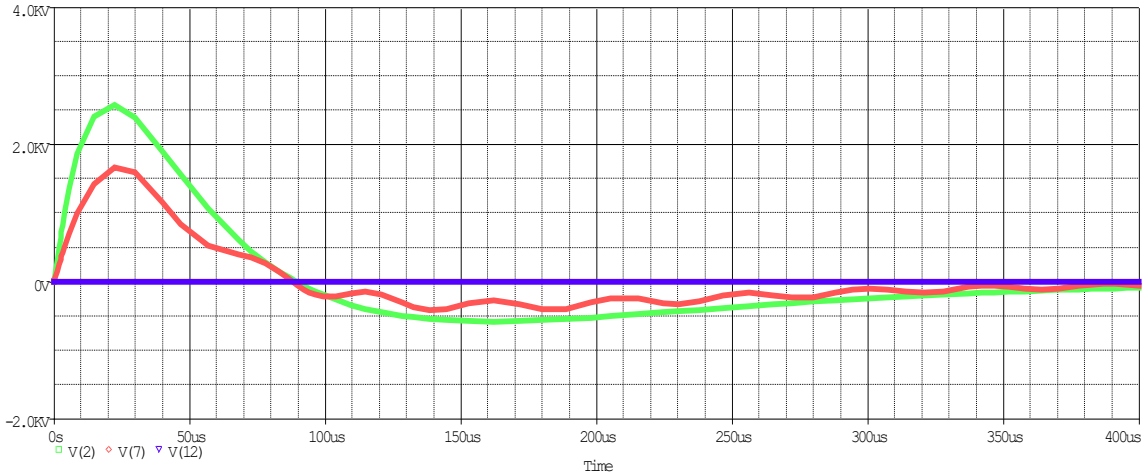


FIGURE 4.23 – Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre isolé de la terre, sans parafoudre et présence de la décharge partielle entre la cuve et la 1^{ière} cellule.

La figure ci-dessous montre la comparaison entre le courant de la ligne et le courant de la DP.

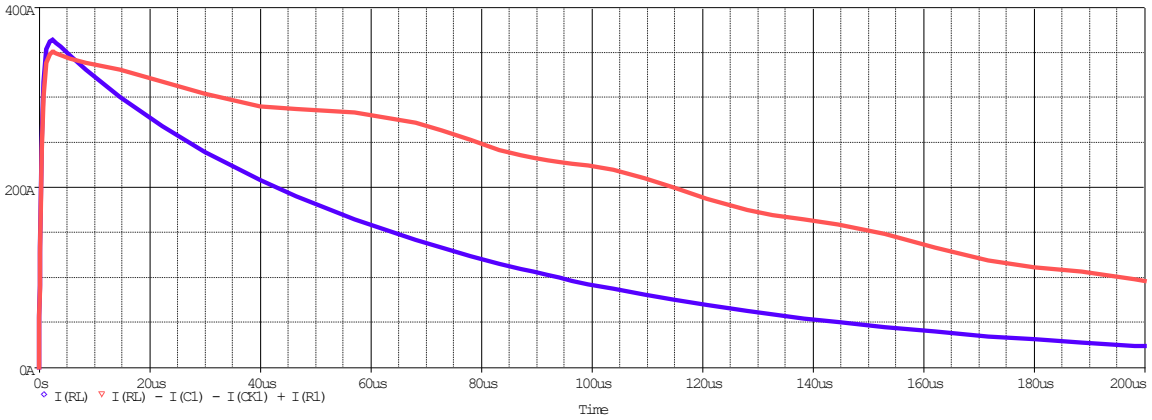


FIGURE 4.24 – Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle (en rouge) entre la 1^{ière} cellule et la cuve.

Comme nous pouvons le voir sur les figures 4.23 et 4.24, les tensions au début, au milieu et à l'extrémité de l'enroulement mis à la terre à la présence d'une décharge entre une cellule et la cuve sont négligeables (2.6KV) devant la tension de la surtension (110KV). Par contre le courant qui passe par la décharge partielle est très important.

Les mêmes remarques peuvent être dans les cas d'une décharge partielle au milieu et à l'extrémité de l'enroulement. Sauf que dans le cas d'une DP à l'extrémité de l'enroulement le courant traversant la DP qui est de 393A, dépasse la valeur maximale du courant généré par la surtension qui est de 332A, comme illustré dans la figure suivante.

La comparaison entre le courant de la ligne et celui de la DP est représentée dans la figure 4.25.

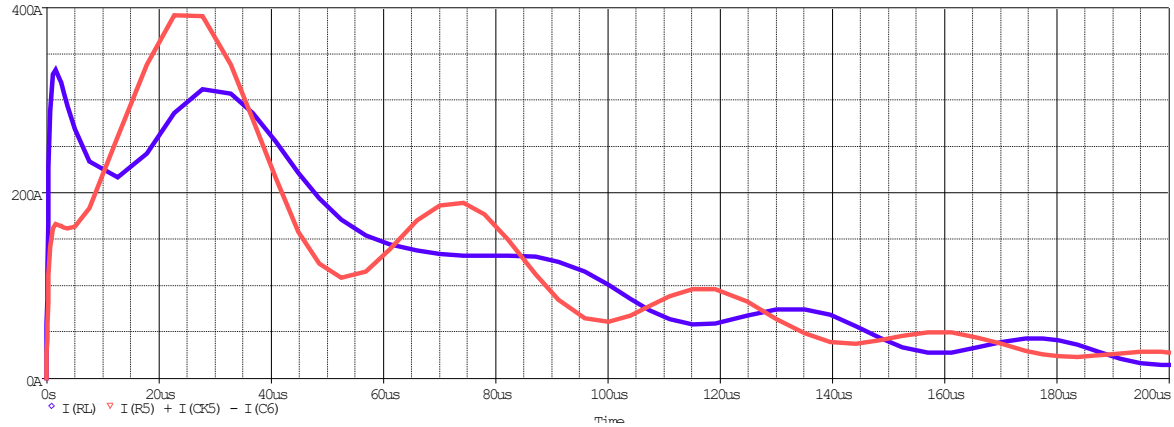


FIGURE 4.25 – Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle (en rouge) entre la 5ème cellule et la cuve.

4.5.3. Propagation des ondes de surtension en présence d'une décharge partielle avec protection par parafoudre et sans mise à la terre

La figure suivante représente les tensions le long de l'enroulement sans présence d'une décharge partielle.

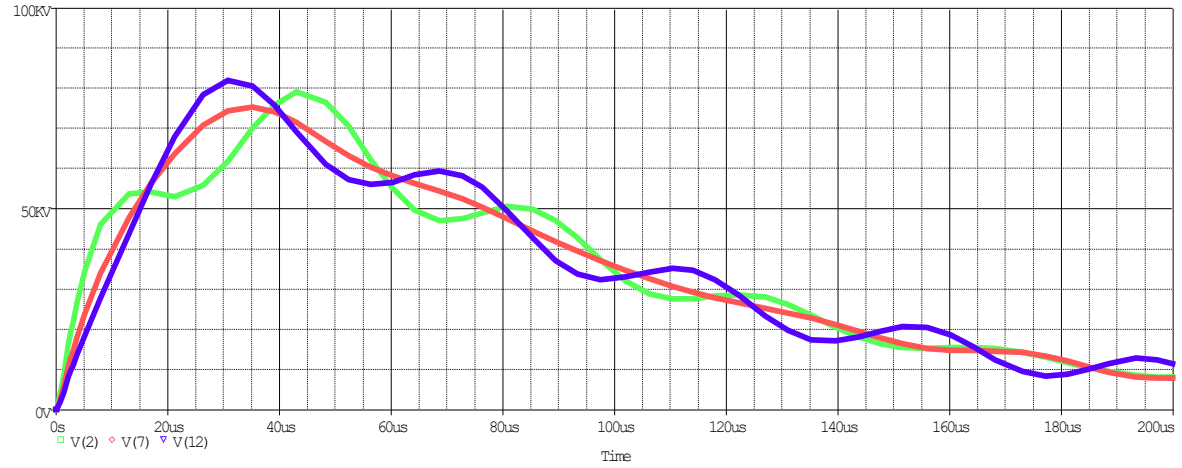


FIGURE 4.26 – Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre isolé de la terre, protégé par un parafoudre et sans décharge partielle.

4.5.3.1. Présence d'une décharge partielle en longitudinal

La figure 4.27 présente les tensions dans l'enroulement en présence d'un DP à l'entrée de l'enroulement.

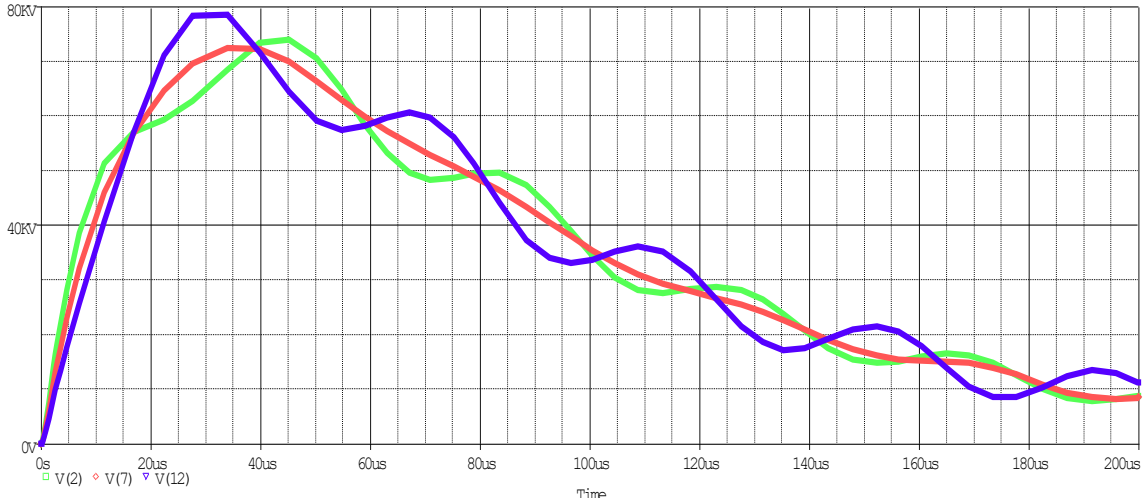


FIGURE 4.27 – Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement. Neutre isolé de la terre, protégé par un parafoudre et présence d'une DP entre les bornes de la 1^{ière} cellule.

La comparaison entre le courant de la ligne et le courant de la DP dans ce cas est illustrée sur la figure suivante.

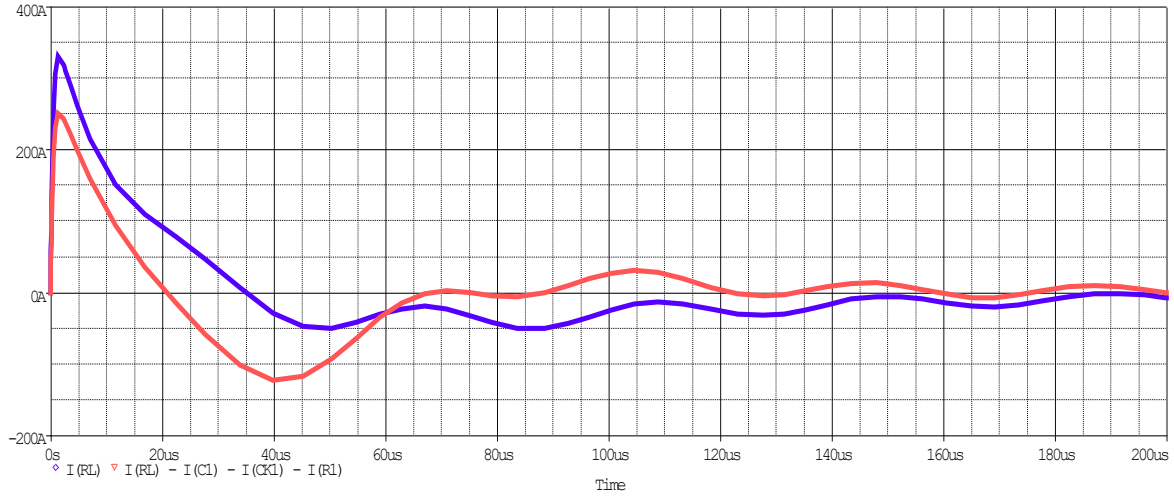


FIGURE 4.28 – Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant qui passe par la décharge partielle (en rouge) aux bornes de la 1^{ière} cellule.

Les mêmes allures sont observées pour une décharge partielle au milieu et à l'extrémité de l'enroulement, sauf que le courant à l'extrémité est faible par rapport au début.

4.5.3.2. Présence d'une décharge partielle en transversal

Dans ce cas les tensions dans l'enroulement sont illustrées sur la figure suivante.

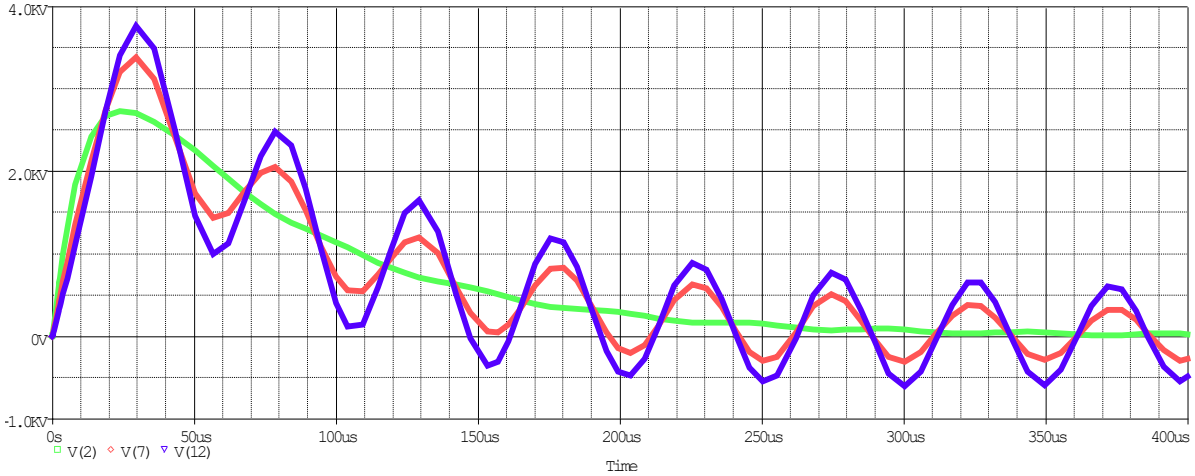


FIGURE 4.29 – Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement protégé par un parafoudre. Neutre isolé de la terre et présence d'une DP entre la 1^{ière} cellule et la cuve.

Si l'on compare les allures des ses tensions avec celles observées au début, au milieu et à la fin de l'enroulement en présence d'une PD au même endroit et sans parafoudre, nous

remarquons d'elles sont les mêmes allures.

Une comparaison entre le courant de la ligne et le courant de la DP est donnée sur la figure 4.30.

La figure ci-dessous montre la différence entre le courant de la ligne et le courant dans le DP.

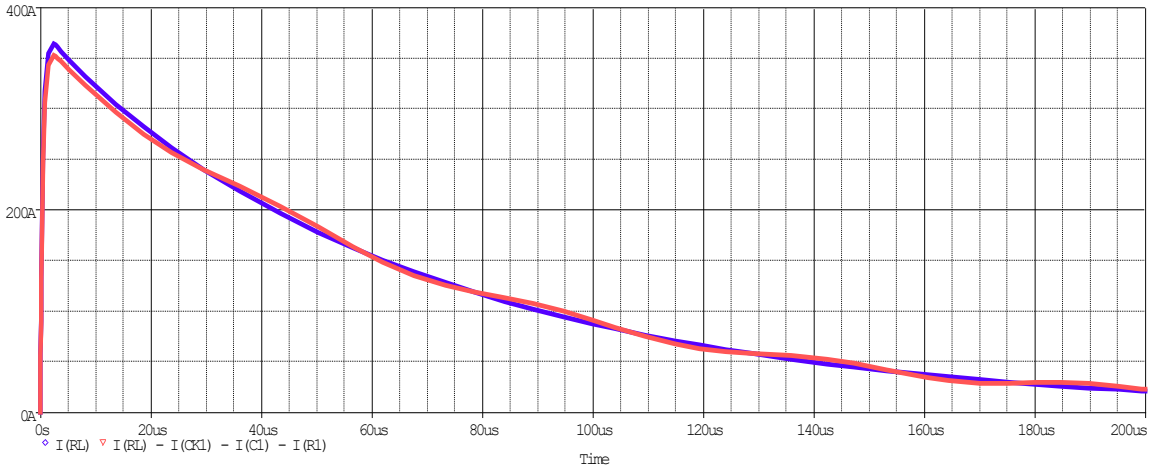


FIGURE 4.30 – Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant qui passe par la décharge partielle (en rouge) entre la 1^{ière} cellule et la cuve.

Les courants ont la même forme et ils sont presque identiques, c'est qui veut dire que le courant de la ligne passe entièrement par la DP.

En présence d'une DP au milieu de l'enroulement, les allures des tensions et des courants auront les mêmes allures que dans le cas de l'absence du parafoudre.

4.5.4. Propagation des ondes de surtension en présence d'une décharge partielle avec protection par parafoudre et avec mise à la terre

Dans ce cas, les tensions dans l'enroulement sont illustrées sur la figure suivante.

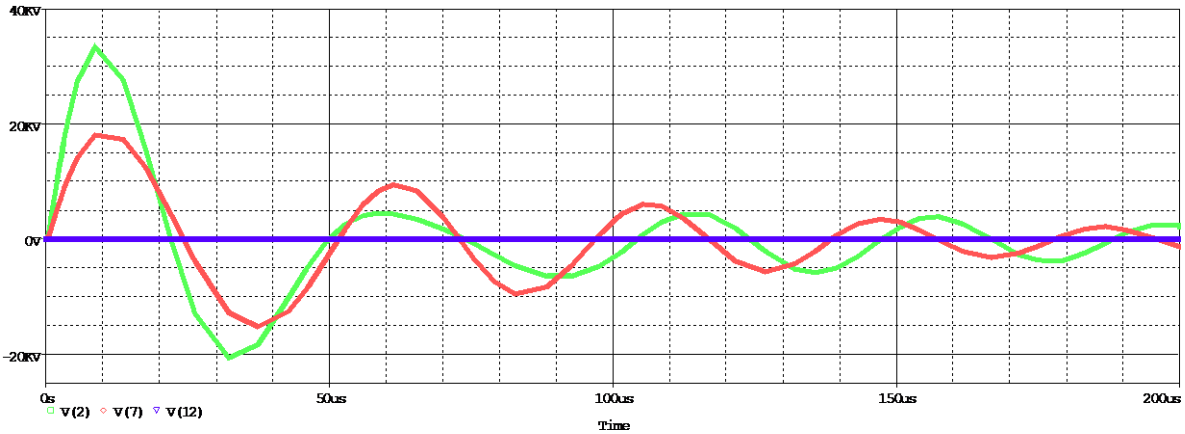


FIGURE 4.31 – Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement par parafoudre, le neutre relié à la terre, et absence d'une DP.

4.5.4.1. Présence d'une décharge partielle en longitudinal

Les tensions le long de l'enroulement dans ce cas sont données par la figure suivante.

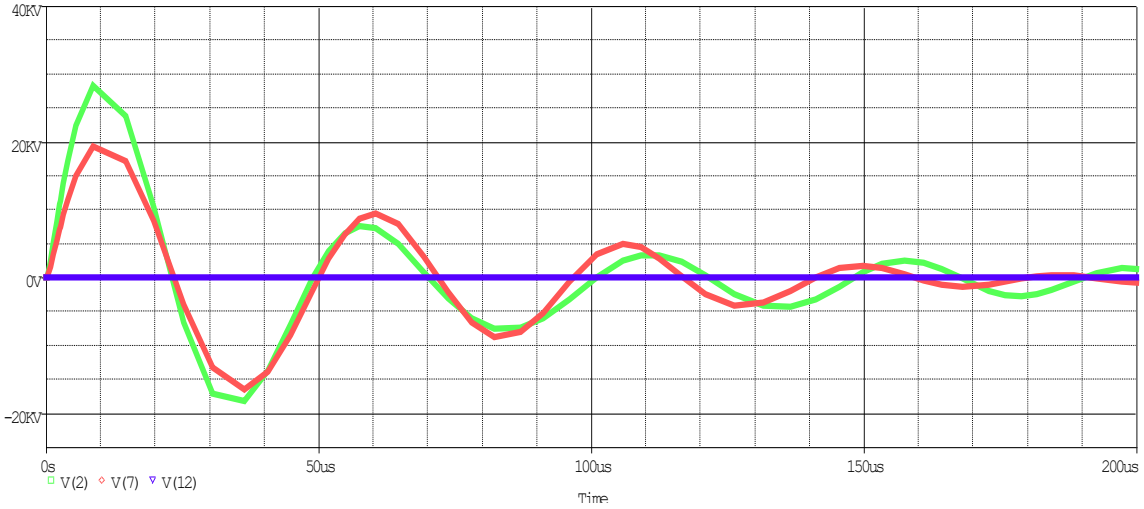


FIGURE 4.32 – Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement protégé par parafoudre, le neutre relié à la terre, et présence d'une DP entre les bornes de la première cellule.

Les courants de la ligne et de la DP sont comparés dans la figure 4.33.

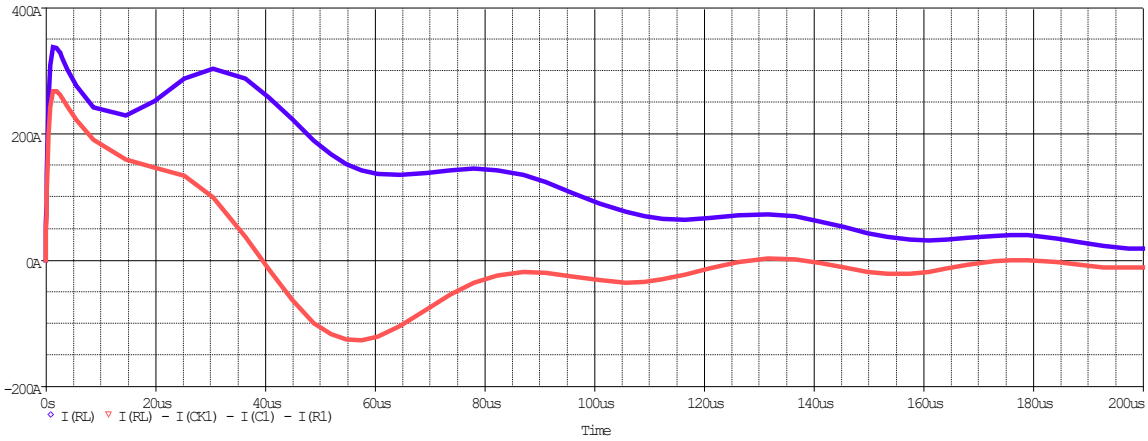


FIGURE 4.33 – Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle (en rouge) entre les bornes de la 1^{ière} cellule.

En comparant les allures des tensions et courant dans les cas d'une DP longitudinale au milieu et à l'extrémité de l'enroulement en présence et en absence d'un parafoudre, avec l'enroulement mis à la terre, nous obtenons des formes semblables.

4.5.4.2. Présence d'une décharge partielle en transversal

Les allures des tensions le long de l'enroulement sont illustrées dans ce cas dans sur la figure suivante.

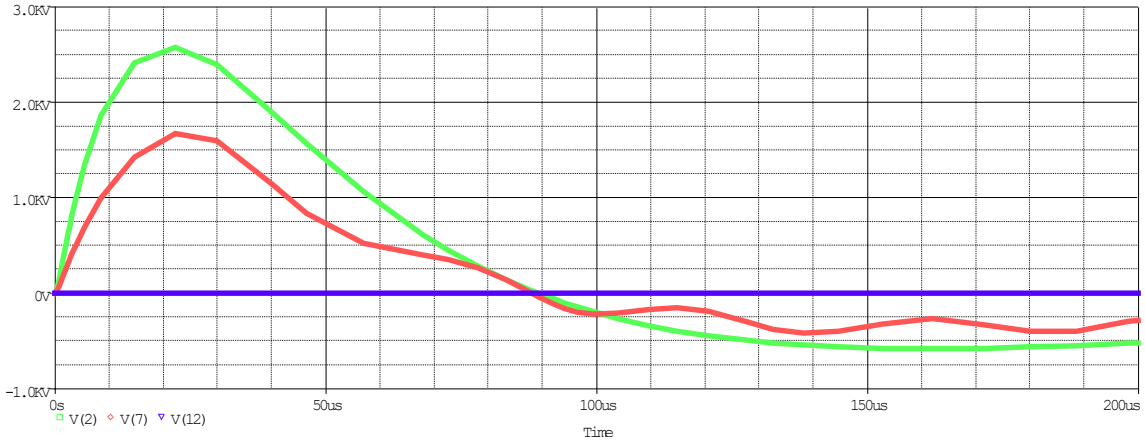


FIGURE 4.34 – Tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement protégé par parafoudre, le neutre relié à la terre, et présence d'une DP entre la première cellule et la cuve.

Le courant de la ligne et le courant dans la DP sont présentés dans la figure 4.35.

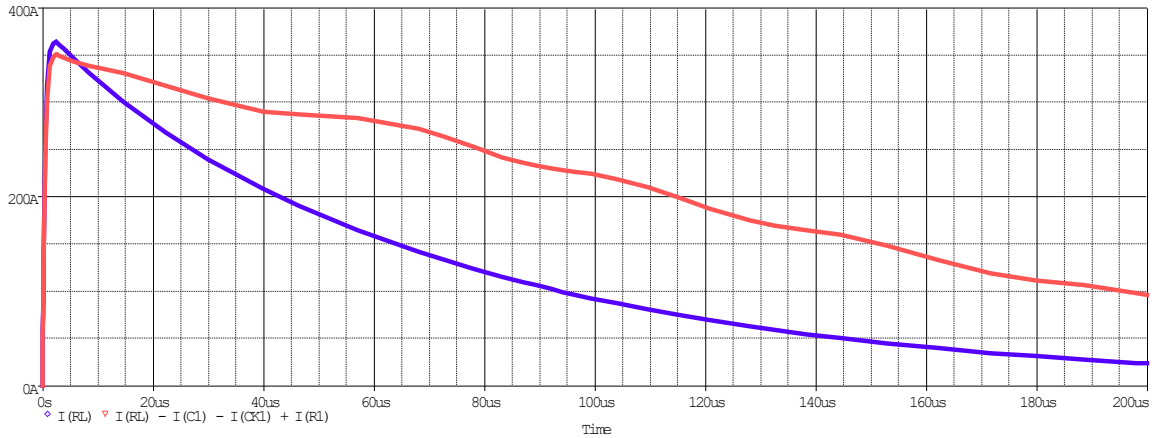


FIGURE 4.35 – Comparaison entre le courant de la ligne (en bleu) et le courant passant par la décharge partielle (en rouge) entre la 1^{ière} cellule et la cuve, enroulement mis à la terre en présence du parafoudre.

Comme nous pouvons le constater, dans le cas de la présence d'une DP en transversal dans un enroulement mis à la terre et protégé par un parafoudre, et dans le cas d'absence d'un parafoudre, les tensions et les courants ont les mêmes allures que ce soit au début de l'enroulement que au milieu et à l'extrémité.

4.6. Comparaison des différents cas étudiés

CAS		V_{2max}(KV)	V_{7max}(KV)	V_{12max}(KV)	I_{Lmax}(A)	I_{DPmax}(A)
Sans parafoudre sans mise à la terre DP longitudinale	Sain	79.15	75.46	82.08	326	
	Au Début	74.27	72.54	79.23	330.23	250.2
	Au milieu	78 .62	76.51	79.43	327	123
	A l'extrémité	79.42	75.47	81.33	323	21.94
Sans parafoudre Avec mise à la terre DP longitudinale	Sain	33.34	18	394mV	332.47	
	Au Début	28.23	19.26	388mV	337	267.80
	Au milieu	29.98	13.85	386.16mV	334.76	215.44
	A l'extrémité	30.57	14.56	368.59mV	334.14	332.57
Sans parafoudre sans mise à la terre DP transversale	Sain	79.15	75.46	82.08	326	
	Au Début	2.73	3.38	3.75	363.80	352.41
	Au milieu	19.88	2.98	3.31	341.59	322
	A l'extrémité	33.37	18.44	3.35	332.59	376.94
Sans parafoudre avec mise à la terre DP transversale	Sain	33.34	18	394mV	332.47	
	Au Début	2.57	1.66	129.73mV	363.82	348.55
	Au milieu	19.98	2.44	171mV	343.21	279.22
	A l'extrémité	32.28	18.02	391mV	332.5	391.04
Avec parafoudre sans mise à la terre DP longitudinale	Sain	79.04	75.37	82	326	
	Au Début	74	72.40	78.53	330.23	250.21
	Au milieu	79.34	78.50	78.61	327	123
	A l'extrémité	79.30	75.38	80.49	326.04	20.13
Avec parafoudre avec mise à la terre DP longitudinale	Sain	33.37	18	395.12mV	332.48	
	Au Début	28.19	19.25	392.21mV	337.07	267.81
	Au milieu	29.97	13.85	386.06mV	334.76	215.39
	A l'extrémité	30.53	14.55	372.36mV	334.14	288
Avec parafoudre sans mise à la terre DP transversale	Sain	79.04	75.37	82	326	
	Au Début	2.73	3.38	3.75	363.80	352.42
	Au milieu	19.88	2.98	3.13	341.59	321.96
	A l'extrémité	33.36	18.43	3.35	332.59	376.81
Avec parafoudre avec mise à la terre DP transversale	Sain	33.37	18	395.12mV	332.48	
	Au Début	2.57	1.66	129.92mV	363.82	348.55
	Au milieu	20	2.44	170.97mV	343.21	279.19
	A l'extrémité	32.25	18	390.83mV	332.50	390.87

TABLE 4.2– Valeurs maximales des tensions à l'entrée V(2), au milieu V(7) et à la sortie V(12) de l'enroulement et le courant de la ligne et le courant qui passe dans la DP dans les différents cas possibles.

Dans le cas d'une décharge partielle dans un enroulement sans parafoudre et sans mise à la terre, la présence de la DP au début de l'enroulement présente le cas le plus défavorable pour une DP en longitudinale. Le courant au point de présence de la DP atteint 77% de la valeur du courant de ligne. Dans le cas d'une DP transversale, le cas le plus dangereux est enregistré à la fin de l'enroulement, où le courant en ce point atteint environ 116% du de ligne.

Dans le cas où l'enroulement est mis à la terre et sans parafoudre, les courants enregistrés dans la zone de la décharge partielle en longitudinale sont importants, particulièrement lors de la présence de la PD à l'extrémité de l'enroulement, où le courant est au voisinage de la valeur du courant de la ligne, soit 332A. Cependant dans le cas d'une décharge partielle transversale, les courants dans la cellule affectée par la DP sont plus importants, particulièrement dans le cas où la décharge est présente à l'extrémité de l'enroulement, dont le courant dépasse 117% du courant de la ligne, cela peut s'explique du fait que le courant parcoure le chemin transversal où l'impédance est minimale.

Dans le cas où l'enroulement est équipé d'un parafoudre et sans mise à la terre, le courant le plus défavorable est celui de la présence d'une DP longitudinale au début de l'enroulement, le courant enregistré sur ce point est de l'ordre de 77%. Et dans le cas où la décharge est transversale, les courants sont de l'ordre du courant de ligne.

Dans le cas où l'enroulement est protégé par un parafoudre et mis à la terre, les courants enregistrés dans le cas de décharges longitudinales, sont en moyenne de 76% du courant de ligne. Cependant, les courants enregistrés dans le cas des DPs en transversal, sont importants dépassant 100% de la valeur du courant de la ligne.

D'après ces deux derniers cas étudiés ; les valeurs importantes des courants dépassant dans certains cas 100% du courant de ligne peuvent être à l'origine d'un contournement dans l'enceinte du transformateur qui peut être l'origine d'un percement de la cuve et de la détérioration de l'isolation et de présence des courts-circuits internes.

4.7. Conclusion

L'étude effectuée dans ce chapitre, nous a permis de comprendre l'impact des décharges partielles sur la propagation des surtensions atmosphériques.

Ces décharges partielles influencent la propagation des ondes de surtensions

atmosphériques, notamment par la naissance de courants de contournement aux points de présence des DPs. Ces phénomènes peuvent perturber les dispositifs de protection, accélérer la dégradation des isolants, et créer des surtensions secondaires et des points chauds internes, augmentant ainsi les risques de défaillance des systèmes électriques. Une surveillance proactive et des améliorations dans les matériaux et la conception des systèmes de protection sont indispensables pour limiter les effets destructeurs de ces interactions.

Conclusion générale

Les transformateurs de puissance sont des éléments essentiels des systèmes électriques, jouant un rôle central dans le transport et la distribution de l'énergie électrique. Ils permettent l'adaptation des niveaux de tension afin de minimiser les pertes lors du transport de l'électricité sur de longues distances et de la rendre accessible aux consommateurs finaux. En raison de l'importance croissante de la demande énergétique et de l'évolution des réseaux électriques, les transformateurs de puissance sont soumis à des exigences de performance toujours plus élevées, en termes de fiabilité, de durabilité et d'efficacité.

Malgré leur robustesse et leur efficacité, les transformateurs de puissance sont exposés à des défis techniques considérables. Les fluctuations de tension, les surtensions, les décharges partielles, le vieillissement des matériaux d'isolation, ainsi que les contraintes thermiques et mécaniques, sont autant de facteurs qui peuvent réduire leur durée de vie ou entraîner des pannes critiques.

Dans ce contexte, l'étude des transformateurs de puissance est cruciale pour garantir non seulement leur bon fonctionnement, mais aussi pour optimiser leur conception. L'étude présentée dans cette thèse vise à approfondir la compréhension des effets des décharges partielles (DP) dans les enroulements des transformateurs de puissance, un domaine crucial pour la fiabilité et la longévité des systèmes électriques. Parmi les méthodes de détection des décharges partielles, la méthode de Fréquence Réponse Analyse (FRA) est particulièrement efficace. C'est une méthode qui utilise l'analyse des réponses en fréquence d'un système pour détecter des anomalies, y compris les décharges partielles. Elle consiste à appliquer un signal d'excitation à un équipement et à mesurer la réponse en fréquence, ce qui permet d'identifier des variations qui peuvent indiquer des problèmes au niveau de l'isolation.

Une contribution majeure de ce travail réside dansla méthode FRA qui offre ainsi une capacité de diagnostic unique pour différencier les enroulements affectés par des décharges partielles, des courts-circuits et des circuits ouverts. Les variations distinctes dans la réponse en fréquence permettent d'identifier le type et l'emplacement des défauts, rendant cette méthode indispensable pour la maintenance prédictive et la prévention des pannes

catastrophiques dans les transformateurs de puissance. La compréhension de ces signatures spécifiques peut être approfondie par des études expérimentales et la modélisation numérique, afin d'améliorer encore la précision et l'efficacité de la méthode FRA dans le diagnostic des transformateurs.

Une autre partie de cette étude a examiné l'impact de la présence de décharges partielles sur la propagation des surtensions atmosphériques dans les enroulements. L'analyse a distingué les effets des DP longitudinales (entre les disques de l'enroulement) et transversales (entre les disques et la cuve). Les DP longitudinales affectent principalement la répartition de la surtension au sein des disques, augmentant ainsi le risque de dommages localisés. En revanche, les DP transversales modifient l'interaction entre l'enroulement et la cuve, influençant davantage la stabilité globale de la réponse du transformateur face aux surtensions. Ces résultats montrent que les DP, en fonction de leur localisation, peuvent amplifier les effets d'une surtension, et qu'une surveillance continue est nécessaire pour minimiser les risques de défaillance.

En conclusion, cette thèse a contribué de manière substantielle à l'approfondissement des connaissances sur les décharges partielles dans les transformateurs de puissance. Cependant, des travaux supplémentaires restent nécessaires pour étendre cette recherche, notamment à travers des études expérimentales plus poussées et des validations sur des transformateurs en conditions réelles. Une modélisation par éléments finis du transformateur avec prise en compte de la présence d'une décharge partielle est recommandée, pour mieux comprendre le comportement du bobinage. Les résultats obtenus ouvrent également la voie à de nouvelles innovations en matière de surveillance et de conception, qui peuvent aider à accroître la sécurité et la fiabilité des réseaux électriques à l'échelle mondiale.

Bibliographie

[1] LAMBERT, Michel. *Les transformateurs électriques: fonctionnement, mise en œuvre et exploitation*. Dunod, 2016.

[2] WINDERS, John. *Power transformers: principles and applications*. CrC Press, 2002.

[3] REFAAT, Shady S., SAYED, Mahmoud, SHAMS, Mohammed A., *et al.* A review of partial discharge detection techniques in power transformers. In : *2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. IEEE, 2018. p. 1020-1025.

[4] MOHAMED, Faisal Peer, SIEW, Wah Hoon, SORAGHAN, John J., *et al.* The use of power frequency current transformers as partial discharge sensors for underground cables. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, vol. 20, no 3, p. 814-824.

[5] SANCHEZ, Jean. *Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance*. 2011. Thèse de doctorat. Université de Grenoble.

[6] AZZOUZ, Zin-Eddine. *Modélisation 3D d'un transformateur de puissance. Etude de son comportement à haute fréquence*. 1992. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique Grenoble (INPG).DidierNilly.Lediagnosticd'étatdestransformateursdepuissance.2017.

[7] ABROR, Qurbonov. Development of Magnetic Characteristics of Power Transformers. *Fazliddin, A., Tuymurod, S., & Nosirovich, OO (2020). Use Of Recovery Boilers At Gas-Turbine Installations Of Compressor Stations And Thyristor Controls. The American Journal of Applied sciences*, 2020, vol. 2, no 09, p. 46-50.

[8] CHEW, En Phin. Superconducting transformer design and construction. 2010.

[9] SHAARBAFI, Karim. Transformer modelling guide. *Alberta Electric System Operator (AESO), Tech. Rep*, 2014.

[10] YANG, Beichao, WANG, Ruitian, XIAO, Fei, *et al.* Modeling and optimal design of inductor-integrated three-phase 3-D wound core transformer under SPWM excitation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, vol. 38, no 5, p. 6196-6211.

[11] TIISMUS, Hans, KALLASTE, Ants, BELAHCEN, Anouar, *et al.* Additive manufacturing and performance of E-type transformer core. *Energies*, 2021, vol. 14, no 11, p. 3278.

[12] LEFEVRE, Anthony. *Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et*

thermique des transformateurs: application à l'étude de l'échauffement sur charges non linéaires. 2006. Thèse de doctorat. Université de Nantes.

[13] OLIVARES-GALVAN, Juan Carlos, ASCENCION-MESTIZA, Hector, MAXIMOV, Serguei, *et al.* Design of a Three-Phase Shell-Type Distribution Transformer Using Evolutionary Algorithms. *Energies*, 2023, vol. 16, no 10, p. 4016.

[14] DEL VECCHIO, Robert M., POULIN, Bertrand, FEGHALI, Pierre T., *et al. Transformer design principles: with applications to core-form power transformers*. CRC press, 2001.

[15] VAN JAARSVELD, Barend Jacobus. *Wide-band modelling of an air-core power transformer winding*. 2013. Thèse de doctorat. Stellenbosch: Stellenbosch University.

[16] KARSAI, Károly, KERÉNYI, Dénes, et KISS, László. Large power transformers. 1987.

[17] DEL VECCHIO, R. M., POULIN, B., et AHUJA, R. Calculation and measurement of winding disk capacitances with wound-in-shields. *IEEE Transactions on Power delivery*, 1998, vol. 13, no 2, p. 503-509.

[18] SAIMON, SITI MAHFUZA BINTI. *SILICA ROD BASED OPTICAL FIBRE SENSOR FOR HIGH REFRACTIVE INDEX SENSING APPLICATION IN AGEING POWER TRANSFORMER OIL*. 2022. Thèse de doctorat. Universiti Teknologi Malaysia.

[19] ALKRAIMEEN, Yazid et GOMEZ, Pablo. Internal Fault Analysis in Disk-Type Transformer Winding Using Network Reduction. In : *2018 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT)*. IEEE, 2018. p. 0045-0051.

[20] KOLEY, Chiranjib, PURKAIT, Prithwiraj, et CHAKRAVORTI, Sivaji. Time-frequency representation of resistance for modeling of transformer winding under impulse test. *IEEE transactions on power delivery*, 2006, vol. 21, no 3, p. 1367-1374.

[21] ABB, Transformer Handbook, 3rd ed., 2007.

[22] A. C. Franklin and J. S. C. Franklin, J&P Transformer handbook, 11th ed.: Butterworth Heinemann, 1995.

[23] R. M. Del Vecchio, B. Poulin, P. T. Feghali, D. M. Shah, and R. Ahuja, Transformer design principles: With applications to core-form power transformers, 2nd ed.: CRC Press, 2010.

[24] AMIDOU, Betie. *Impacts de la qualité du système d'isolation sur la condition et l'efficacité des transformateurs de puissance*. 2015. Thèse de doctorat. Université du Québec à Chicoutimi.

[25] BOUAÏCHA, Abdelghafour. *Contribution à l'application de techniques traditionnelles et modernes au diagnostic des transformateurs de puissance*. 2014. Thèse de doctorat. Université du Québec à Chicoutimi.

[26] PARK, Chanyeop. Electret: An entirely new approach of solving partial discharge caused by triple points, sharp edges, bubbles, and airgaps. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, p. 78354-78366.

[27] HUSSAIN, Md Rashid, REFAAT, Shady S., et ABU-RUB, Haitham. Overview and partial discharge analysis of power transformers: A literature review. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, p. 64587-64605.

[28] MEYER, C., MÜLLER, S., GUREVICH, E. L., *et al.* Dielectric barrier discharges in analytical chemistry. *Analyst*, 2011, vol. 136, no 12, p. 2427-2440.

[29] NIU, Zheng, ZHANG, Cheng, SHAO, Tao, *et al.* Repetitive nanosecond-pulse dielectric barrier discharge and its application on surface modification of polymers. *Surface and Coatings Technology*, 2013, vol. 228, p. S578-S582.

[30] LEBEY, Thierry. Les décharges partielles dans le diagnostic des systèmes électriques. *J3eA*, 2005, vol. 4, p. 003.

[31] THI, A. Tho Vu. Propriétés diélectriques de matériaux isolants sous contraintes impulsionelle répétitive: Application aux modules de commutation en électronique de puissance. *Université de Grenoble*, 2011.

[32] RAX, Jean-Marcel. *Physique des plasmas: Cours et applications*. Dunod, 2005.

[33] BOUKADOUM, Redouane. *Étude des décharges partielles et de leur transition à l'arc dans la connectique aéronautique du futur*. 2018. Thèse de doctorat. Université Paris Saclay (COmUE).

[34] KREUGER, F. H., GULSKI, E., et KRIVDA, A. Classification of partial discharges. *IEEE transactions on Electrical Insulation*, 1993, vol. 28, no 6, p. 917-931.

[35] DANIKAS, Michael G. et TANAKA, Toshikatsu. Nanocomposites-a review of electrical treeing and breakdown. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2009, vol. 25, no 4, p. 19-25.

[36] VAN BRUNT, Richard J. Physics and chemistry of partial discharge and corona. Recent advances and future challenges. *IEEE Transactions on dielectrics and Electrical Insulation*, 1994, vol. 1, no 5, p. 761-784.

[37] SEGHIER, Tahar. *Etude des decharges partielles et leurs influences sur l'apparition des arborescenes dans la couche isolante des cables haute tension*. 2011. Thèse de doctorat. Faculté des sciences et de la technologie UMKBiskra.

[38] PUROHIT, Ashirbad. *Partial Discharge Modelling and Measurement of HV Insulation*. 2015. Thèse de doctorat.

[39] RODRÍGUEZ-SERNA, Johnatan M. et ALBARRACÍN-SÁNCHEZ, Ricardo. Numerical simulation of temperature and pressure changes due to partial discharges in spherical cavities within solid dielectrics at different ageing conditions. *Energies*, 2019, vol. 12, no 24, p. 4771.

[40] PATIL, Vaibhav, SINGH, Er Harpreet, et RADE, Er Prashant. PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT ANALYSIS ON RING MAIN UNIT.

[41] MORETTE, Nathalie. *Mesure et analyse par apprentissage artificiel des décharges partielles sous haute tension continue pour la reconnaissance de l'état de dégradation des isolants électriques*. 2020. Thèse de doctorat. Sorbonne Université.

[42] MORSHUIS, Peter HF. Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2005, vol. 12, no 5, p. 905-913.

[43] GALLOT-LAVALLÉE, Olivier. *Etude de la charge d'espace et des phénomènes luminescents comme précurseurs du vieillissement électrique d'une résine époxy utilisée dans l'isolation haute tension*. 2004. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III.

[44] DANIKAS, M. et MORSALIN, S. Foreign inclusions, enclosed cavities, partial discharge models and discharge energy: A short review regarding solid dielectrics and composite insulating systems. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 2019, vol. 9, no 5, p. 4659-4666.

[45] HUDON, C., BARTNIKAS, R., et WERTHEIMER, Michael R. Surface conductivity of epoxy specimens subjected to partial discharges. In : *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. IEEE, 1990. p. 153-155.

[46] TEMMEN, Katrin. Evaluation of surface changes in flat cavities due to ageing by means of

phase-angle resolved partial discharge measurement. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2000, vol. 33, no 6, p. 603.

[47] YUE, Ke, CHEN, Jiong, RUAN, Haojie, *et al.* Study on partial discharge model of solid insulator. In : *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. IEEE, 2016. p. 1-4.

[48] AFROUZI, Hadi Nabipour, HASSAN, Ateeb, CHEE, Daphne Tay Ye, *et al.* In-depth exploration of partial discharge modelling methods within insulations. *Cleaner Engineering and Technology*, 2022, vol. 6, p. 100390.

[49] IWATA, Shinya et KITANI, Ryota. Phase-resolved partial discharge analysis of different types of electrode systems using machine learning classification. *Electrical Engineering*, 2021, vol. 103, no 6, p. 3189-3199.

[50] AHMED, Zeeshan, *et al. Analysis and de-noising of partial discharge signals in medium voltage XLPE CABLES*. 2016. Thèse de maîtrise.

[51] DE, Eberhard Lemke, SE, Sonja Berlijn, NL, Edward Gulski, *et al.* Guide for Electrical Partial Discharge Measurements.

[52] SILI, Elyse. *Etude et caractérisation des décharges partielles et du vieillissement du polyimide en environnement aéronautique*. 2012. Thèse de doctorat. Toulouse 3.

[53] BLUFPAND, S. Y. Partial discharge recognition of defects in gas insulated systems under DC voltage. 2014.

[54] GULSKI, E., MEIJER, S., AGORIS, P., *et al.* Guidelines for unconventional partial discharge measurements. 2010.

[55] BERQUEZ, L. et FRANCESCHI, J. L. Détection acoustique des décharges partielles dans les films isolants polymères minces sous contrainte électrique. In : *Congrès Français d'acoustique*. 2006. p. 657-660.

[56] KARMAKAR, S., ROY, N. K., et KUMBHAKAR, P. Detection of partial discharges in a high voltage equipment. *Journal of Electrical Engineering*, 2009, vol. 9, p. 26-31.

[57] KOLIATENE, Flavien. *Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique*. 2009. Thèse de doctorat. Toulouse 3.

[58] HAYAKAWA, Naoki et OKUBO, Hitoshi. Partial discharge characteristics of inverter-fed

motor coil samples under ac and surge voltage conditions. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2005, vol. 21, no 1, p. 5-10.

[59] MILLET, C., NGUYEN, Duc Ngoc, LEPINE, L., *et al.* Case study-high ozone concentration in hydro generators. In : *2009 IEEE Electrical Insulation Conference*. IEEE, 2009. p. 178-182.

[60] ODIC, Emmanuel, ERIC, Jouseau, GAËTAN, Vivien, *et al.* Characterization of medium voltage equipment ageing by monitoring of partial discharges chemical and acoustical emission. In : *10th International Electrical Insulation Conf. INSUCON 2006*. 2006. p. 24-29.

[61] JIN, Lan, KIM, Dowon, ABU-SIADA, Ahmed, *et al.* Oil-immersed power transformer condition monitoring methodologies: A review. *Energies*, 2022, vol. 15, no 9, p. 3379.

[62] THAWEEWONG, Teerapat. *Frequency response analysis for power transformer*. 2020. Thèse de doctorat.

[63] SATISH, L. et SAHOO, Subrat K. Locating faults in a transformer winding: An experimental study. *Electric Power Systems Research*, 2009, vol. 79, no 1, p. 89-97

[64] RAGAVAN, K. et SATISH, L. Localization of changes in a model winding based on terminal measurements: Experimental study. *IEEE transactions on power delivery*, 2007, vol. 22, no 3, p. 1557-1565.

[65] TANG, W. H., WU, Q. H., TANG, W. H., *et al.* Transformer Condition Assessment Using Dissolved Gas Analysis. *Condition Monitoring and Assessment of Power Transformers Using Computational Intelligence*, 2011, p. 95-104.

[66] RAHIMPOUR, Hossein. *The Practical Field Measurement Challenges of Transformer FRA and Developing the Fundamentals for an On-line Approach*. 2018. Thèse de doctorat. Master Thesis. Master of Philosophy in Electrical Engineering. The University of Newcastle.

[67] SWEETSER, Charles et MCGRAIL, Tony. Sweep frequency response analysis transformer applications. *A technical paper from Doble Engineering*, 2003, vol. 1.

[68] BOUCHAOUI, Lahcene. *Modélisation et diagnostic du comportement dynamique des transformateurs de puissance par les méthodes complémentaires: AGD, RNA et Essais FRA*. 2023. Thèse de doctorat.

[69] Modélisation électronique et électromagnétique d'un transformateur haute fréquence à circuit magnétique en fonte François Blache.

[70] MOUSAVI, Seyedali. *Electromagnetic modelling of power transformers for study and mitigation of effects of GICs*. 2015. Thèse de doctorat. KTH Royal Institute of Technology.

[71] ZITOUNI, Mokhtar. *Amélioration de la protection différentielle numérique des transformateurs de puissance par la détection, la localisation et l'exploitation des courants inverses*. 2022. Thèse de doctorat.

[72] FOUINEAU, Alexis. *Méthodologies de Conception de Transformateurs Moyenne Fréquence pour application aux réseaux haute tension et réseaux ferroviaires*. 2019. Thèse de doctorat. Université de Lyon.

[73] KUJUNDŽIĆ, Goran, KALFIĆ, Vinko, et BAGO, Drago. *Equivalent Circuit Parameters for Power Transformer and Implementation of Open and Short Circuit Test Simulation in Matlab (SIMULINK)*. *B&H Electrical Engineering*, 2022, vol. 16, no 2, p. 11-19.

[74] TABAGA, Saleh. *Modélisation du comportement fréquentiel du transformateur: détermination des paramètres du schéma équivalent par la méthode des éléments finis en géométries 2D et 3D*. 1995. Thèse de doctorat. Grenoble INPG.

[75] D'AMORE M., SALEMO M., "*Simplified models for simulating transformer windings subjected to impulse voltage"*, paper N° A 79 431-8, presented at the IEEE PES Summer Meeting, July 15-20, 1979.

[76] FOTHERGILL, John C., DEVINE, Philip W., et LEFLEY, Paul W. A novel prototype design for a transformer for high voltage, high frequency, high power use. *IEEE transactions on power delivery*, 2001, vol. 16, no 1, p. 89-98.

[77] CERVERO, David, FOTOPOULOU, Maria, MUÑOZ-CRUZADO, Jesús, *et al.* Solid state transformers: a critical review of projects with relevant prototypes and demonstrators. *Electronics*, 2023, vol. 12, no 4, p. 931.

[78] HELLER B., VEVERKA A., "Les phénomènes de chocs dans les machines électriques", Ed. Dunod, Paris, 1963.

[79] KUSUMADEVI, G. H. et GURUMURTHY, G. R. Experimental studies on power transformer model winding provided with MOVs. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2017, vol. 4, no 1, p. 279-288.

[80] TOSCANI, Nicola, BRUNETTI, Massimo, CARMELI, Maria Stefania, *et al.* Design

of a Rotary Transformer for Installations on Large Shafts. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no 6, p. 2932.

[81] TRAN, Anh Tuan. *Modélisation de la propagation des signaux HF dans un réseau d'énergie électrique*. 2006. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lyon.

[82] SIMA, Wenxia, PENG, Daixiao, YANG, Ming, *et al.* Reversible wideband hybrid model of two-winding transformer including the core nonlinearity and EMTP implementation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, vol. 68, no 4, p. 3159-3169.

[83] RAKOTOMALALA, Andrianirina. *Contribution à la modélisation des transformateurs de puissance en régimes hautes fréquences*. 1996. Thèse de doctorat. Ecully, Ecole centrale de Lyon.

[84] HOUASSINE, Hamza. *Etudes des surtensions dans les blocs alternateur-transformateurs des centrales électriques*. 2010. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.

[85] AHMAD, Ahmad. *Contribution à la modélisation des transformateurs de puissance et de leur comportement en haute fréquence*. 1992. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lyon.

[86] F. Leon, A. Semlyen, " Time domain modelling of eddy current effects for transformer transients.", IEEE Transaction on power delivery Vol :8,No:1, January 1993.

[87] RASHTCHI, Vahid, SHAYEGHI, Hossein, MAHDAVI, M., *et al.* Using an improved PSO algorithm for parameter identification of transformer detailed model. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems Engineering*, 2008, vol. 1, no 3, p. 138-144.

[88] VAHIDI, Behrooz et NAGHIZADEH, Ramezan Ali. *Principles and Modeling of the Power Transformers*. Springer Nature, 2023.

[89] SRIKANTA MURTHY, Avinash, AZIS, Norhafiz, JASNI, Jasronita, *et al.* Extraction of winding parameters for 33/11 kV, 30 MVA transformer based on finite element method for frequency response modelling. *Plos one*, 2020, vol. 15, no 8, p. e0236409.

[90] POPOV, Marjan, VAN DER SLUIS, Lou, SMEETS, Ren Peter Paul, *et al.* Analysis of very fast transients in layer-type transformer windings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, vol. 22, no 1, p. 238-247.

[91] BANKS, Daniel Marc, BEKKER, Johannes Cornelius, et VERMEULEN, Hendrik Johannes. Investigating empirical mode decomposition in the parameter estimation of a three-section winding model. *Energies*, 2023, vol. 16, no 4, p. 1668.

[92] ZHANG, Fan, JI, Shengchang, MA, Hui, *et al.* Operational modal analysis of transformer windings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, vol. 35, no 3, p. 1285-1298.

[93] BENMAMAS, Loucif. *Méthodes d'évaluation du risque de décharges partielles dans le bobinage de machines électriques destinées à la traction automobile*. 2017. Thèse de doctorat. Université Paris Saclay (COmUE).

[94] AGARAWAL, Shailendra Kumar, MITTAL, Love Kumar, et JAFRI, Humaira. Simulation of partial discharge in high voltage power equipment. International Journal of Electronics, Electrical and Computational System IJEECS, 2017, vol. 6, no 8, p. 36-47.

[95] ACHILLIDES, Zenon, GEORGHIOU, George E., et KYRIAKIDES, Elias. Partial discharges and associated transients: the induced charge concept versus capacitive modeling. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, vol. 15, no 6, p. 1507-1516.

[96] THI, A. Tho Vu. Propriétés diélectriques de matériaux isolants sous contraintes impulsionelle répétitive: Application aux modules de commutation en électronique de puissance. Université de Grenoble, 2011.

[97] MARINI, Federico et WALCZAK, Beata. Particle swarm optimization (PSO). A tutorial. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2015, vol. 149, p. 153-165.

[98] JAIN, Meetu, SAIHJPAL, Vibha, SINGH, Narinder, *et al.* An overview of variants and advancements of PSO algorithm. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no 17, p. 8392.

[99] KADDOURI, Lakhdar, Synthèse de filtres récursifs bidimensionnels basée sur l'algorithme PSO. thèse de doctorat, université Ziane Achoue Djelfa, 2021.

[100] HADJI, Slimane. *Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque*. 2018. Thèse de doctorat.

[101] AZZAG, El-bahi. *Problèmes de contournement et perforation des isolateurs de haute tention*. 2007. Thèse de doctorat. Annaba.

[102]SMOLENSKI, AV Ivanov. *Machines électriques*. Tome 1. Editorial Mir, 1983.

[103] RYBAKOV, L. M., LASTOCHKIN, S. V., et KANJUGIN, O. I. Types of overvoltages in 10-35 kV distribution networks and modern methods and means of their limitation. In : *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2020. p. 012026.

[104] WANG, Jianguo, ZHAO, Yating, FANG, Yuquan, *et al.* Observation of overvoltage at the terminal of 10 kV distribution line by direct triggered lightning. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, vol. 37, no 5, p. 3547-3554.

[105] GAMEROTA, William R., ELISMÉ, Jean O., UMAN, Martin A., *et al.* Current waveforms for lightning simulation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, vol. 54, no 4, p. 880-888.

[106] BELKESSA, C., *et al. Etude et réalisation d'un générateur d'ondes de choc*. 2013. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.

[107] HTWE, Nay Kyi. Analysis and design selection of lightning arrester for distribution substation. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2008, vol. 48, p. 174-178.

[108] ABDULWADOOD, Shehab. Design of lightning arresters for electrical power systems protection. *Advances in electrical and electronic engineering*, 2013, vol. 11, no 6, p. 433-442.

[109] OGBUEFI, Uche C. et CAJETAN, M. Concept and Application of Lightning Arrester for 11kV Electric Power Systems Protection. *Asian Journal of Basic Science & Research (AJBSR)*, 2020, p. 35-49.

[110] CHANANE, Abdallah, HOUASSINE, Hamza, et BOUCHHIDA, Ouahid. Particle swarm optimization method for identification and localization of faults in a transformer winding. In : *2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*. IEEE, 2016. p. 1104-1109.

[111] AISSAOUI, Nassima, HOUASSINE, Hamza, et KABACHE, Nadir. Partial discharge detection in transformer winding using FRA analysis. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2022, vol. 98, no 8.