

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

**Département d'Électrotechnique**

**Mémoire de projet de fin d'études**

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en Électrotechnique

**Application de la méthode d'analyse fréquentielle pour le diagnostic des  
défaillances des enroulements du transformateur de puissance**

**ATTAB Dounia & NAIMA Bakhta**

Sous la direction de Omar TOUHAMI Professeur à l'ENP et Rachid SAHNOUNE  
CHAOUCHE Ing. à Sonatrach

Présenté et soutenu publiquement le (21/ 06/ 2023)

**Composition du jury :**

<b>Président :</b>	M. IBTIOUEN Rachid	Professeur ENP
<b>Promoteur :</b>	M. SAHNOUNE CHAOUCHE Rachid	Ingénieur Sonatrach
<b>Co-Promoteur :</b>	M. TOUHAMI Omar	Professeur ENP
<b>Examineur:</b>	M. BELKACEMI Rabie	MC ENP

ENP 2023



**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**



**Département d'Électrotechnique**

**Mémoire de projet de fin d'études**

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en Électrotechnique

**Application de la méthode d'analyse fréquentielle pour le diagnostic des  
défaillances des enroulements du transformateur de puissance**

**ATTAB Dounia & NAIMA Bakhta**

Sous la direction de Omar TOUHAMI Professeur à l'ENP et Rachid SAHNOUNE  
CHAOUCHE Ing. à Sonatrach

Présenté et soutenu publiquement le (21/ 06/ 2023)

**Composition du jury :**

<b>Président :</b>	M. IBTIOUEN Rachid	Professeur ENP
<b>Promoteur :</b>	M. SAHNOUNE CHAOUCHE Rachid	Ingénieur Sonatrach
<b>Co-Promoteur :</b>	M. TOUHAMI Omar	Professeur ENP
<b>Examineur:</b>	M. BELKACEMI Rabie	MC ENP

ENP 2023

إن تشخيص العيوب في لفائف المحولات القوية يعتبر أمرًا حاسمًا لضمان موثوقية الأنظمة الكهربائية. يركز هذا المشروع النهائي على استخدام تحليل التردد لتشخيص هذه العيوب. يتناول الفصل الأول مبادئ عمل المحولات ومختلف أنواع العيوب وتأثيرها على الأداء. يركز الفصل الثاني على نمذجة المحولات بناءً على تحليل التردد، في حين يقدم الفصل الثالث منهجية لتحسين نمذجة اللفائف بشكل آلي. يركز الفصل الأخير على اكتشاف العيوب المحورية باستخدام تحليل التردد. تسلط الخاتمة العامة الضوء على أهمية تحليل التردد في تشخيص العيوب في اللفائف وتسلط الضوء على النتائج المحققة. يتم أيضًا مناقشة آفاق البحث لتحسين مجال تشخيص محولات القوة.

**الكلمات المفتاحية:** المحولات القوية، نمذجة اللفائف، العيوب المحورية.

### Abstract

The diagnosis of faults in power transformer windings is crucial for ensuring the reliability of electrical systems. This final project focuses on the use of frequency analysis for diagnosing these faults. The first chapter covers the operating principles of transformers, the different types of faults, and their impact on performance. The second chapter explores frequency-based modeling of transformers, while the third chapter presents a methodology for automating winding modeling. The final chapter focuses on the detection of axial faults using frequency analysis. The general conclusion highlights the importance of frequency analysis in diagnosing winding faults and emphasizes the tangible contributions of this project. Research perspectives are also discussed for future improvements in the field of power transformer diagnostics.

**Key words:** power transformer, The diagnosis, the detection of axial faults

### Résumé

Le diagnostic des défauts dans les enroulements des transformateurs de puissance est crucial pour assurer la fiabilité des systèmes électriques. Ce projet final se concentre sur l'utilisation de l'analyse de fréquence pour diagnostiquer ces défauts. Le premier chapitre aborde les principes de fonctionnement des transformateurs, les différents types de défauts et leur impact sur les performances. Le deuxième chapitre se penche sur la modélisation des transformateurs basée sur l'analyse de fréquence, tandis que le troisième chapitre présente une méthodologie d'automatisation de la modélisation des enroulements. Le dernier chapitre se concentre sur la détection des défauts axiaux en utilisant l'analyse de fréquence. La conclusion générale met en évidence l'importance de l'analyse de fréquence dans le diagnostic des défauts d'enroulement et souligne les résultats obtenus. Des perspectives de recherche sont également abordées pour améliorer le domaine du diagnostic des transformateurs de puissance.

**Mots clé :** Enroulements des transformateurs de puissance, diagnostic de défauts, Détection des défauts axiaux, Analyse de réponse en fréquence.

# Remerciements

Cher Pr. TOUHAMI Omar et Dr. SAHNOUNE CHAOUICHE Rachid,

Nous tenons à vous adresser nos plus sincères remerciements pour votre encadrement et votre soutien tout au long de notre Projet de Fin d'Études (PFE). Votre expertise, vos conseils avisés et votre disponibilité ont été d'une importance capitale pour la réussite de notre travail.

Votre engagement envers notre équipe de recherche et votre passion pour l'excellence académique ont été une source constante d'inspiration pour nous. Votre volonté de partager vos connaissances et de nous guider dans nos travaux de recherche ont été des facteurs essentiels dans notre développement professionnel.

Nous souhaitons également exprimer notre profonde gratitude envers tous nos enseignants de l'École Nationale Polytechnique, spécifiquement dans le département d'électrotechnique. Votre expertise, vos enseignements et vos conseils éclairés ont grandement contribué à notre formation et à notre compréhension approfondie des concepts clés de notre domaine d'études.

Nous tenons enfin à remercier chaleureusement l'équipe de Sonatrach, où nous avons effectué notre stage de fin d'études. Votre accueil bienveillant, vos conseils professionnels et les opportunités de développement que vous nous avez offertes ont été d'une valeur inestimable.

Grâce à vous, nous avons pu acquérir une expérience pratique précieuse et nous intégrer efficacement dans le monde de l'industrie.

Nous voudrions vous assurer que nous apprécions énormément le temps et les efforts que vous avez consacrés à nous encadrer et à nous guider tout au long de notre projet. Votre mentorat et votre soutien continu resteront gravés dans notre mémoire tout au long de notre parcours professionnel.

Nous remercions particulièrement Mr **Rachid IBTIOUEN** professeur à l'ENP, qui nous a fait l'honneur de présider ce jury, ainsi que Mr **BELKACEMI Rabie** maître de conférences à l'ENP d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Encore une fois, nous tenons à vous exprimer notre gratitude la plus sincère pour votre contribution à notre Projet de Fin d'Études. Nous sommes conscients que nous n'aurions pas pu atteindre de tels résultats sans votre soutien indéfectible.

## Dédicace

*À mes chers Parents, je vous suis infiniment reconnaissant(e) pour votre amour inconditionnel, votre soutien financier et vos précieux conseils tout au long de mon parcours universitaire. Votre confiance en moi et votre encouragement constant ont été les piliers sur lesquels j'ai pu construire ma réussite académique. Votre dévouement et votre sacrifice pour mon éducation sont une source d'inspiration et de motivation pour moi.*

*À ma chère Sœur et mon cher Frère, je vous remercie du fond du cœur pour votre présence et votre soutien constants. Vos encouragements, vos conseils avisés et votre compréhension durant les moments de stress ont été d'une aide précieuse. Votre amour et votre soutien inconditionnels m'ont donné la force de persévérer et de surmonter les obstacles tout au long de ce parcours.*

*À mes chers Amis, je vous suis extrêmement reconnaissant(e) pour votre soutien indéfectible et votre amitié précieuse. Vos encouragements, vos discussions stimulantes et vos moments de détente ont été essentiels pour maintenir mon équilibre émotionnel et mental. Votre présence dans ma vie a rendu cette expérience universitaire encore plus mémorable et enrichissante.*

*Je suis conscient(e) que sans votre amour, votre soutien et votre confiance en moi, cette réalisation n'aurait pas été possible. Votre soutien moral, vos encouragements constants et votre présence à mes côtés ont été des moteurs essentiels de ma réussite.*

*En ce jour de remerciements, je tiens à vous dire combien je suis honoré(e) de vous avoir dans ma vie. Votre soutien inestimable a fait de moi la personne que je suis aujourd'hui. Je promets de continuer à poursuivre mes objectifs avec détermination et de faire honneur à votre confiance en moi.*

*Je vous adresse mes plus sincères remerciements et toute ma gratitude pour tout ce que vous avez fait pour moi.*

*Avec tout mon amour et ma reconnaissance.*

**[Dounia]**

## Dédicace

*Avec tous mes sentiments de respect, avec l'expérience de ma reconnaissance, Je dédie ma remise de diplôme et ma joie*

*À mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et de mon bonheur, ma lune qui éclaire chaque nuit sombre de ma vie et le fil d'espoir qui illumine mon chemin. À ma moitié, maman,*

*À celui qui m'a fait une femme, ma source de vie, d'amour et d'affection, à mon support qui était toujours à mes côtés, pour me soutenir et m'encourager, à mon roc solide et mon protecteur, à mon roi papa.*

*À mes chers frères et sœurs, dans vos sourires, je trouve du réconfort,*

*Dans vos épaules, je trouve le soutien nécessaire. Vous m'inspirez, vous me poussez à devenir meilleure, et dans vos yeux, je trouve la force d'avancer sans peur.*

*A Aya et Hadjer, Chaque instant passé avec vous est un trésor que je chéris au plus profond de mon cœur. Les souvenirs de nos rires partagés, de nos câlins chaleureux et de nos conversations sincères sont gravés dans mon être. Vous êtes mon refuge, mon havre de paix où je peux être moi-même sans réserve.*

*Cette journée est une victoire partagée, un moment où je me tiens fière et accomplie. Mais je sais que je n'aurais pas pu y arriver seule, C'est grâce à vous. Vous avez été là pour moi, dans les bons moments comme dans les moments difficiles. Votre soutien inconditionnel a été ma bouée de sauvetage lorsque les vagues de la vie se faisaient tumultueuses. Votre amour sincère m'a donné la confiance nécessaire pour aller de l'avant et réaliser mes rêves.*

*Avec tout mon amour, je vous remercie du fond du cœur pour chaque geste d'amour, chaque parole encourageante et chaque moment partagé. Vous avez joué un rôle essentiel dans ma réussite et mon épanouissement.*

*Avec une profonde affection et une gratitude infinie*

**[Bakhta]**

# Table des matières

Listes des Figures.....	.....
Listes des Tableaux .....	.....
Introduction générale .....	13
<b>1. Chapitre 1 : Surveillance et Diagnostic de l'état des Transformateurs.....</b>	<b>.....</b>
<b>1.1. Introduction.....</b>	<b>16</b>
<b>1.2. Transformateurs de puissance.....</b>	<b>17</b>
1.2.1. Principe de fonctionnement.....	17
1.2.2. Constitution.....	17
<b>1.3. Défautes de transformateur.....</b>	<b>20</b>
1.3.1. Défaut d'isolement de la partie active.....	20
1.3.2. Amorçage diélectrique entre spires.....	20
1.3.3. Court-circuit entre spires.....	20
1.3.4. Amorçage du corps insérable du régulateur en charge.....	21
1.3.5. Décharges Partielles.....	21
1.3.6. Point chaud interne au transformateur.....	21
1.3.7. Coupure du circuit électrique.....	21
1.3.8. Déformation géométrique des enroulements.....	21
<b>1.4. Analyse de défaillances et choix de la partie du transformateur à surveiller.....</b>	<b>22</b>
1.4.1. Analyse de l'emplacement des pannes.....	23
1.4.2. Analyse des modes de défaillance.....	23
1.4.3. Analyse des causes de défaillance.....	23
1.4.4. Analyse des effets externes.....	23
1.4.5. Choix de la partie du transformateur à surveiller.....	23
<b>1.5. Surveillance industrielle.....</b>	<b>24</b>
1.5.1. Définition.....	24
1.5.2. Composantes de la surveillance industrielle.....	24
<b>1.6. Classification des méthodes de surveillance.....</b>	<b>24</b>
1.6.1. Choix de la méthode de surveillance appropriée.....	25
<b>1.7. Le diagnostic de l'état des transformateurs.....</b>	<b>26</b>
1.7.1. Principales techniques de diagnostic des transformateurs Comparaison des techniques de diagnostic.....	26
1.7.2. Comparaison des techniques de diagnostic.....	28
1.7.3. Choix de la méthode de diagnostic appropriée.....	29
<b>1.8. Conclusion.....</b>	<b>29</b>
<b>2. Chapitre 2 : Modèles du transformateur en vue de l'analyse de la réponse en fréquence (FRA).....</b>	<b>.....</b>
<b>2.1. Introduction.....</b>	<b>32</b>
<b>2.2. Diagnostic à partir de l'analyse de la réponse fréquentielle FRA.....</b>	<b>32</b>
2.2.1. Analyse de la réponse en fréquence .....	32



2.2.2.	Objectifs de la FRA .....	33
2.2.3.	Principe du test .....	33
2.2.4.	Quand faut-il faire un test FRA?.....	34
2.2.5.	Types de connexions FRA.....	34
2.2.6.	Choix du type de connexion approprié.....	35
2.2.7.	Schéma de principe du test FRA.....	35
2.3.	Modélisation fréquentielle du transformateur .....	36
2.3.1.	Modèle de RESEL .....	37
2.3.2.	Modèle de Chimklai.....	37
2.3.3.	Modélisation par inductances propres et mutuelles .....	38
2.3.4.	Modèle d'Andrieu .....	39
2.3.5.	Modèle en $\pi$ du transformateur .....	40
2.3.6.	Modèle en cascade des cellules RLC parallèle .....	40
2.3.7.	Modèle mutuellement couplé .....	40
2.4.	Stratégies de modélisation des transformateurs orientées FRA .....	41
2.4.1.	Classification des modèles orientés FRA.....	42
2.4.2.	Modélisation de la réponse fréquentielle FRA.....	43
2.4.3.	Analyse et détermination des déformations dans les enroulements par la méthode FRA .....	46
2.5.	Conclusion.....	48
3.	Chapitre 3 : Modélisation des enroulements de transformateurs.....	
3.1.	Introduction.....	50
3.2.	Algorithme d'optimisation .....	51
3.2.1.	Signification.....	51
3.2.2.	Catégories.....	51
3.2.3.	Solution.....	52
3.2.4.	Algorithme ANT (optimisation des colonies de fourmis).....	52
3.3.	Modèle équivalent de l'enroulement du transformateur.....	53
3.4.	Interprétation de la morphologie du signal FRA.....	55
3.4.1.	Réponse en basse fréquence (sous-bande LFR) .....	56
3.4.2.	Réponse en moyenne fréquence (sous-bande MFR) .....	57
3.4.3.	Réponse en haute fréquence (sous-bande HFR) .....	58
3.5.	Auto-construction du modèle équivalent de l'enroulement de Transformateur.....	58
3.5.1.	Auto-détermination de la résistance et de l'inductance équivalente $R_{dc}, L_{eq}$ .....	58
3.5.2.	Auto estimations des inductances propres et mutuelles $l_s$ et $M$ .....	59
3.5.3.	Auto estimations des capacités séries et shunts $C_s$ et $C_g$ .....	60
3.6.	Description de la méthode « FRA-SMI » proposée pour automatiser la modélisation de l'enroulement du transformateur.....	62

3.7.	Validation expérimentale de la méthode proposée « FRA-SMI» .....	64
3.8.	Conclusion.....	70
4.	Chapitre 4 : localisation du déplacement axial .....	
4.1.	Introduction.....	72
4.2.	Enroulement et paramètres obtenus par l'analyse de réponse en fréquence (FRA) .....	72
4.3.	Paramètres principaux du modèle mutuellement couplé équivalent à un enroulement du transformateur.....	73
4.3.1.	Fréquences de résonances.....	73
4.3.2.	Inductance équivalente ( $L_{eq}$ ) de l'enroulement du transformateur.....	74
4.3.3.	Capacité shunt effective ( $C_{g,eff}$ ) .....	74
4.3.4.	Capacité équivalente ( $C_{eq}$ ) de l'enroulement.....	74
4.4.	Études des déplacements axial.....	74
4.4.1.	Test FRA avec aluminium, neutre flottant, 06 disques (court-circuit) avec un déplacement axial entre les disques 2 et 3.....	75
4.4.2.	Test FRA avec aluminium, neutre flottant, 06 disques (court-circuit) avec un déplacement axial entre les disques 5 et 6.....	76
4.5.	Diagnostic des défauts des bobinages du transformateur.....	77
4.5.1.	Localisation des déplacements axiaux.....	78
4.5.2.	Les caractéristiques de $\Delta L_{eq}$ en fonction de $\delta$ .....	88
4.5.3.	Les caractéristiques de $\Delta \Psi_{0cnfs}$ en fonction de x(nombre de disque) .....	91
4.6.	Conclusion.....	92
	Conclusion générale.....	94
	Références.....	97

## Liste des figures

<b>Figure 1.1 :</b> Analyse de l'emplacement des pannes basée sur 112 pannes majeures [2] .....	23
<b>Figure 1.2:</b> Classification des méthodes de surveillance [2] .....	25
<b>Figure 2.1 :</b> Déplacements radiaux (5 mm, 10 mm, 20 mm et 30 mm) du disque 01 .....	34
<b>Figure 2.2 :</b> Schéma de principe de test FRA.....	36
<b>Figure 2.3 :</b> Modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL.....	37
<b>Figure 2.4 :</b> Modèle du transformateur de Chimklai a) - circuit d'origine. b) - circuit simplifié .....	38
<b>Figure 2.5 :</b> Représentation d'un enroulement .....	39
<b>Figure 2.6 :</b> Modèle d'Andrieu .....	39
<b>Figure 2.7 :</b> Structure de modèle d'un quadripôle .....	40
<b>Figure 2.8 :</b> Modélé mutuellement couple équivalent a deux enroulements du transformateur .....	41
<b>Figure 2.9 :</b> Modèle de transformateur Vaessen (a) et Wilcox (b).....	42
<b>Figure 2.10 :</b> Alternatives pour la création d'un modèle à des fins de diagnostic par FRA.....	42
<b>Figure 2.11 :</b> circuit équivalent mutuellement coupler .....	43
<b>Figure 2.12 :</b> Réponse en fréquence que nous avons mesurée à l'université Dr. Yahia Farès de Médéa.....	44
<b>Figure 3.1 :</b> Modèle de circuit équivalent mutuellement couplé de l'enroulement de transformateur [2].....	54
<b>Figure 3.2:</b> Décomposition de la réponse fréquentielle FRA [2].....	55
<b>Figure 3.3:</b> Représentation graphique de la procédure proposée [7].....	63
<b>Figure 3.4:</b> Représentation du test FRA expérimentale de l'enroulements réels au laboratoire de l'université DR. YAHIA Fares de Médéa.....	64
<b>Figure 3.5:</b> Courbe FRA mesurée à l'état sain de l'enroulements réel.....	64
<b>Figure 3.6 :</b> Comparaison entre $Z(f)_{FR}$ Mesuré et celle estimé par FRA-SMI.....	67
<b>Figure 3.7 :</b> Circuit équivalent synthétisé de l'enroulement de transformateur sous test par FRA-SMI.....	69
<b>Figure 4.1 :</b> Points de résonances et d'antirésonances ( $O_{cnfs}$ et $S_{cnfs}$ ) de la réponse fréquentielle de l'enroulement.....	73

**Figure 4.2:** déplacement entre les disques 2 et 3 (5mm, 8 mm et 14 mm).....75

**Figure 4.3 :** Déplacement entre les disques 5 et 6 (5mm, 8 mm, 14 mm, 17mm et 20mm).....76

**Figure 4.4 :** schéma d'un enroulement a six double disque : (a) avant et (b) après un déplacement axial de l'ordre de  $\delta$  .....78

**Figure 4.5 :** déplacement axial entre D4 et D5 avec un déplacement plus ou moins important.....81

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1</b> : Défauts des transformateurs retenus et leurs types [2] .....	20
<b>Tableau 3.1</b> : valeur estimées des inductances (mH).....	66
<b>Tableau 3.2</b> : Valeurs estimées des capacités (pF).....	67
<b>Tableau 3.3</b> : Comparaison entre les fréquences propres mesurées et celles estimées.....	68
<b>Tableau 4.1</b> : Valeurs des fréquences de résonances et d'antirésonances ( $O_{cnfs}$ et $S_{cnfs}$ ).....	73

# **Introduction générale**

# Introduction générale

Le diagnostic de défauts dans les enroulements des transformateurs de puissance est essentiel pour assurer la fiabilité et le bon fonctionnement des systèmes électriques, [1]. Les transformateurs jouent un rôle essentiel dans les réseaux électriques, Cependant les défauts et/ou les pannes peuvent avoir un impact significatif sur l'économie et la sécurité des installations, [2].

L'objet de ce mémoire de PFE consiste à effectuer un diagnostic des défauts d'enroulements dans les transformateurs de puissance à l'aide d'analyse de réponse en fréquence (FRA). Cette dernière méthode conduit à une approche puissante pour examiner les caractéristiques des fréquences des signaux électriques et identifie les anomalies associées aux défauts des enroulements.

Nous avons divisé notre mémoire en quatre chapitres. Chaque chapitre traite d'un aspect spécifique du diagnostic des défauts d'enroulement dans les transformateurs de puissance.

Le premier chapitre, intitulé : "Surveillance et Diagnostic de l'état des Transformateurs", décrit les principes de fonctionnement des transformateurs de puissance ainsi que les différents types de défauts qui peuvent survenir. L'impact comportemental et l'analyse des défaillances sont présentés. Il souligne également l'importance de sélectionner les composants spécifiques du transformateur à surveiller. Une taxonomie des méthodes de surveillance est également proposée. Celle-ci décrit différentes approches disponibles. Enfin, ce chapitre décrit le modèle de suivi utilisé dans ce projet.

Le chapitre 2, traite de l'analyse de la réponse en fréquence orientée sur le modèle du transformateur. Nous considérons différentes classifications de modèles de transformateurs et nous nous concentrons sur la modélisation basée sur l'analyse fréquentielle. Ce chapitre présente également des techniques de modélisation ainsi que les modèles résultants qui constituent la base du diagnostic des défauts d'enroulement.

Le chapitre 3 présente la modélisation des enroulements du transformateur. L'algorithme d'optimisation spécifique utilisé est l'algorithme ANT (Optimisation des colonies de fourmis). Il présente également une méthodologie d'optimisation des enroulements et se concentre sur l'utilisation d'une bobine à 6 spires comme étude de cas. Les résultats expérimentaux sont comparés à ceux théoriques pour montrer l'efficacité de l'approche préconisée.

Enfin, Le dernier chapitre est consacré aux exemples pratiques et spécifiques, à savoir : la position du déplacement axial des enroulements du transformateur de puissance. L'analyse fréquentielle est également utilisée comme outil de détection pour localiser les défauts axiaux. Nous détaillons les

méthodes et techniques et soulignons l'efficacité des approches basées sur l'analyse de réponse en fréquence pour détecter ce type de défaut.

Finalement ce mémoire s'achève par une conclusion générale résumant les résultats obtenus dans les différents chapitres. Il met également en évidence l'importance de l'analyse de réponse en fréquence dans le diagnostic des défauts d'enroulement dans les transformateurs de puissance. Les limites des cas abordés, permettent d'entrevoir des perspectives pour l'amélioration dans le domaine du diagnostic des transformateurs de puissance.



**Chapitre 1 :**  
**Surveillance et**  
**Diagnostic de l'état**  
**des Transformateurs**

## 1.1. Introduction

Les transformateurs de puissance sont parmi les unités les plus coûteuses et les plus critiques d'un système électrique. Ils sont conçus pour résister à une variété de contraintes et de forces mécaniques pendant leur durée de vie. Par conséquent, leur état de santé suscite un grand intérêt. Comme les transformateurs de puissance sont principalement impliqués dans la transmission et la distribution de l'énergie, l'efficacité, la qualité et le coût économique des sociétés d'approvisionnement en énergie dépendent fortement de la fiabilité du service des transformateurs. L'intégrité mécanique de l'enroulement d'un transformateur a un impact significatif sur l'état de santé du transformateur, ce qui peut conduire à une panne non planifiée du transformateur de puissance. De plus, la maintenance des enroulements du transformateur de puissance est un travail long et fastidieux, au coût élevé, qui nécessite un expert pour réparer l'équipement sur le lieu de montage du transformateur de puissance ou le transport du transformateur vers la zone de réparation du fabricant. Pour cette raison, pour avoir un fonctionnement fiable du transformateur, il est nécessaire d'identifier les problèmes à un stade précoce avant qu'une catastrophe ne se produise. Malgré la maintenance corrective et prédictive, la maintenance préventive des transformateurs de puissance doit être prise en compte pour obtenir la plus grande fiabilité des appareils de puissance tels que les transformateurs de puissance, [2]

De nos jours, la tendance dans l'industrie est de passer de programmes de maintenance basés sur le temps à une maintenance basée sur les conditions. Au lieu de faire la maintenance à des intervalles réguliers et prédéterminés, elle est effectuée si l'on soupçonne que l'enroulement du transformateur est déformé. Par conséquent, il y a un besoin croissant d'une meilleure méthode de diagnostic non intrusive pour évaluer l'état interne des transformateurs de puissance.

Ce présent chapitre est organisé comme suit :

- 1- Caractéristiques techniques et opérationnelles des transformateurs.
- 2- La description d'analyse de défaillance et la surveillance industrielle.
- 3- Le diagnostic des transformateurs et le choix de la démarche de surveillance adéquate.

## 1.2. Transformateur de puissance

### 1.2.1. Principe de fonctionnement

#### 1.2.1.1. Principe général

Le principe de fonctionnement du transformateur est basé sur le phénomène d'induction électromagnétique ou loi de Faraday qui dit : "tout circuit électrique subissant une variation de flux est le siège d'une force électromotrice induite".

Le courant alternatif passe à travers l'un des enroulements, appelé l'enroulement primaire, créant un champ magnétique qui traverse le noyau. Ce champ magnétique induit un courant alternatif dans l'autre enroulement, appelé enroulement secondaire, qui est connecté à la charge, [3].

#### 1.2.1.2. Schéma électrique équivalent

Un transformateur réel, monophasé, peut être électriquement modélisé en utilisant les paramètres suivants :

Tels que  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $N_1$  et  $N_2$ , fixent les tensions nominales et le rapport de transformation à vide, tandis que les éléments passifs  $R_1$  et  $R_2$  représentent les résistances électriques des enroulements.

Les pertes Joule sont principalement dues au passage des courants  $I_1$  et  $I_2$  de charge dans ces résistances. Les réactances  $X_{L1}$  et  $X_{L2}$  correspondent aux flux de fuite de chacun des enroulements, tandis que l'impédance équivalente, qui correspond à  $X_{L1} + \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \times X_{L2}$  ramené au primaire, représente le flux de fuite de l'ensemble des deux enroulements. Cette impédance induit une chute de tension, qui varie en fonction de la charge et est représentative de l'impédance de court-circuit du transformateur. Elle est fortement influencée par la configuration géométrique des enroulements entre eux.

### 1.2.2. Constitution

Il est bien connu que la construction d'un transformateur de puissance varie d'un secteur à l'autre. L'arrangement de base est essentiellement le même et de légères modifications ont été apportées ces dernières années [2].

Donc, quel que soit le type de transformateurs de puissance, ils se composent généralement des parties principales suivantes :

#### ✓ Le circuit magnétique

Le noyau magnétique est la base constructive et mécanique du transformateur de puissance. Il est constitué des tôles d'acier électrique empilées et isolées les unes des autres. Cette

configuration permet de réduire les pertes par courant de Foucault et hystérésis qui se produisent lors de la variation périodique du flux magnétique.

Il existe principalement deux types de circuits magnétiques :

- **Type Cuirassé**

Ce type de transformateur est caractérisé par un circuit magnétique sous forme d'un tore (ou anneau) en matériau ferromagnétique, qui entoure complètement les enroulements des deux côtés.

La cuve qui entoure le tore assure un serrage efficace de l'ensemble, ce qui permet de minimiser les vibrations et les bruits générés par le transformateur en fonctionnement.

Les transformateurs toriques sont souvent utilisés dans les réseaux de transport et de distribution, car ils peuvent supporter des surtensions transitoires fréquentes. Les écrans sont utilisés pour réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages, ce qui permet d'améliorer la fiabilité et la durabilité du transformateur.

- **Type colonne**

Le transformateur à colonnes est en effet un type de transformateur à deux enroulements concentriques par phase. Les enroulements sont disposés l'un à l'intérieur de l'autre, sur le noyau ferromagnétique. Les extrémités de ce noyau sont refermées par des culasses, ce qui assure une bonne canalisation du flux magnétique à l'intérieur du transformateur. Ce type de circuit magnétique est dit à flux forcé.

Il est utilisé dans les réseaux de distribution et de transport d'électricité, car il peut supporter des niveaux de tension élevés. Sa conception compacte et sa grande efficacité énergétique en font un choix populaire pour les applications où l'espace est limité et la fiabilité est cruciale.

- ✓ **Circuit électrique**

Les enroulements du transformateur sont conçus avec un conducteur généralement en cuivre et sont montés sur le noyau. Le cuivre est un choix populaire pour les conducteurs d'enroulement en raison de ses propriétés électriques et mécaniques favorables.

Les formes de bobinages, les sections et les nombres de spires sont conditionnés par les contraintes à maîtriser en termes électriques, thermiques et mécaniques.

Afin de réduire le flux de fuite et optimiser l'immersion des bobines dans le champ il existe différents types d'enroulement, [4].

- **Bobinage concentrique simple**

Dans ce type de conception, le bobinage basse tension est enroulé en premier sur le noyau du transformateur, puis il est isolé à l'aide d'un matériau isolant approprié. Le bobinage haute tension est ensuite enroulé sur l'isolant du bobinage basse tension. Cette configuration permet de réduire les pertes d'énergie et les perturbations électromagnétiques.

- **Bobinage concentrique double**

Dans cette conception, la moitié du bobinage basse tension est enroulée sur le noyau du transformateur et isolée à l'aide d'un matériau isolant approprié. Ensuite, le bobinage haute tension est enroulé sur l'isolant du bobinage basse tension, suivi d'une nouvelle couche d'isolant. Finalement, la deuxième moitié du bobinage basse tension est enroulée sur l'isolant du bobinage haute tension, créant ainsi une structure en couches.

Cette configuration est utilisée pour les transformateurs de puissance à haute tension où les tensions peuvent atteindre plusieurs centaines de kilovolts. Elle permet d'isoler efficacement les différentes couches du bobinage pour éviter les court-circuits et les pertes d'énergie.

- **Bobinage à galette**

Dans ce type, les enroulements basse tension et haute tension sont divisés en plusieurs sections, qui sont ensuite enfilées en alternance sur le noyau du transformateur. Chaque section de l'enroulement est une couronne ou une galette isolée, qui est constituée d'un certain nombre de spires ou de disques empilés les uns sur les autres.

Cette méthode de bobinage peut être plus complexe et plus coûteuse à mettre en œuvre que les méthodes de bobinage classiques.

- ✓ **Cuve**

La cuve du transformateur est la structure métallique qui contient le noyau magnétique et les enroulements des transformateurs. Elle est généralement fabriquée à partir d'une tôle d'acier soudée, qui est ensuite revêtue d'une couche de peinture pour protéger contre la corrosion, [5].

Elle doit être suffisamment robuste pour supporter le poids du noyau magnétique et des enroulements, ainsi que les forces mécaniques qui peuvent être générées lors du fonctionnement du transformateur, telles que les forces électromagnétiques et les vibrations. Elle doit également être étanche à l'huile, car les transformateurs sont généralement remplis d'huile isolante pour refroidir et isoler les enroulements.

La cuve est équipée de plusieurs accessoires, tels que les robinets de dérivation de tension, les radiateurs de refroidissement, les vannes de vidange d'huile, les jauges de niveau d'huile et les

indicateurs de température. Ces accessoires permettent de surveiller et de contrôler le fonctionnement du transformateur, de maintenir le niveau d'huile correct et d'assurer le refroidissement adéquat, [6].

### 1.3. Défaits de transformateur

Le tableau suivant donne les échantillons relativement typiques des principaux défauts des transformateurs de puissance nécessitant une réparation.

Catégorie de défaut	Type de défaut
Diélectrique	Isolement de la partie active
	Amorçage diélectrique entre spires, sans court-circuit
	Court-circuit entre spires
	Amorçage du corps insérable du régulateur en charge
	Décharges Partielles
Electrique	Point chaud interne au transformateur
	Coupure du circuit électrique
Mécanique	Déformation géométrique des enroulements

**Tableau 1.1. Défaits des transformateurs retenus et leurs types [2]**

#### 1.3.1. Défaut d'isolement de la partie active

Le défaut d'isolement de la partie active se produit lorsque le niveau d'isolation du circuit diminue ou est perdu par rapport à son environnement. Ou risque que le courant électrique crée un court-circuit potentiellement dangereux, [2].

#### 1.3.2. Amorçage diélectrique entre spires

Cet amorçage se produit entre des spires appartenant au même enroulement d'un transformateur ou d'une bobine, sans que les conducteurs soient mis en court-circuit entre eux. Dans ce cas, la tension élevée appliquée au transformateur ou à la bobine peut entraîner une défaillance de l'isolation entre les spires.

#### 1.3.3. Court-circuit entre spires

Le court-circuit entre spires est un défaut électrique caractérisé par un contact électrique anormal entre des spires d'un même enroulement qui devraient être normalement isolées entre elles. Ce type de défaut peut survenir en raison d'une défaillance de l'isolation entre les spires qui peut être due à une surtension, à une surchauffe, à des vibrations, à des chocs mécaniques ou à d'autres facteurs.

### **1.3.4. Amorçage du corps insérable du régleur en charge**

L'amorçage du corps insérable ou commutateur, d'un régleur en charge peut en effet provoquer des court-circuits importants dans un petit volume. Lorsque l'amorçage se produit, cela peut provoquer une défaillance de l'isolation entre les parties conductrices du commutateur ce qui permet au courant électrique de circuler entre les contacts et de provoquer un court-circuit.

### **1.3.5. Décharges Partielles**

Les décharges partielles se produisent généralement lorsque l'isolant présente une faiblesse ou une imperfection, telle qu'une bulle d'air, une inclusion métallique ou une zone de faible densité. Ces imperfections peuvent provoquer une augmentation locale du champ électrique, ce qui peut entraîner une ionisation de l'isolant.

### **1.3.6. Point chaud interne au transformateur**

Un point chaud est en effet caractérisé par l'échauffement local interne d'une connexion précise du transformateur. Cela se produit généralement lorsque la connexion est défectueuse, ce qui peut provoquer une résistance électrique accrue à travers la connexion et une augmentation de la dissipation de chaleur.

### **1.3.7. Coupure du circuit électrique**

La coupure du circuit électrique peut avoir plusieurs causes, telles qu'une surcharge, un court-circuit, une panne de courant ou une intervention de maintenance planifiée.

### **1.3.8. Déformation géométrique des enroulements**

Les enroulements peuvent subir des déformations géométriques pour diverses raisons, comme une surchauffe, une contrainte mécanique excessive ou une mauvaise conception.

Ces déformations peuvent se manifester sous différentes formes, comme une déformation axiale, une déformation radiale ou une déformation angulaire.

#### **1.3.8.1. Défaut axial**

Le défaut axial que nous traitons dans notre mémoire de PFE est l'un des défauts les plus courants que l'on peut rencontrer dans les enroulements des transformateurs. Il se produit lorsque l'enroulement se déplace dans la direction axiale, c'est-à-dire dans le sens de l'axe du noyau du transformateur. Ce mouvement peut être causé par différentes raisons telles que : [7]

- **Les vibrations excessives** : Les vibrations peuvent être causées par des défauts mécaniques, électriques ou environnementaux. Les vibrations excessives peuvent provoquer un mouvement axial de l'enroulement, endommageant ainsi les connexions, les bobines ou les isolants.

- **Les dilatations thermiques :** Les dilatations thermiques peuvent être causées par des variations de température à l'intérieur du transformateur. Si ces dilatations ne sont pas compensées correctement, elles peuvent entraîner un mouvement axial des enroulements.
- **Les contraintes mécaniques :** Les contraintes mécaniques peuvent être causées par des déformations de la structure du transformateur ou par des défauts dans les pièces de fixation des enroulements.

Les effets du défaut axial peuvent être graves et peuvent entraîner des dommages permanents aux enroulements. Les connexions, les bobines et les isolants peuvent être endommagés, ce qui peut entraîner une perte de tension, une perte de puissance et une défaillance complète du transformateur.

Une fois le défaut détecté, il peut être corrigé en ajustant la tension de serrage des boulons de connexion ou en remplaçant les enroulements endommagés. Il est important de corriger rapidement le défaut axial pour éviter une défaillance complète du transformateur et garantir une exploitation sûre et fiable.

#### **1.3.8.2. Défaut radial**

Le défaut radial des enroulements d'un transformateur est un type de défaut qui peut se produire lorsqu'il y a une déformation dans une direction perpendiculaire à l'axe du noyau du transformateur. Les causes les plus courantes de ce défaut sont les vibrations excessives, les contraintes mécaniques et les courants de court-circuit, [8]

Les courants de court-circuit peuvent également causer des défauts radiaux. Lorsqu'un court-circuit se produit, un courant élevé circule dans l'enroulement, ce qui peut provoquer une surchauffe et une déformation des enroulements.

Les effets du défaut radial peuvent être graves et peuvent entraîner une perte de tension, une perte de puissance et une défaillance complète du transformateur.

### **1.4. Analyse de défaillances et choix de la partie du transformateur à surveiller**

Afin de sélectionner la partie du transformateur à surveiller, nous avons fait appel à un précieux travail d'analyse réalisé par Tenbohlen et al.



### 1.4.1. Analyse de la localisation des pannes

Les pannes majeures des transformateurs peuvent être causées par différents composants. Selon les statistiques, les changements de prise et les enroulements sont les deux causes principales de pannes majeures des transformateurs (environ un tiers chacun). Pour Les traversées, les sorties de plomb et le noyau, ils sont répertoriés comme ayant un pourcentage mineur dans les pannes majeures des transformateurs.

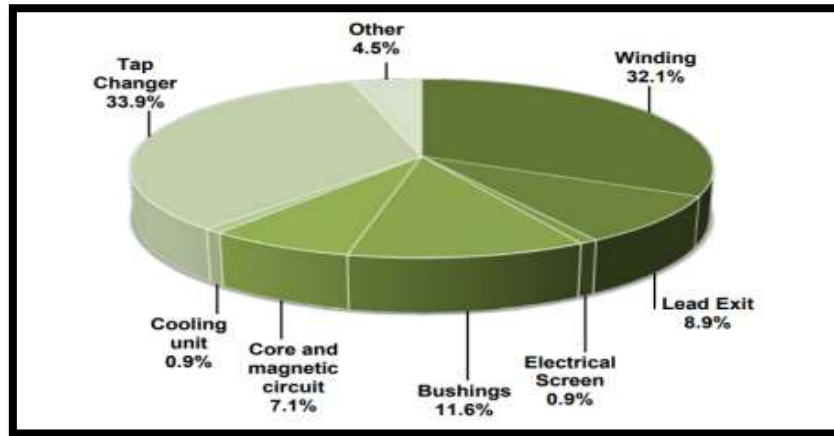


Figure 1.1. Analyse de l'emplacement des pannes basée sur 112 pannes majeures, [2]

### 1.4.2. Analyse des modes de défaillance

La collecte d'informations sur le mode de défaillance est une étape importante dans l'analyse des défaillances des transformateurs. Ces informations permettent de comprendre la nature de la défaillance et les raisons qui ont conduit à son occurrence. Elles peuvent également aider à identifier les mesures correctives qui doivent être prises pour éviter les pannes futures.

### 1.4.3. Analyse des causes de défaillance

La détermination de la cause première d'une défaillance est souvent difficile et nécessite une analyse détaillée des circonstances de la conception, de la fabrication et de l'exploitation du transformateur.

### 1.4.4. Analyse des effets externes

Les transformateurs subissent des effets externes qui peuvent causer des pannes et des dommages. Ces effets peuvent être causés par des conditions environnementales, des incidents liés à l'exploitation ou des erreurs de manipulation.

### 1.4.5. Choix de la partie du transformateur à surveiller

D'après l'analyse réalisé précédemment, les données de défaillance des transformateurs peuvent être analysées et interprétées pour comprendre différents aspects des défaillances de transformateurs, tels que Lieux de défaillance, Causes, et le Taux de défaillance.

## **1.5. Surveillance industrielle**

### **1.5.1. Définition**

Tout à fait, la surveillance en continu de l'évolution de l'équipement à travers des données quantifiables et qualifiables est un moyen efficace de prévenir les dysfonctionnements et de minimiser les fausses alarmes pour la maintenance. Cette approche permet de détecter les signes avant-coureurs de défaillance.

Donc la transition d'une situation où l'on subit les pannes à une situation où l'on maîtrise les pannes nécessite des moyens technologiques appropriés et des techniques d'analyse efficaces.

### **1.5.2. Composantes de la surveillance industrielle**

La surveillance consiste notamment à détecter et classer les défaillances en observant l'évolution du système, puis à les diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et en identifiant les causes premières.

#### **1.5.2.1. Détection**

Pour détecter les défaillances du système, il est important de pouvoir distinguer les situations normales et les situations anormales. Cela peut être accompli en utilisant des techniques d'analyse de données qui permettent de comparer les données observées avec des valeurs de référence pour déterminer si elles se situent dans les limites normales ou si elles indiquent une situation anormale.

#### **1.5.2.2. Diagnostic**

Un diagnostic se définit comme : " l'identification de la nature d'une situation, d'un mal, d'une difficulté, etc..., par l'interprétation de signes extérieurs. Il nécessite pour cela un ensemble de mesures, de contrôles faits pour déterminer ou vérifier les caractéristiques techniques d'un système à des fins de maintenance ou d'amélioration "

Du coup la fonction diagnostic se décompose en deux fonctions élémentaires : la localisation et l'identification des causes. La localisation permet de déterminer le sous-ensemble fonctionnel défaillant, tandis que l'identification des causes permet de déterminer les causes qui ont mené à la situation anormale. Ces informations sont essentielles pour déterminer les actions de maintenance appropriées qui permettront de corriger la défaillance, [9].

## **1.6. Classification des méthodes de surveillance**

On peut classer les méthodologies de surveillance en deux groupes : celles avec modèle et celles sans modèle. Les premières s'appuient sur un modèle formel de l'équipement et utilisent souvent

des techniques de l'Automatique. Les méthodologies de surveillance sans modèle sont subdivisées en deux parties. La première concerne les outils statistiques de Traitement du Signal, qui sont considérés comme des outils de traitement de bas niveau. Ils interagissent directement avec le signal capteur et ne servent généralement qu'à générer des alarmes brutes sans fournir d'informations sur leur signification. La deuxième partie concerne les techniques de haut niveau, également connues sous le nom de techniques d'Intelligence Artificielle (IA), qui sont plutôt orientées vers la communication avec l'expert. Elles sont utilisées comme outil de base pour l'aide à la décision et leur réponse est plus élaborée que celle des techniques de bas niveau. Les techniques d'IA sont capables de détecter, interpréter (association à un mode) et diagnostiquer les défaillances (voir Figure 1.2), [2].

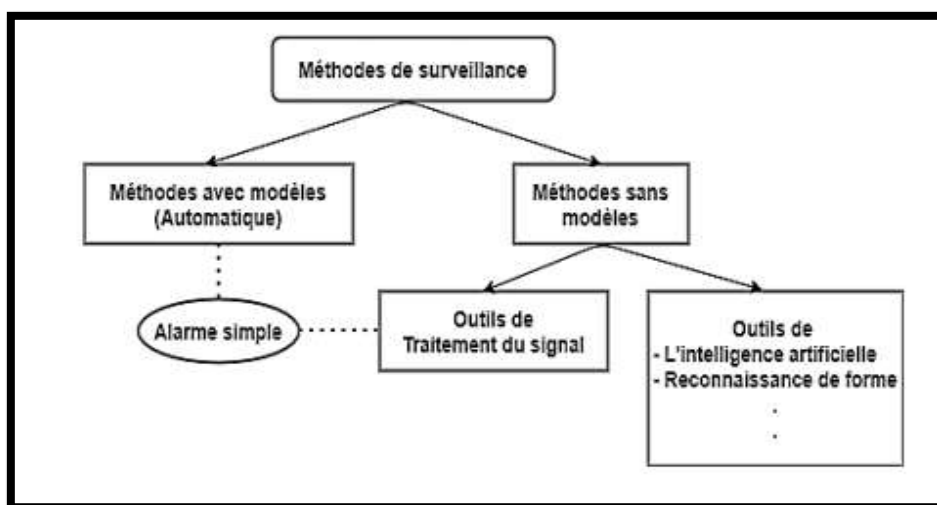


Figure 1.2. Classification des méthodes de surveillance [2]

### 1.6.1. Choix de la méthode de surveillance appropriée

Dépend avant tout de notre connaissance du système et de notre capacité à en prévoir l'évolution. En effet, si nous possédons un modèle fiable du système, nous pouvons opter pour les méthodes de surveillance avec modèles. Dans le cas contraire, les méthodes sans modèles seront plus appropriées. Notre étude étant axée sur la surveillance proactive et la détection autonome des défaillances, nous avons choisi la méthode à base de modèle physique. Cette approche permet de travailler directement avec les données issues des capteurs et des mesures pour générer des alertes. Des développements sont également en cours pour mettre en place des systèmes de télésurveillance embarqués. Après avoir choisi la méthode de surveillance, il est essentiel de sélectionner une méthode de diagnostic facile à mettre en œuvre et adaptée au système surveillé.

## **1.7. Le diagnostic de l'état des transformateurs**

Il est crucial car une panne peut entraîner des dysfonctionnements importants voire l'effondrement complet d'un système électrique. Plusieurs techniques sont utilisées pour assurer la maintenance et le diagnostic de ces équipements. Dans cette partie, nous présentons brièvement sept des principales techniques de diagnostic des transformateurs. Nous mettons l'accent sur leurs caractéristiques principales et leur développement évolutif, en accordant une attention particulière aux techniques présentant un fort potentiel d'application en ligne et en télésurveillance.

### **1.7.1. Principales techniques de diagnostic des transformateurs**

#### **1.7.1.1. Technique d'analyse des gaz dissous (DGA)**

Lorsqu'un transformateur est soumis à des contraintes électriques et mécaniques, des gaz sont produits par la décomposition des matériaux isolants, du papier et de l'huile, entraînant des changements observables immédiats et même la possibilité de détecter des défauts en cours d'évolution. La technique d'analyse des gaz dissous (DGA) est utilisée pour analyser ces gaz générés par les pannes naissantes dans les transformateurs immergés dans l'huile. Depuis son introduction en 1960, l'analyse des gaz dissous est devenue une méthode couramment utilisée dans le monde entier pour détecter les pannes dans les transformateurs.

#### **1.7.1.2. Analyse de réponse fréquence (FRA)**

La méthode d'analyse de réponse en fréquence est couramment utilisée pour évaluer l'état mécanique des transformateurs de puissance en vérifiant l'intégrité de leurs noyaux, enroulements et cadres de pression. Elle consiste à mesurer la relation entre le signal de réponse d'un transformateur et un Simulink, sur une large plage de fréquences, puis de comparer les résultats avec des mesures de référence ou d'usine [2]. Cette méthode permet de créer une empreinte digitale ou un schéma de référence pour un transformateur en bon état ou récemment fabriqué, qui pourra être comparé à des mesures ultérieures après l'apparition d'un défaut ou d'un événement susceptible de l'avoir endommagé.

#### **1.7.1.3. Mesure des Courants de Polarisation et de Gé-polarisation (PDC)**

La méthode d'essai diélectrique non invasive et non destructive consiste à mesurer la conductivité et la teneur en humidité des matériaux isolants dans un transformateur. Cette méthode, connue sous le nom de mesure PDC, fonctionne en appliquant une tension continue à travers l'objet testé pendant une durée variable allant de 5 minutes à 3 heures, en fonction du nombre de points de prélèvement à prendre pendant le test. Une fois ce temps écoulé, la source de tension continue est déconnectée et l'objet testé est court-circuité.

#### **1.7.1.4. Spectroscopie du Domaine de Fréquence (FDS)**

La méthode de diagnostic FDS est un type de test non invasif qui évalue l'état de l'isolation huile-papier dans un transformateur. Ce test implique l'application d'une tension sinusoïdale aux bornes de l'objet à tester, afin de mesurer l'amplitude et la phase du courant de réponse traversant l'isolant. Grâce à ces mesures, il est possible de déterminer les paramètres capacitifs du système isolant. Le test FDS est généralement combiné avec le PDC pour couvrir une plage de fréquences plus large. Le PDC est utilisé pour les basses fréquences tandis que le FDS est utilisé pour les hautes fréquences. Cette méthode permet de détecter des défauts tels que les pertes, la capacité et le niveau d'humidité dans l'isolant cellulosique. Elle peut également être considérée comme une extension des mesures du facteur de dissipation ( $\text{tg } \delta$ ) effectuées à la fréquence nominale.

#### **1.7.1.5. Le test de la tension de récupération (RVM)**

Ce test est utilisé pour déterminer l'état de l'isolation huile-papier d'un transformateur. Cette technique est souvent utilisée en complément du test PDC ou FDS. Lorsque ce test est effectué, une tension continue est appliquée à l'isolant, ce qui polarise les molécules dans la direction du champ électrique. Ensuite, l'interrupteur de source CC est ouvert, et un court-circuit entre les bornes de l'isolant est créé pendant une courte période (généralement la moitié du temps de charge). Cette étape permet de dépolariser partiellement les molécules. Finalement, le court-circuit est ouvert, ce qui provoque l'apparition d'une tension aux bornes de l'isolant en raison de la charge restante. Cette tension est appelée tension de récupération, et elle dépend fortement de l'humidité du système huile-papier du transformateur.

#### **1.7.1.6. Analyse des Furanes et Degré de Polymérisation**

Le papier utilisé pour l'isolation solide des transformateurs est constitué de fibres de cellulose, un polymère composé de molécules de glucose. Lorsque le papier est neuf, il a une longueur moyenne de chaîne polymère d'environ 1 000 à 1 200 molécules de glucose. Cependant, une fois le papier installé dans le transformateur et séché en usine, sa longueur moyenne de chaîne polymère diminue et se situe entre 800 et 1 000 molécules de glucose. Cette longueur moyenne de chaîne est connue sous le nom de degré de polymérisation (DP). [10]

Au fil du temps, la décomposition progressive des chaînes cellulosiques entraîne une diminution de la rigidité mécanique du papier, ce qui peut entraîner des pannes à l'intérieur du transformateur. De plus, lors de ce processus, les molécules de glucose subissent des modifications et forment des anneaux de furane. Ces anneaux de furane ont tendance à migrer vers l'huile et, à des températures élevées, ils se transforment en divers composés chimiques qui peuvent affecter les phénomènes thermiques, électriques ou mécaniques à l'intérieur du

transformateur. Par conséquent, le paramètre le plus important pour déterminer si une défaillance est susceptible de se produire et mérite une attention particulière est le changement de la teneur en furane.

#### **1.7.1.7. Méthode thermographique (IRT)**

Utilise principalement un outil appelé thermographe infrarouge (IRT - Infrared Thermograph). Cette méthode non invasive permet de déterminer la condition de température et de réaliser un diagnostic thermique externe d'un transformateur, en détectant les points chauds dans les traversées ou les connexions ainsi que les surcharges. Les défaillances peuvent être détectées à un stade précoce telles que l'oxydation d'interrupteurs haute tension, des connexions surchauffées, des défauts d'isolation, des points chauds dans les traversées ou des surcharges. Grâce à la thermographie, il est possible de localiser le problème et d'évaluer sa gravité.

#### **1.7.2. Comparaison des techniques de diagnostic**

Dans le but d'analyser les techniques de diagnostic précédemment présentées, nous établissons une analyse qualitative et quantitative en fonction de critères clés exposés ci-dessous. Ces critères sont les suivants :

- **Applicabilité** : il s'agit de déterminer si le test peut être réalisé en ligne ou hors ligne.
- **Types de pannes détectables** : ce critère concerne les pannes génériques pouvant être détectées par chaque test
- **Normes techniques et standards internationaux** : il s'agit des réglementations les plus significatives autour du test
- **Type d'accès à l'échantillon ou à la mesure** : ce critère évalue la nécessité d'ouvrir ou de désarmer le transformateur pour effectuer le test (invasif ou non invasif) ainsi que la méthode de mesure.
- **Temps d'exécution moyen requis** : il s'agit du temps de référence nécessaire pour effectuer le test.
- **Tests complémentaires** : ce critère évalue la nécessité de compléter ou de comparer le test avec d'autres techniques de diagnostic.
- **Équipement d'application de test typique** : il indique les autres équipements sur lesquels le test peut être appliqué. Chacune des techniques étudiées présente des caractéristiques spécifiques qui les rendent applicables en fonction du type d'étude requis. Toutefois, la présence de caractéristiques communes peut jouer un rôle clé dans le choix d'une technique de diagnostic plutôt qu'une autre. Par exemple, seulement quatre tests ont été appliqués avec succès en ligne

(DGA, IRT, EA et FRA). Les autres techniques nécessitent toujours l'arrêt du transformateur, ce qui peut être un facteur critique obligeant les processus de production ou de transmission d'énergie à être suspendus pendant un temps considérable. Enfin, l'existence d'un modèle de l'enroulement de transformateur en bon état de fonctionnement est un facteur important à considérer pour les approches basées sur les modèles, [7].

### **1.7.3. Choix de la méthode de diagnostic approprié**

Dépend de facteurs tels que l'applicabilité, la fiabilité et le temps d'exécution. Les processus de maintenance et de gestion de transformateur doivent prendre en compte les spécificités de chaque transformateur ainsi que la disponibilité d'un ensemble d'informations. Si l'enroulement est la partie du transformateur à diagnostiquer et que l'on souhaite détecter des déformations géométriques, la technique de diagnostic la plus adaptée est la FRA. L'analyse de réponse en fréquence peut détecter des changements dans l'état de l'isolation, dans les composants non actifs tels que la traversée et le réservoir, ainsi que des changements dans les enroulements. Des études expérimentales récentes ont montré que l'analyse de la réponse en fréquence est une méthode de diagnostic très sensible pour détecter les changements mineurs dans les enroulements des transformateurs, justifiant ainsi l'intensification des études sur cette méthode au cours des dernières années.

## **1.8. Conclusion**

Ce chapitre a abordé les caractéristiques techniques des transformateurs, notamment leur constitution, leur classification et leurs types de défauts. Dans le cadre du développement d'un système embarqué pour la surveillance des transformateurs, il est nécessaire de mettre en place un diagnostic non invasif et non destructif. À cet effet, ce chapitre a également traité et analysé :

- Les défaillances des transformateurs, en identifiant les enroulements comme la partie à surveiller dans ce travail.
- Les méthodes de surveillance, en sélectionnant la méthode appropriée avec modèle physique. Les méthodes de surveillance avec modèle physique comparent les mesures effectuées sur le transformateur aux informations fournies par le modèle, et tout écart est alors considéré comme une défaillance.
- Les méthodes de diagnostic de l'état des transformateurs, en menant une étude comparative qui a conduit à la sélection de la FRA pour diagnostiquer l'état des enroulements des transformateurs en raison de sa sensibilité et de sa capacité à détecter les variations mineures dans la structure des transformateurs. La surveillance des transformateurs est généralement effectuée en utilisant des paramètres externes tels que la température, le courant, la tension et

le niveau d'huile. Toutefois, notre travail est basé sur la surveillance de la partie active du transformateur, à savoir les enroulements, en utilisant l'analyse de la réponse fréquentielle FRA.



**Chapitre 2 :**  
**Modèle du**  
**transformateur en**  
**vue de l'analyse de**  
**la réponse en**  
**fréquence (FRA)**

## **2.1. Introduction**

Précédemment dans le premier chapitre, nous avons abordé l'importance de la surveillance des transformateurs électriques en raison de leur rôle crucial dans la distribution d'énergie électrique et les conséquences négatives de leur dysfonctionnement. Nous avons également présenté plusieurs approches pour surveiller l'état des transformateurs, notamment la modélisation dédiée au diagnostic par FRA.

Il est important de comprendre que chaque approche a ses avantages et ses limites et qu'il est souvent nécessaire d'utiliser plusieurs méthodes en conjonction pour obtenir une évaluation complète de l'état du transformateur. De plus, il est essentiel de prendre en compte toutes les informations disponibles sur le transformateur, telles que son historique de maintenance et d'exploitation, ainsi que les conditions environnementales dans lesquelles il opère.

L'objectif de la surveillance est de détecter tout changement dans l'état du transformateur qui peut indiquer un problème ou un défaut. Par conséquent, il est important d'étudier la technique de la méthode de diagnostic FRA. Pour ce faire, ce chapitre est organisé comme suit :

- 1- La démonstration sur le diagnostic en utilisant la technique FRA.
- 2- L'étude des différentes modélisations fréquentielle du transformateur.
- 3- La description de la modélisation des enroulements de transformateur orienté FRA et le choix du modèle approprié à notre problématique.

## **2.2. Diagnostic à partir de l'analyse de la réponse fréquentielle FRA**

### **2.2.1. Analyse de la réponse en fréquence**

L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) a été introduite dans l'industrie des transformateurs dans les années 1970, notamment grâce aux travaux des ingénieurs E.P. Dick et Clifford C. Erven. [11]. Dans leur publication de 1978 intitulée "Frequency response analysis of power transformers", ils ont expliqué comment la FRA pouvait être réalisée sur les transformateurs et quels étaient les avantages de cette technique pour la détermination des paramètres internes du transformateur, en particulier pour les enroulements.

Le test FRA (Frequency Response Analysis) est en effet basé sur la mesure de la réponse du transformateur à des signaux de test à différentes fréquences, permettant d'obtenir une vue complète de la réponse en fréquence du transformateur dans une large bande passante.

Les informations obtenues à partir du test FRA sont utilisées pour évaluer la santé et la performance du transformateur. En comparant les résultats FRA avec des modèles de référence,

donc il est possible de détecter des défauts tels que des courts-circuits, des enroulements défectueux, des défaillances des isolants, ou des défauts dans la connectivité électrique du transformateur.

Donc l'analyse de la réponse en fréquence (FRA) est devenue une méthode de diagnostic importante pour évaluer l'état de santé des transformateurs électriques au cours des dernières décennies. Cela est dû en grande partie aux développements de l'équipement de mesure, qui ont permis d'obtenir des mesures de plus en plus précises et fiables de la réponse en fréquence des transformateurs.

### **2.2.2. Objectifs de la FRA**

L'objectif principal de la technique FRA est de détecter les défaillances d'un transformateur (noyaux magnétiques et enroulements). Cette technique permet de détecter de toute forme de défaillances tels que :

- Les déformations ou déplacements des enroulements.
- Les spires court-circuitées ou les enroulements ouverts.
- Les défauts de la structure de fixation.
- Les défauts dans les connexions du noyau magnétique.
- Les affaissements partiels d'enroulement.
- Les circuits de terre du noyau magnétique défectueux.
- Les déplacements du noyau magnétique.
- Le claquage des enroulements

### **2.2.3. Principe du test**

Si un enroulement subit une déformation, cela peut modifier les paramètres de l'inductance distribuée et de la capacité de l'enroulement, entraînant ainsi une altération de la courbe d'impédance (voir Figure 2.1). Pour déceler une telle déformation, la méthode d'analyse de la réponse en fréquence peut être employée. Cette méthode implique un test de la caractéristique de réponse en fréquence d'amplitude de l'enroulement du transformateur, la comparaison des résultats obtenus et enfin la détermination de la déformation géométrique des enroulements en fonction des différences apparues dans la courbe d'impédance en fonction de la fréquence (voir Figure 2.1).

Pour effectuer le test FRA, la méthode de balayage de fréquences est utilisée, où la fréquence de l'onde sinusoïdale de l'alimentation est continuellement modifiée et le rapport de l'amplitude du signal de sortie par rapport au signal d'entrée pour les différentes fréquences est mesuré. La courbe de réponse en fréquence d'amplitude l'enroulement est généralement représentée sur un graphique logarithmique, comme illustré sur la Figure 2.1. [8]

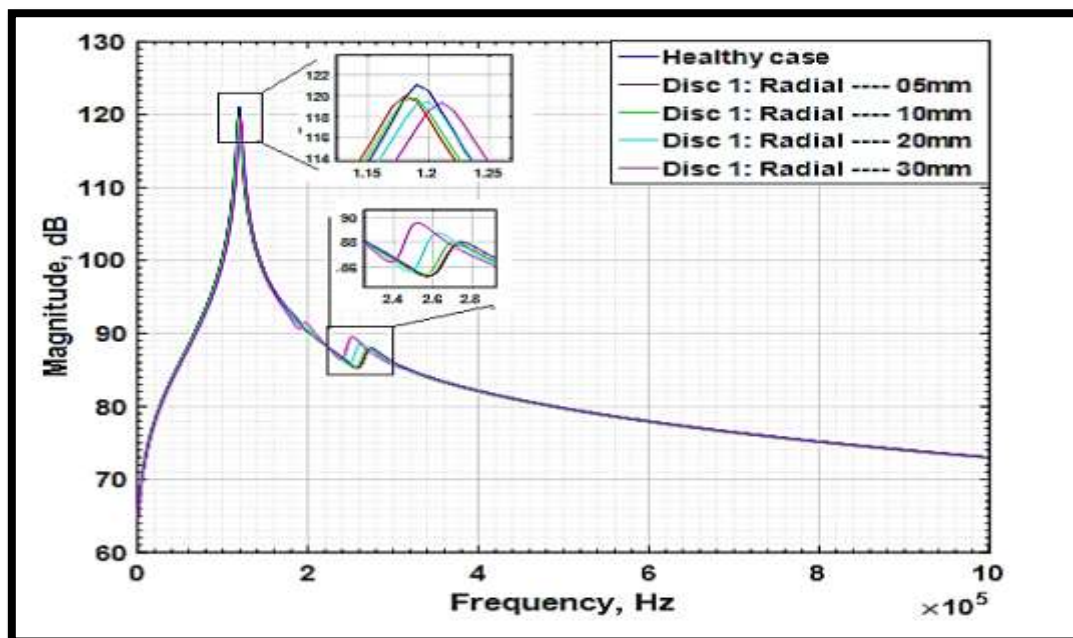


Figure 2.1. Déplacements radiaux (5 mm, 10 mm, 20 mm et 30 mm) du disque 01

#### 2.2.4. Quand faut-il faire un test FRA ?

- **Au constructeur :**

- Pour assurance qualité
- Avant et après les tests en court-circuit.
- Avant et après les tests en HT.
- Avant le transport.

- **Sur site :**

- Après le transport.
- Test de routine.
- Après un défaut.
- Après un message d'alarme et déclenchement par des relais de protection.
- Après détection d'anomalies avec des tests traditionnels

#### 2.2.5. Types de connexions FRA

Il existe différentes configurations de connexion pour effectuer une mesure FRA. Dans cette méthode, une tension à fréquence variable est fournie à une borne du transformateur, et la tension mesurée à cette borne est utilisée comme référence pour le calcul FRA. Un deuxième paramètre, généralement une tension mesurée à travers une deuxième borne du transformateur,

est également pris en compte. Cette deuxième borne peut être un courant mesuré à la borne d'entrée ou à une autre borne de masse. La réponse FRA est obtenue en calculant le rapport en décibels entre le signal de réponse et la tension source.

#### **2.2.5.1. Circuit ouvert (End-to-End Open Circuit)**

Le test en circuit ouvert implique l'injection d'un signal de référence dans l'une des bornes d'un enroulement, tandis que la réponse est mesurée à l'autre borne de l'enroulement, alors que toutes les autres bornes sont flottantes. Les caractéristiques du noyau du transformateur ont une influence importante sur les résultats de cette méthode de mesure, en particulier à basses fréquences. Cependant, cette méthode reste utilisable pour l'évaluation de base.

#### **2.2.5.2. Court-circuit (End-to-End Short Circuit)**

Pour réaliser ce test, on procède de la même manière que pour le test en circuit ouvert, sauf que le second enroulement de la même phase est court-circuité. Dans les transformateurs triphasés, il est également possible de court-circuiter tous les enroulements adjacents, ce qui permet d'obtenir une meilleure symétrie. Ce type de connexion permet de supprimer l'effet principal du noyau du transformateur. Par conséquent, le test de court-circuit est une méthode pratique pour évaluer exclusivement les enroulements.

### **2.2.6. Choix du type de connexion approprié**

Le test en circuit ouvert de bout en bout est le plus couramment utilisé et fournit des informations à la fois sur l'enroulement et le noyau du transformateur. En revanche, le test de court-circuit de bout en bout est principalement utilisé pour les mesures sur site, lorsque seuls les problèmes dans la structure de l'enroulement doivent être identifiés. Étant donné que notre objectif dans le chapitre précédent était de diagnostiquer les enroulements du transformateur, le test de court-circuit est une méthode pratique pour évaluer exclusivement ces derniers.

### **2.2.7. Schéma de principe du test FRA**

L'analyse de réponse en fréquence de balayage (FRA) implique l'application d'un signal sinusoïdal d'amplitude constante et de fréquence variable à une extrémité de l'enroulement testé. La réponse, qui variera en amplitude et en phase, est mesurée à l'autre extrémité de l'enroulement (voir Figure 2.2 que nous avons établi expérimentalement). La configuration de mesure se compose principalement d'un instrument de mesure FRA et de câbles de mesure. Étant donné que les câbles ont également une capacité, ils doivent être mis à la terre. De plus, l'utilisation de fils tressés simples réduira l'impact de l'effet peau sur les résultats des tests, en particulier à très hautes fréquences.

Il existe plusieurs méthodes possibles pour présenter les résultats des mesures effectuées à l'aide de la méthode de réponse en fréquence. La méthode la plus courante consiste à tracer un graphique de l'amplitude en fonction de la fréquence, en utilisant des échelles linéaires et logarithmiques [12].

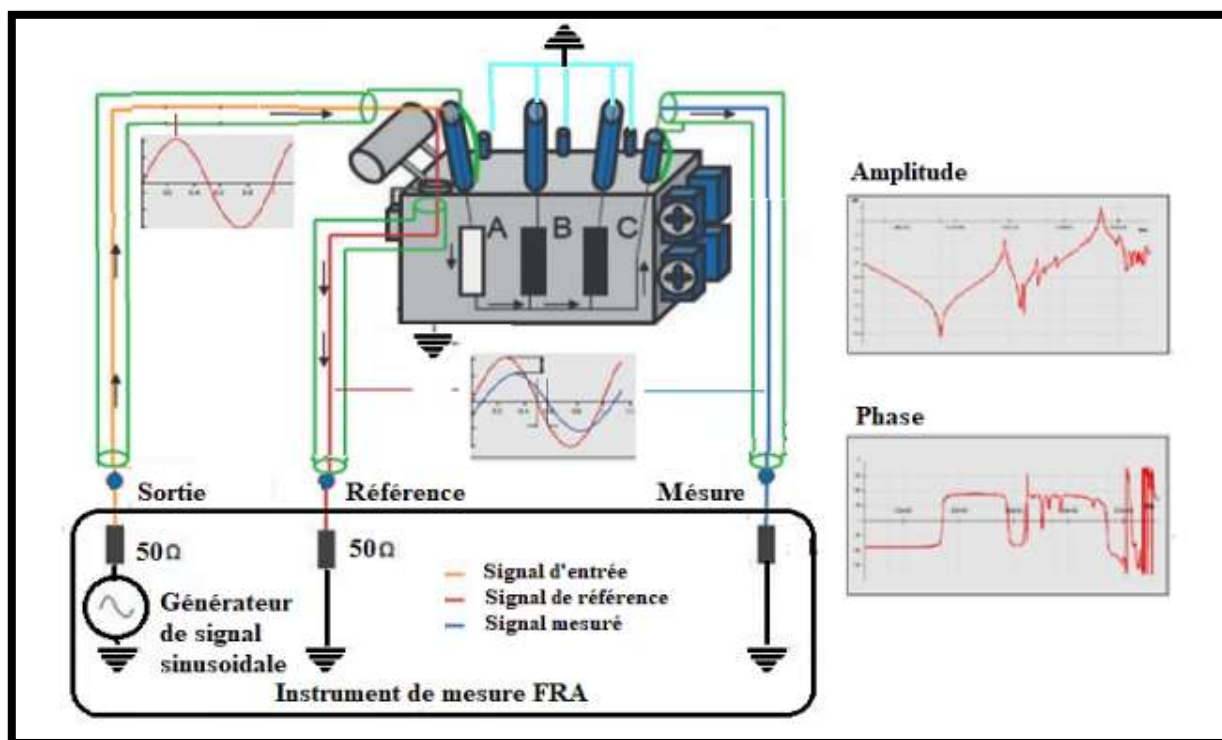


Figure 2.2. Schéma de principe de test FRA

### 2.3. Modélisation fréquentielle du transformateur

Le transformateur est un composant électrique complexe qui présente de nombreux phénomènes physiques tels que la saturation magnétique, l'effet d'hystérésis, la perte par courants de Foucault, la dispersion, etc. Ces phénomènes rendent difficile la modélisation précise du transformateur dans une chaîne de transfert d'énergie électrique.

Cependant, grâce aux progrès de la modélisation électrique, il est désormais possible de proposer des modèles à constantes localisées pour le transformateur. Ces modèles utilisent un nombre limité de paramètres pour décrire les caractéristiques du transformateur.

Ces modèles à constantes localisées sont basés sur des équations électromagnétiques couplées et prennent en compte les non-linéarités du transformateur. Ils sont capables de reproduire de manière précise les caractéristiques de transfert du transformateur sur une large gamme de fréquences et de conditions de fonctionnement. Ils permettent ainsi une simulation plus précise des circuits électriques intégrant des transformateurs.

Les modèles couramment utilisés dans l'étude des régimes transitoires et fréquentiels sont : [8]

### 2.3.1. Modèle de RESEL

RESEL est un programme de simulation électrique développé au Laboratoire Roumain pour l'analyse des transitoires dans les réseaux électriques. Il est utilisé pour modéliser différents éléments de réseaux électriques, y compris les transformateurs.

Le modèle RESEL pour les transformateurs utilise deux schémas couplés : un schéma électrique et un schéma magnétique. Le schéma électrique est composé de résistances, de capacités et de sources de tension et de courant, tandis que le schéma magnétique est basé sur un réseau de réductances et de forces électromotrices. Les sources du schéma électrique sont liées aux variations de flux du schéma magnétique.

Il prend en compte les effets de la fréquence en décomposant le schéma magnétique en éléments de géométrie simples pour lesquels la résolution des équations de Maxwell est relativement simple. Il prend également en compte l'effet de peau en introduisant des éléments complexes qui traduisent les pertes dans les conducteurs.

Il est important de noter que le modèle RESEL ne traite que des éléments de réseau à constantes localisées et ne permet pas une analyse fréquentielle systématique du transformateur. Cependant, il est utile pour la simulation des transitoires dans les réseaux électriques et pour l'analyse du comportement dynamique des transformateurs.

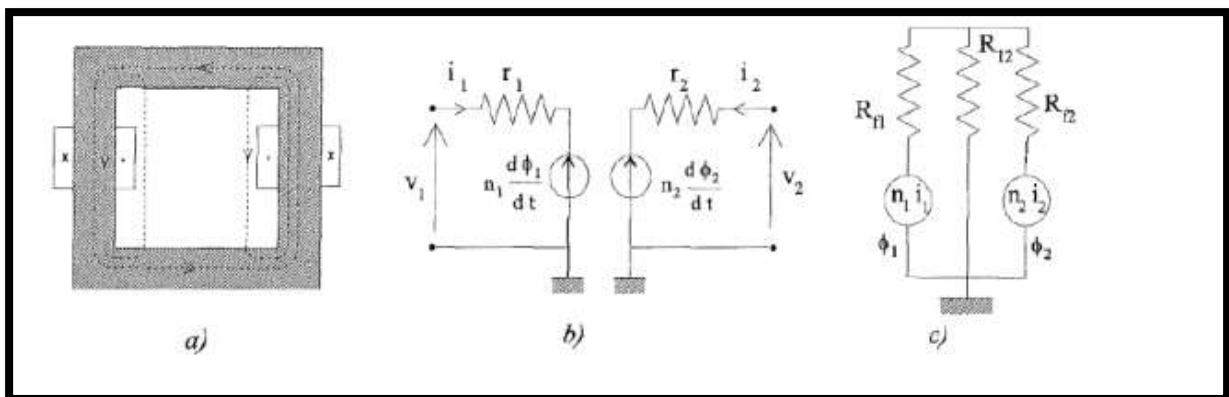


Figure 2.3. Modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL.

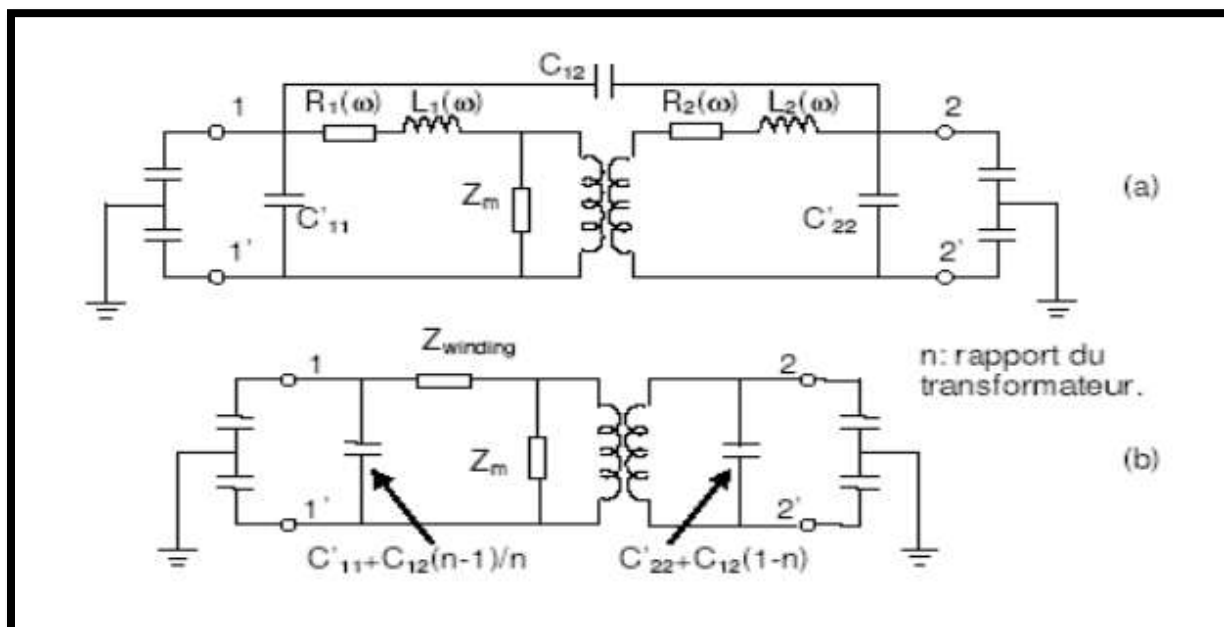
- a) Coup transversal d'un transformateur à 2 enroulements
- b) Le circuit électrique correspondant
- c) Le circuit magnétique correspondant

### 2.3.2. Modèle de Chimklai

Ce modèle est élaboré en partant du modèle classique du transformateur, auquel on ajoute des éléments capacitifs et des circuits R, L, C, synthétisés à partir de mesures. Chaque circuit supplémentaire représente un phénomène propre au régime fréquentiel, tel que la résonance magnétique ou les pertes par hystérésis et courants de Foucault dans le noyau de fer. Les

capacités ajoutées au modèle représentent quant à elles les phénomènes électrostatiques qui se produisent dans les enroulements du transformateur.

Cette idée est la base pour établir plusieurs modèles qui sont développés par la suite. Cette méthode de modélisation d'un transformateur est à la fois très simple et efficace.



### 2.3.3. Modélisation par inductances propres et mutuelles

Le comportement de l'enroulement d'un transformateur soumis à une onde de choc peut être assimilé à celui d'un système composé de condensateurs et d'inductances. Ainsi, des modèles mathématiques utilisant un réseau équivalent de résistances, d'inductances et de condensateurs (paramètres concentrés ou répartis) sont développés en fonction de l'étude envisagée. La précision des résultats et le coût dépendent du degré de précision atteint dans la représentation du bobinage et des méthodes numériques de simulation employées. Le transformateur est discrétisé en utilisant des spires, des galettes ou des bobinages élémentaires, chacun représenté par sa résistance et son inductance propre couplée aux autres inductances. Des capacités de couplage existent entre les éléments, ainsi qu'une capacité par rapport à la masse pour chaque élément.

Ce modèle présente l'avantage d'être facile à mettre en œuvre car il peut être traité simplement à l'aide de la théorie des réseaux électriques. Cependant, il présente l'inconvénient d'avoir un grand nombre de paramètres à calculer. Nous utiliserons ce modèle autant que possible pour étudier le transformateur en haute fréquence.



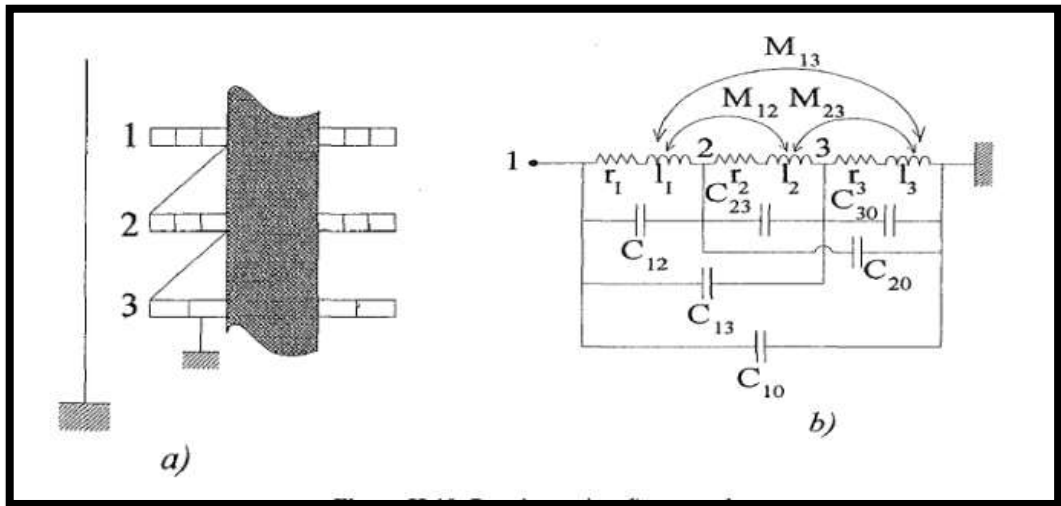


Figure 2.5. Représentation d'un enroulement.

### 2.3.4. Modèle d'Andrieu

Ce modèle de transformateur de distribution triphasé à deux enroulements est basé sur les principes du modèle de Chimklai. Il tient compte des phénomènes suivants pour la modélisation du transformateur en régime fréquentiel :

- Les capacités.
- Les résonances dans l'enroulement HT.
- L'impédance de l'enroulement de BT, dépendant de la fréquence ( $Z_{cc}$ ).

La méthode de calcul des paramètres de ce modèle repose sur les mesures des capacités et des grandeurs électriques en court-circuit et circuit ouvert. Cependant, il convient de noter que ce modèle n'est valable que pour les fréquences inférieures à 1 MHz.

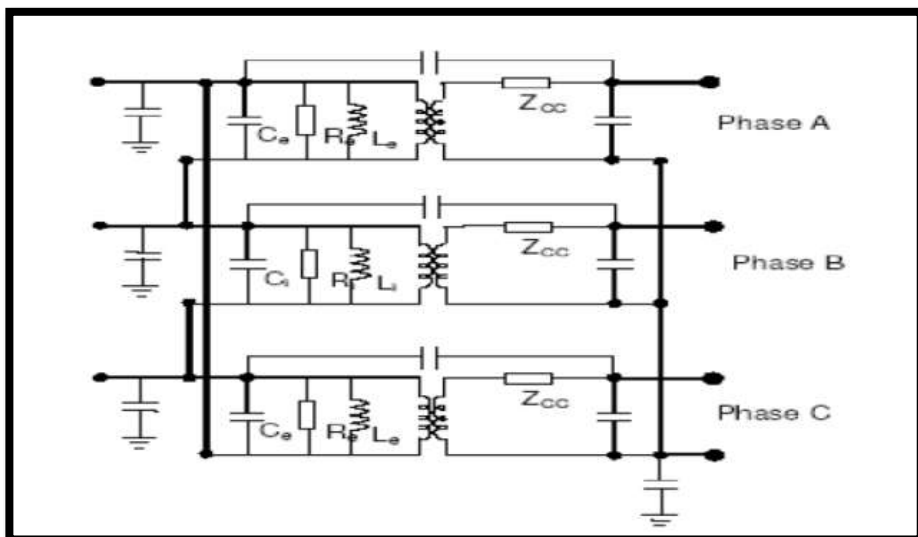


Figure 2.6. Modèle d'Andrieu

### 2.3.5. Modèle en $\pi$ du transformateur

Ce modèle est structuré en utilisant la théorie du quadripôle. Cette théorie permet d'établir une correspondance entre les différentes impédances mesurées entre les bornes d'entrée et de sortie d'une phase du transformateur. Les impédances obtenues sont ensuite utilisées pour construire un modèle électrique en circuit.

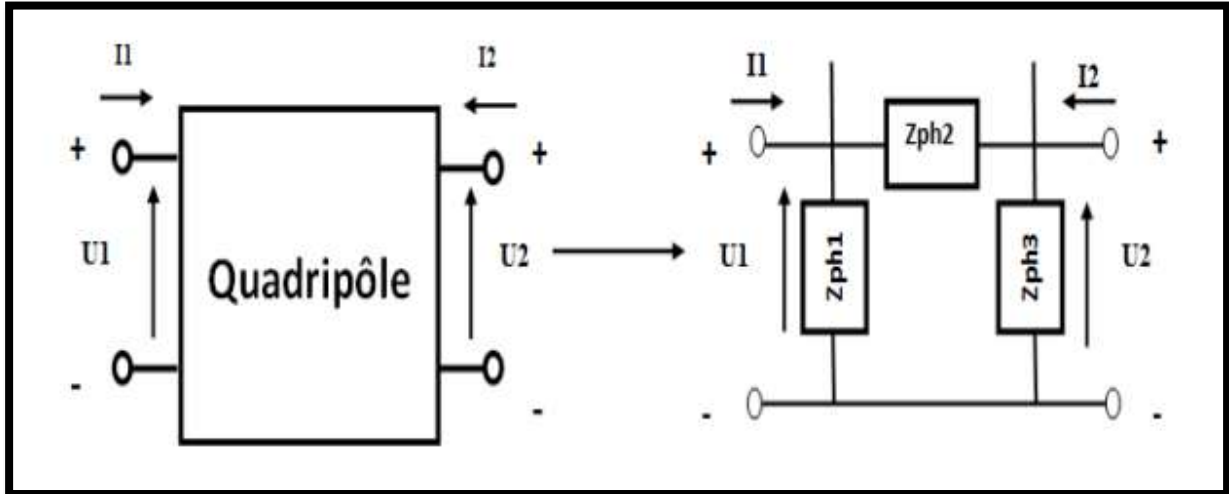


Figure 2.7. Structure de modèle d'un quadripôle.

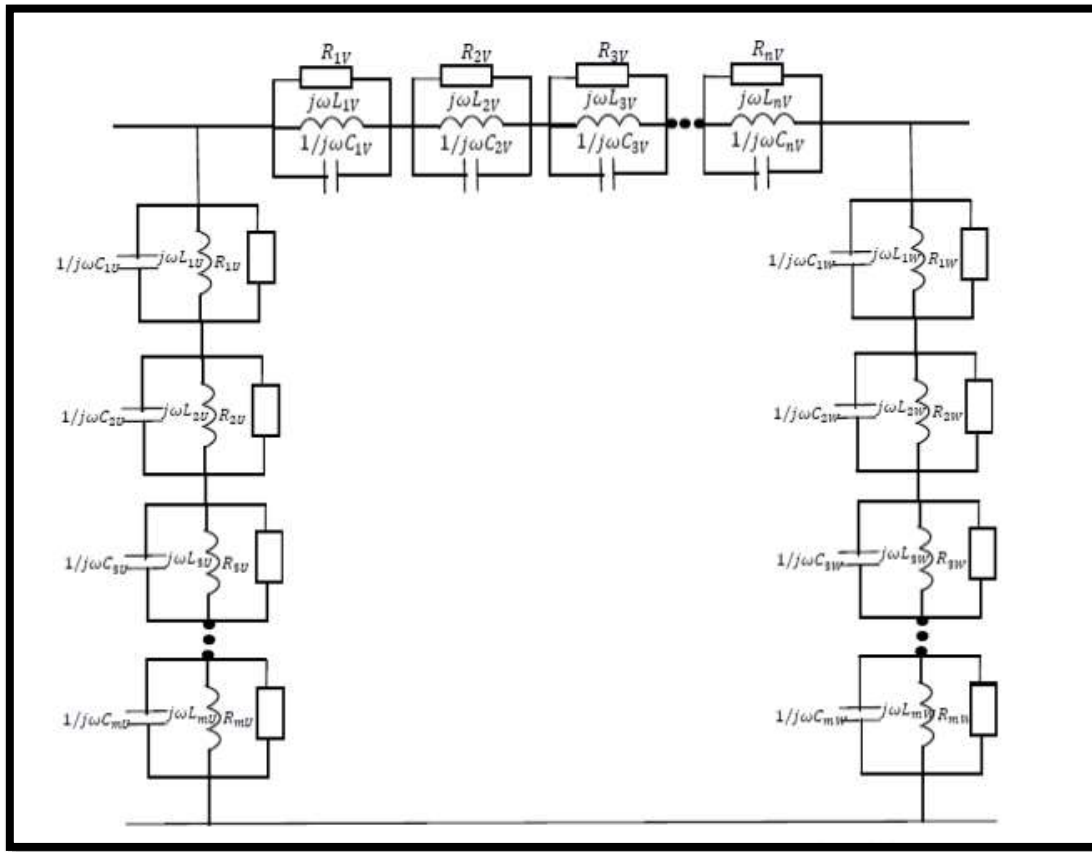
### 2.3.6. Modèle en cascade des cellules RLC parallèle

Ce modèle repose sur le concept de stockage et de dissipation d'énergie qui considère que l'énergie stockée dans un milieu sous l'effet d'un champ magnétique et électrique peut être représentée par des paramètres inductifs et capacitifs, tandis que les pertes peuvent être représentées par des paramètres résistifs. Ainsi, les effets des champs magnétiques, électriques et de perte peuvent être simulés à l'aide des paramètres L, C et R respectivement. Le modèle est composé de circuits RLC parallèles qui sont déterminés à partir des pics de résonance correspondant aux différentes fréquences de coupure de la réponse de l'enroulement. Les paramètres électriques de chaque pic de résonance sont alors déterminés pour construire un circuit dont la réponse en fréquence reproduit la réponse fréquentielle d'un transformateur réel. Ce motif équivaut à la réponse typique d'une combinaison en série de plusieurs cellules de paramètres R, L et C connectées en parallèle.

### 2.3.7. Modèle avec couplage mutuel

Ce modèle est utilisé pour décrire le comportement d'un transformateur en fonction de la fréquence. À basse fréquence, l'enroulement du transformateur agit comme une simple inductance où les effets capacitifs sont négligeables. Par conséquent, le modèle RL est suffisant pour représenter l'enroulement. Cependant, à mesure que la fréquence augmente, les effets capacitifs deviennent de plus en plus importants, ce qui limite la plage de fréquences pour laquelle le modèle RL est applicable. Pour étendre la plage de fréquences pour laquelle le

modèle est valable, il est nécessaire de prendre en compte les effets capacitifs qui se manifestent à des fréquences plus élevées.



**Figure 2.8. Modelé mutuellement couple équivalent a deux enroulements du transformateur**

## **2.4. Stratégies de modélisation des transformateurs orientées FRA**

Parmi ces modèle, le modèle de circuit basé sur des paramètres localisés est largement utilisé dans la littérature pour étudier les impacts de diverses déformations d'enroulement sur la signature FRA du transformateur. Ce modèle permet de simuler l'impact de diverses déformations d'enroulement sur la signature FRA du transformateur, ce qui peut être utile pour détecter des défauts ou des anomalies dans le transformateur. [7]

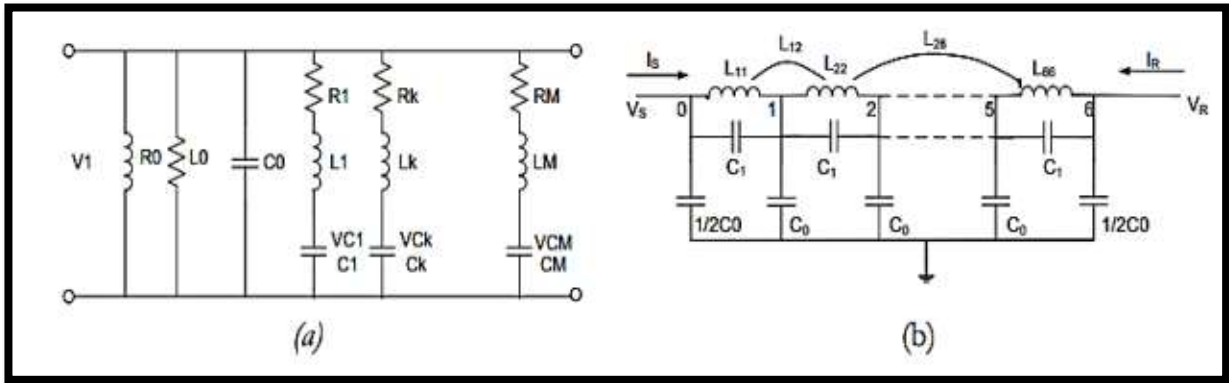


Figure 2.9. Modèle de transformateur Vaessen (a) et Wilcox (b)

### 2.4.1. Classification des modèles orientés FRA

Pour étudier les courbes FRA, il est important de comprendre les différents modèles de diagnostic basés sur cette technique. Ces modèles peuvent être classés en deux types, en fonction de leur méthodologie de modélisation. La première méthodologie consiste à établir un modèle d'identification capable d'ajuster précisément la réponse réelle. Toutefois, ce modèle doit également être doté d'une interprétation physique basée sur les paramètres constitutifs du modèle développé. La seconde méthodologie repose sur l'établissement d'un modèle initial basé sur les principes physiques du champ électromagnétique, ce qui lui confère une interprétation physique. Cependant, il est nécessaire de concevoir une procédure de calcul permettant d'obtenir des valeurs des paramètres du modèle qui permettent de simuler la réponse réelle avec une erreur minimale.

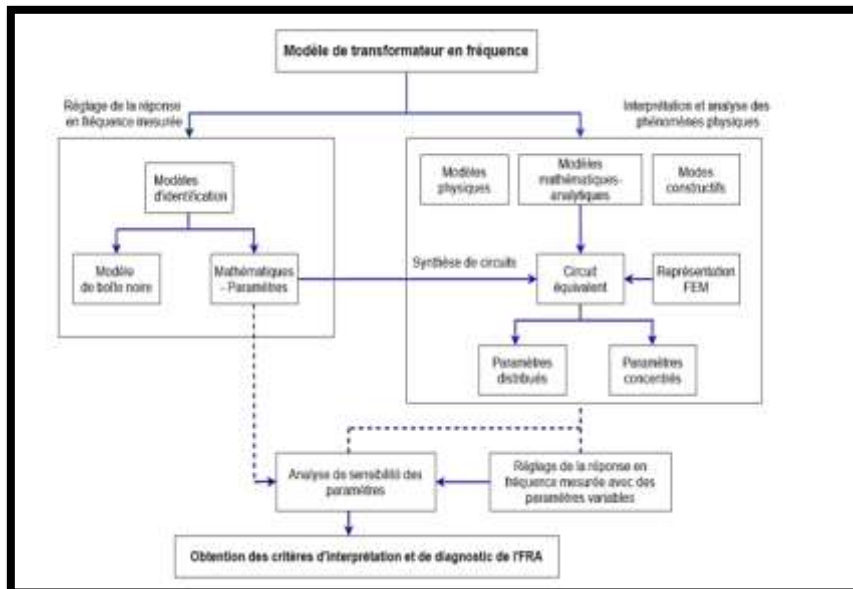


Figure 2.10. Alternatives pour la création d'un modèle à des fins de diagnostic par FRA,

## 2.4.2. Modélisation de la réponse fréquentielle FRA

Pour modéliser les caractéristiques physiques de l'enroulement du transformateur, il est possible d'utiliser des paramètres électriques pour créer un circuit électrique équivalent. Au cours des dernières années, le modèle mutuellement couplé est devenu largement reconnu comme le circuit équivalent le plus précis pour représenter le comportement de l'enroulement du transformateur sur une large plage de fréquences. Ce modèle est constitué d'une série de cellules, chacune contenant trois paramètres électriques : la résistance ( $r$ ), l'inductance ( $L_s$ ), et les capacités série ( $C_s$ ) et shunt ( $C_g$ ), comme illustré dans la Figure 2.11. Ce modèle est capable de reproduire la courbe de réponse en fréquence obtenue lors d'un test FRA réel, comme la montre la Figure 2.12 telle que nous l'avons mesurée à l'université Dr. Yahia Farès de Médéa. Les cellules sont composées des éléments passifs de base, tels que la résistance représentant les pertes de puissance, l'inductance représentant le stockage du champ magnétique, et la capacité représentant le stockage du champ électrique. Les paramètres électriques de chaque cellule,  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , sont obtenus à partir d'une réponse en fréquence mesurée à l'état sain, comme celle présentée sur la Figure 2.12, qui comporte plusieurs pics et creux sur toute la bande de fréquences. Le modèle sélectionné vise à étudier l'effet de diverses déformations géométriques internes du transformateur sur la signature FRA. [2]

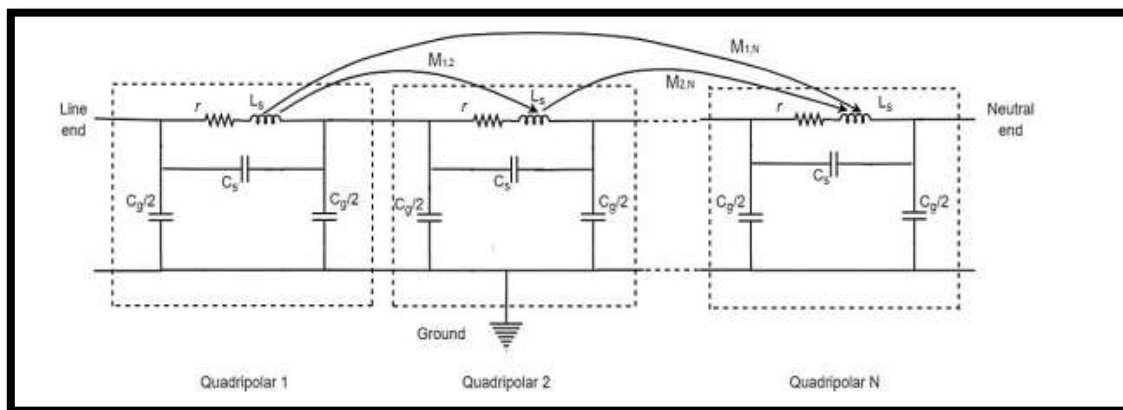
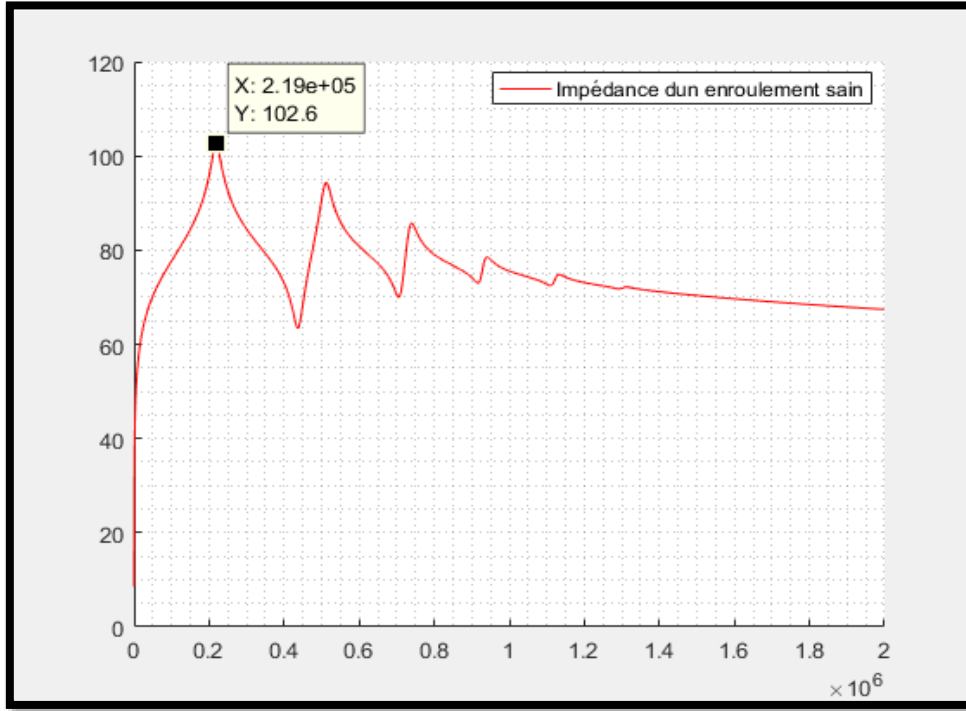


Figure 2.11. Circuit équivalent mutuellement couplé.



**Figure 2.12. Réponse en fréquence que nous avons mesurée à l'université Dr. Yahia Farès de Médéa.**

#### 2.4.2.1. Équations du circuit équivalent adopté

Par l'application de la loi de Kirchhoff au circuit représenté sur la Figure 2.11 nous permet d'élaborer les équations aux tensions et aux courants de l'enroulement, dans ce qui suit on donne un exemple d'un enroulement discrétisé en 6 cellules RLC en cascade.

##### Équations des tensions

$u_0$  et  $i_0$  sont respectivement la tension appliquée et le courant à l'entrée de l'enroulement soumis à cette dernière :

$$u_0(t) = U_{max} \sin \omega t = r_g i_0 \quad (2.01)$$

Avec :

$r_g$ : résistance interne de générateur.

Les équations différentielles des tensions pour l'enroulement du transformateur subdivisé en 6 éléments, sont :

$$u_1 - u_2 - r i_1 = l_s \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} + M_{14} \frac{di_4}{dt} + M_{15} \frac{di_5}{dt} + M_{16} \frac{di_6}{dt}$$

$$u_2 - u_3 - r i_2 = l_s \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} + M_{24} \frac{di_4}{dt} + M_{25} \frac{di_5}{dt} + M_{26} \frac{di_6}{dt}$$

Généralisation

Pour  $1 \leq k \leq 6$  :

$$u_k - u_{k+1} - r i_k = l_s \frac{di_k}{dt} + \sum_{m=1}^6 M_{km} \frac{di_m}{dt} \text{ avec } m \neq k \quad (2.02)$$

### Équations des courants

Au nœud (1) à l'entrée du transformateur on a :

$$i_0 = i_1 + i_{cs} + i_{cg/2} \quad (2.03)$$

$$i_0 - i_1 = i_{cs} + i_{cg/2}$$

Avec :

$$i_{cs} = c_s \frac{d(V_0 - V_1)}{dt} \quad (2.04)$$

$$i_{cg/2} = c_{g/2} \frac{dV_0}{dt} \quad (2.05)$$

En introduisant (2.04) et (2.05) dans (2.03) on obtient :

$$i_0 - i_1 = \left( c_s + c_{g/2} \right) \frac{dV_0}{dt} - c_s \frac{dV_1}{dt}$$

Au nœud (2) correspondant à la tension on a :

$$i_1 - i_2 = -c_s \frac{dV_0}{dt} + (2c_s + c_g) \frac{dV_1}{dt} - c_s \frac{dV_2}{dt}$$

Généralisation :

Pour  $0 \leq k \leq 6$  :

$$i_k - i_{k+1} = c_s \frac{du_k}{dt} + (2c_s + c_g) \frac{du_{k+1}}{dt} - c_s \frac{du_{k+2}}{dt} \quad (2.06)$$

#### 2.4.2.2. Représentation matricielle des équations du modèle

Après avoir établi les équations régissant le schéma équivalent d'une phase du transformateur, et après l'intégration des équations (2.02) et (2.06) on obtient :

$$\int_0^t (u_k - u_{k+1}) dt = \sum_{j=1}^{2n} M_{kj} i_j + R_k \int_0^t i_k dt \quad (2.07)$$

### Équations des courants

$$\int_0^t (i_k - i_{k+1}) dt = C_s u_k + (2c_s + c_g) u_{k+1} - C_s u_{k+2} \quad (2.08)$$

Les deux équations ainsi obtenues peuvent se mettre sous la forme condensée suivante :

$$U = C^{-1} \int_0^t \Delta I dt \quad (2.09)$$

$$I = L^{-1} \int_0^t (\Delta U - RI) dt \quad (2.10)$$

Dont :

$$\Delta I = (I_k - I_{k+1}) \text{ et } \Delta U = (U_k - U_{k+1}) \quad (2.11)$$

U et I sont les vecteurs des tensions et des courants :

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$

[C], [L] et [R] sont respectivement les matrices des capacités et des inductances des enroulements.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_g + C_{g1}/2 & -C_s & \dots & \dots & 0 \\ -C_s & 2C_s + C_{g2} & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 2C_s + C_{gN} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & \dots & M_{1N} \\ M_{12} & L_2 & \dots & M_{1N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{1N} & M_{2N} & \dots & L_N \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & r_N \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

### 2.4.3. Analyse et détermination des déformations dans les enroulements par la méthode FRA

Dans cette partie on a présenté une méthode détaillée pour analyser la réponse en fréquence des transformateurs. Traditionnellement, les résultats réels obtenus par l'analyse de la réponse en fréquence (FRA) étaient comparés aux données de référence par des spécialistes [2] [12] qui utilisaient une inspection visuelle. Cependant, cette méthode présente des limites en termes de précision, et dans de nombreux cas, les opérateurs manquaient d'expertise pour évaluer correctement les résultats. Par la suite, les experts pouvaient utiliser des indices mathématiques



pour comparer les courbes FRA et détecter les écarts. C'est pourquoi de nombreuses recherches ont été entreprises afin de réduire ou d'éliminer les interférences humaines dans la procédure d'analyse des réponses en fréquence.

Certaines approches consistent à utiliser plusieurs modèles bien établis d'enroulements ou de transformateurs pour calculer leurs paramètres ou les identifier. Ensuite, ces modèles sont soumis à différents défauts, de gravité variable et situés à différents endroits, afin de simuler leur réponse en fréquence. En comparant les résultats réels aux résultats simulés, on peut déterminer la présence d'un défaut, puis surveiller les variations dans les résultats eux-mêmes. On extrait également les fréquences propres ou les paramètres estimés du modèle pour spécifier le type de défaut et en déterminer la localisation. Ces méthodes sont efficaces pour détecter des défauts majeurs, c'est-à-dire qu'elles permettent de localiser le défaut et d'évaluer sa gravité lorsque le transformateur est correctement modélisé. Toutefois, la modélisation constitue le principal défi de ces méthodes, car elles ne s'adaptent pas à tous les transformateurs, nécessitant souvent un modèle spécifique pour chaque transformateur ou même pour chaque défaut d'un transformateur. Par conséquent, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour améliorer la modélisation des transformateurs afin de perfectionner cette technique d'interprétation.

Les méthodes basées sur l'intelligence artificielle (IA) ont également été appliquées dans ce domaine. Ces approches consistent à extraire des caractéristiques spécifiques à partir des résultats de la FRA en utilisant des indices statistiques ou des algorithmes d'ajustement vectoriel. Ces caractéristiques extraites sont ensuite utilisées pour l'apprentissage d'algorithmes tels que la logique floue [2], les machines à vecteurs de support (SVM), les réseaux neuronaux probabilistes (PNN) ou les réseaux neuronaux artificiels (ANN). Les modèles ainsi entraînés sont utilisés pour détecter le type de défaut ou même pour localiser précisément la source du problème. Bien que ces réseaux entraînés aient généralement montré une grande précision dans la détection des défauts, il convient de noter que peu d'entre eux ont été testés avec des données FRA réelles, ce qui soulève des interrogations quant à leur précision réelle dans des scénarios pratiques.

Les techniques d'interprétation mentionnées dans la littérature sont largement en phase de développement, et peu d'informations pratiques sont disponibles concernant leur utilisation réelle dans l'industrie. Actuellement, dans le secteur industriel, l'interprétation des résultats de la FRA est principalement effectuée par des ingénieurs expérimentés possédant une expertise avancée en détection des défauts des transformateurs.

## **2.5. Conclusion**

Afin d'effectuer un diagnostic précis des transformateurs de puissance, il est crucial de maîtriser la technique la plus efficace dans ce domaine. Les défauts peuvent endommager les différents composants des transformateurs. Ainsi, il est important de disposer d'un modèle capable de refléter avec exactitude toute forme de défaillance. Par conséquent, dans ce chapitre nous avons présenté une description sur la modélisation des enroulements de transformateur et le choix du modèle équivalent approprié. Ensuite, l'état de l'art concernant les méthodes de diagnostic utilisées pour les transformateurs et les critères de choix de la méthode appropriée sont présentés dans le chapitre suivant.

**Chapitre 3 :**  
**Modélisation des**  
**Enroulements de**  
**transformateurs**

### 3.1. Introduction

La surveillance des transformateurs est essentielle pour détecter et isoler les défauts afin d'éviter d'éventuels dommages graves. L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) est considérée comme l'une des meilleures techniques dans le domaine. Cela permet de cartographier les caractéristiques techniques du transformateur et certains petits écarts de conception.

Des modèles de circuits RLC couplés mutuellement sont souvent utilisés dans la littérature pour modéliser la réponse en fréquence des enroulements de transformateur. Ce modèle représente la structure interne du transformateur et nous permet d'étudier les effets de différentes déformations d'enroulement sur la réponse FRA. Pour synthétiser avec précision le comportement de l'enroulement, les paramètres doivent être déterminés avec précision. Cependant, la précision de la méthode de synthèse dépend de quantités mesurables telles que l'inductance équivalente, la capacité équivalente et la capacité shunt effective. Optimiser les paramètres du modèle à l'aide de méthodes numériques telles que la méthode des éléments finis, des algorithmes d'optimisation intelligents, tels que : les algorithmes génétiques, l'optimisation par essaims de particules, les algorithmes de chauve-souris, les algorithmes d'essais d'abeilles artificielles, etc.

Cependant, des erreurs peuvent se produire pendant la mesure et affecter la précision des variables mesurées. De plus, l'utilisation de l'algorithme d'optimisation sur un grand espace de recherche peut affecter la précision de l'optimisation. Pour surmonter ces problèmes, une nouvelle méthode d'auto-synthèse basée uniquement sur les mesures FRA a été proposée. Cette méthode est basée sur l'interprétation de la morphologie du signal FRA et sur l'utilisation de simplifications mathématiques pour réduire l'espace de recherche des paramètres. Un seul modèle de circuit équivalent de l'enroulement du transformateur peut être obtenu avec précision.

Un procédé d'interprétation de la morphologie du signal FRA est basé sur la division du signal en trois sous-bandes de fréquence : basse fréquence, moyenne fréquence et haute fréquence. Chaque sous-bande contient des paramètres clés qui reflètent le comportement de la réponse de l'enroulement. A l'aide de relations analytiques et de simplifications d'analyse, les paramètres du modèle de permutation sont déterminés pour chaque sous-bande de fréquence.

L'avantage de cette méthode est que le modèle peut être synthétisé avec succès de manière non invasive et non destructive en utilisant uniquement des mesures FRA. La surveillance et le diagnostic des transformateurs sont facilités car il n'est pas nécessaire de connaître la géométrie détaillée des enroulements.

La méthode d'auto-synthèse a été testée avec succès dans un cas expérimental. Ses principaux objectifs sont :

1. Nous proposons une nouvelle approche itérative pour synthétiser un modèle équivalent de couplage mutuel quasi unique pour les enroulements de transformateur en utilisant uniquement des mesures FRA.
2. Utilisez la simplification analytique pour déterminer avec précision les paramètres du modèle et réduire l'espace de recherche.
3. Sur la base d'une seule mesure (impédance vs fréquence), la synthèse est effectuée de manière non invasive et non destructive sans avoir besoin d'une géométrie d'enroulement détaillée. En résumé, la méthode d'auto-synthèse proposée permet la construction automatique de modèles de circuits équivalents mutuellement couplés d'enroulements de transformateurs basés uniquement sur des mesures de réponse en fréquence. Cette méthode offre une grande précision et facilite la surveillance et le diagnostic des transformateurs.

## **3.2. Algorithme d'optimisation**

### **3.2.1. Signification**

Un algorithme d'optimisation est une technique mathématique qui permet de trouver la valeur minimale ou maximale d'une fonction réelle  $f$  en explorant l'espace des solutions à l'aide d'une technique de recherche. L'objectif est de trouver la meilleure solution possible dans un délai raisonnable.

### **3.2.2. Catégories**

Les algorithmes d'optimisation peuvent être divisés en deux grandes catégories :

Algorithmes pour problèmes continus et Algorithmes pour problèmes combinatoires

#### **3.2.2.1. Problème d'optimisation continue**

Un problème d'optimisation continue est un problème dans lequel la fonction objective et les contraintes sont continus et différentiables dans l'espace des solutions. La complexité de la fonction objective et des contraintes, ainsi que la grande dimensionnalité de l'espace de recherche rendent souvent la solution plus difficile, [13].

### **3.2.2.2. Problème d'optimisation combinatoire**

Un problème d'optimisation combinatoire est un problème qui nécessite de choisir la meilleure solution parmi un ensemble fini de solutions possibles. Il n'existe pas d'algorithmes efficaces pour la plupart de ces problèmes. Diverses solutions sont développées en recherche opérationnelle et en intelligence artificielle.

### **3.2.3. Solution**

#### **3.2.3.1. Méthode exacte (complète)**

Des solutions précises vous permettent de trouver la solution optimale à votre problème particulier. Ils sont basés sur une étude complète de l'espace de recherche. Les méthodes exactes incluent la force brute, la programmation linéaire, la programmation entière et la programmation quadratique, [14].

#### **3.2.3.2. Méthode d'approximation (incomplète)**

Une solution approchée ne garantit pas une solution optimale, mais elle fournit une solution de qualité acceptable dans un délai raisonnable. Les techniques d'approximation comprennent l'heuristique et la métaheuristique. Les heuristiques fournissent rapidement des solutions viables, tandis que les métaheuristiques sont plus sophistiquées et peuvent trouver des solutions de haute qualité à des problèmes difficiles.

### **3.2.4. Algorithme ANT (optimisation des colonies de fourmis)**

L'algorithme ACO est une métaheuristique inspirée du comportement de recherche de nourriture des fourmis. Il est utilisé pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire. Les fourmis construisent progressivement leur chemin, guidées par les traces de phéromones. ACO a été appliqué avec succès à de nombreux problèmes d'optimisation combinatoire, [15].

#### **3.2.4.1. Principe**

L'algorithme ACO simule le comportement des fourmis en quête de nourriture. Les fourmis laissent des phéromones sur le sol lorsqu'elles se déplacent, que d'autres fourmis peuvent suivre pour trouver des sources de nourriture. Plus une fourmi utilise une piste particulière, plus la piste de phéromones est forte et plus il est probable que d'autres fourmis la suivront. Dans l'algorithme ACO, la signature de phéromone représente la qualité de la solution trouvée jusqu'à présent.

### 3.2.4.2. Formulation

L'algorithme ACO se compose de plusieurs étapes :

- 1- **Initialisation** : Cet algorithme initialise les traînées de phéromones et les colonies de fourmis.
- 2- **Construction de la solution par les fourmis**: Chaque fourmi construit une solution en choisissant le nœud à visiter ensuite en fonction des niveaux de phéromones et des informations heuristiques.
- 3- **Recherche locale** : En option, une recherche locale peut être effectuée pour améliorer la qualité des solutions produites par chaque fourmi.
- 4- **Mise à jour des phéromones** : Une fois que toutes les fourmis ont produit une solution, la piste de phéromones est mise à jour pour refléter la qualité de la solution trouvée.
- 5- **Fin d'Algorithme** : L'algorithme se termine lorsqu'un critère d'arrêt (tel qu'un nombre maximal d'itérations ou une solution satisfaisante) est satisfait.

L'algorithme ACO a été appliqué à un large éventail de problèmes d'optimisation combinatoire et s'est avéré efficace pour trouver des solutions de haute qualité.

Ce résumé présente les algorithmes d'optimisation, les catégories (continues et combinatoires), les méthodes de résolution (exactes et approchées) et met en évidence l'algorithme ANT (ACO) en tant que métaheuristique puissante pour résoudre les problèmes d'optimisation Combinatoire.

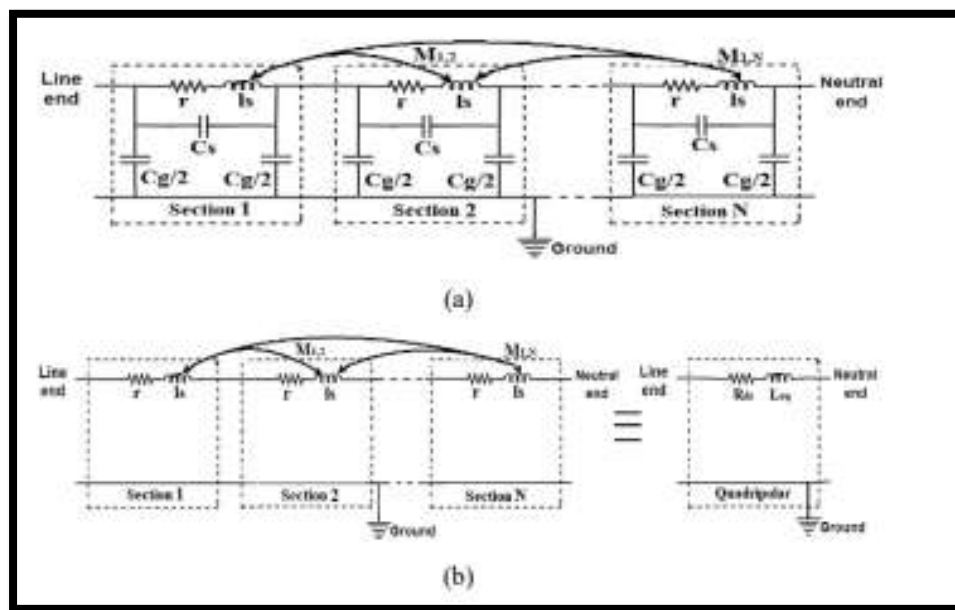
## 3.3. Modèle équivalent de l'enroulement du transformateur

Pour surveiller et diagnostiquer un enroulement de transformateur, il est nécessaire de représenter l'enroulement par un modèle de circuit équivalent physiquement réalisable. Ce circuit doit synthétiser le comportement fréquentiel de l'enroulement du transformateur. Pour simplifier la complexité de la synthèse du circuit, il est possible de représenter un transformateur à enroulements multiples par un seul réseau en échelle, et considérer tous ses paramètres statiques avec une dépendance en fréquence négligeable. Pour modéliser un enroulement symétrique et homogène, on peut utiliser un nombre fini de sections (quadripôles) qui forment un seul réseau en échelle magnétiquement et électriquement couplé. Chaque section identique est composée d'une résistance d'enroulement interne ( $r$ ) en série avec une inductance propre ( $l_s$ ), des capacités shunt et série ( $C_g$  et  $C_s$ ) et des inductances mutuelles entre les sections. Pour tenir compte de l'effet inductif dans la bande basse fréquence, on peut modéliser une inductance équivalente en série avec une résistance équivalente, qui suit des valeurs linéairement croissantes d'impédance. Il est important de choisir une connexion de court-circuit de bout en bout pour réduire significativement le modèle d'un

transformateur multi-enroulements à un seul réseau en échelle, et minimiser l'influence des enroulements voisins sur l'enroulement étudié. Cette méthode permet de considérer le transformateur comme équivalent à un enroulement isolé et de le représenter par un seul réseau en échelle. Les auteurs ont également montré que lorsque tous les enroulements voisins sont court-circuités et mis à la terre, leur influence sur l'enroulement étudié peut être minimisée, et que l'influence d'un enroulement sur un autre peut être ignorée en réponse à votre question sur les tests d'enroulement dans un transformateur à noyau de fer, les résultats de recherche, suggèrent que l'enroulement testé peut être considéré comme une bobine isolée et sans noyau de fer, si tous les enroulements adjacents sont court-circuités et mis à la terre. En outre, l'enroulement du transformateur peut être représenté par un seul réseau en échelle [16]

Pour modéliser l'impédance à moyenne fréquence, des circuits de résonance parallèles et série sont utilisés, où la capacité shunt représente le diélectrique entre l'enroulement et le noyau (terre), et la capacité série représente l'effet capacitif entre les disques. Ces capacités sont combinées de manière appropriée pour reproduire les pics et les creux du signal FRA. Toutefois, la connexion de court-circuit de bout en bout néglige l'influence des enroulements adjacents et des capacités inter-enroulements.

En ce qui concerne les hautes fréquences, l'impédance peut être modélisée par un réseau en échelle de capacités shunt et série, représenté uniquement par des capacités, et suivant des valeurs décroissantes d'impédance en fonction de la fréquence ce qui concerne l'inductance mutuelle.



**Figure 3.1. Modèle de circuit équivalent mutuellement couplé de l'enroulement de transformateur [7]**



### 3.4. Interprétation de la morphologie du signal FRA

La méthode FRA-SMI proposée utilise l'analyse de la morphologie du signal FRA pour identifier les spécifications techniques de l'enroulement du transformateur. Ces spécifications peuvent être représentées par des paramètres électriques tels que la résistance, l'inductance et la capacité. Les paramètres du modèle peuvent être déterminés en utilisant uniquement les données d'entrée FRA dans les sous-bandes de fréquences basses, moyennes et hautes. L'analyse précise du signal FRA dans ces régions peut améliorer la précision de l'identification des paramètres du modèle équivalent. Le paramètre dominant est déterminé en fonction de sa sous-bande de fréquence correspondante, tandis que l'influence des autres paramètres est généralement négligeable. La Figure 3.2 illustre ce processus, [2]

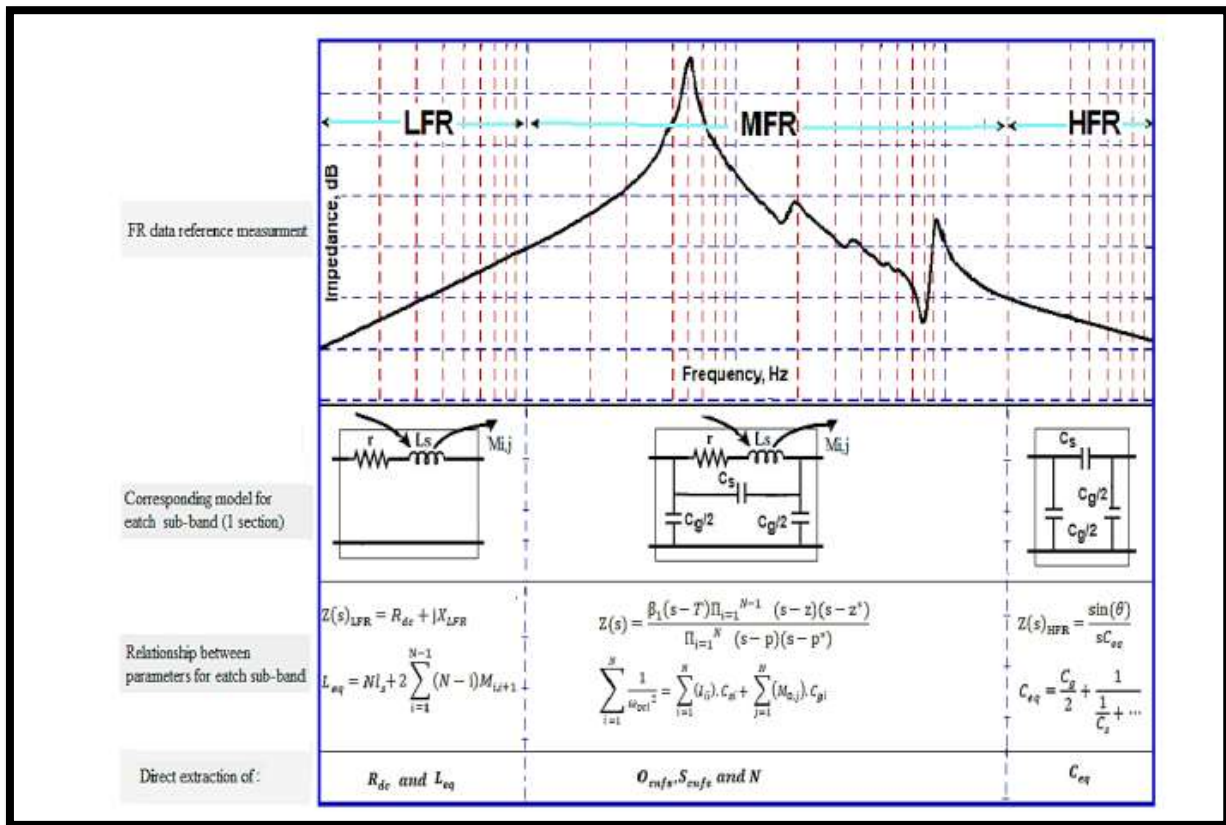


Figure 3.2. Décomposition de la réponse fréquentielle FRA [2]

Pour diagnostiquer les enroulements de transformateurs, plusieurs chercheurs ont tenté de décomposer les graphes FRA afin de comprendre leur comportement à différentes fréquences. Les auteurs de la référence [12] ont proposé une nouvelle méthode d'interprétation des défauts pour les enroulements de transformateurs en utilisant les caractéristiques extraites des zones de gradient équivalentes de la FRA. D'autres études ont montré que la courbe FRA peut être divisée en

plusieurs régions de fréquence principale. Dans notre étude, l'objectif est d'automatiser l'identification des paramètres du modèle équivalent situés dans chaque zone de fréquence, comme illustré dans la Figure 3.2.

- Dans la zone de fréquence LFR, l'effet est purement inductif, avec les inductances propres et mutuelles comme paramètres dominants.
- Dans la zone de fréquence MFR, l'effet est double inductif et capacitif, influencé par les capacités série ( $C_s$ ) et shunts ( $C_g$ ) ainsi que les inductances.
- Dans la zone de fréquence HFR, l'effet est purement capacitif, influencé par la capacité globale ( $C_{eq}$ ) causée par les deux paramètres dominants qui sont les capacités  $C_s$  et  $C_g$ . Ragavan et al [17] ont montré que  $N$  sections d'un circuit équivalent peuvent être représentées par une fonction de transfert donnée par l'équation (3.06). Les expressions mathématiques de chaque sous-bande sont définies dans la section suivante.

### 3.4.1. Réponse en basse fréquence (sous-bande LFR)

Le passage décrit la modélisation de l'enroulement isolé dans une certaine zone en génie électrique. On peut utiliser une résistance équivalente en série avec une inductance équivalente pour modéliser cet enroulement. Cette inductance équivalente prend en compte les inductances propres et mutuelles, notées  $l_s$  et  $M_{i,j}$ , telles que représentées dans la Figure 3.3. Ainsi, les paramètres clés de cette région sont  $R_{dc}$ ,  $L_{eq}$ ,  $l_s$  et  $M_{i,j}$ . De plus, à basses fréquences, l'impédance est définie comme étant [17].

$$\lim_{s \rightarrow 0} Z(s) = R_{dc} + sL_{eq}$$

$$\text{Impédance} \quad Z(f)_{LFR} = R_{dc} + jX(f)_{LFR} \quad (3.01)$$

$$\text{Réactance} \quad X(f)_{LFR} = 2\pi f L_{eq} \quad (3.02)$$

$$\begin{aligned} \text{Inductance équivalente} \quad L_{eq} &= Nl_s + 2 \sum_{i=1}^{N-1} (N-i) M_{i,i+1} \\ &\cong l_s [N + 2 \sum_{i=1}^{N-1} (N-i) \lambda^i] \end{aligned}$$

$$\text{Avec: } M_{i,i+1} = \lambda^i l_s \text{ selon référence [17]} \quad (3.03)$$

$R_d$ : Résistance au courant continu.

$L_e$ : Inductance équivalente.

$l_s$  : Inductance propre.

$N$  : Nombre de sections.

$M_{i,i+1}$  : Inductances mutuelles.

$\lambda$  : Coefficient d'inductances mutuelles, compris entre 0 et 1.

Remarque : Le coefficient  $\lambda$  doit être essentiellement constant pour différentes inductances

Enroulements de transformateur uniformes isolés et mutuellement ( $M_{i,i+j} \cong M_{i+j,i}$ )

En raison de la structure des enroulements du transformateur, le couplage magnétique entre les enroulements doit suivre certaines règles. Des études antérieures ont utilisé les contraintes d'inégalité données dans les équations (3.04) et (3.05) pour déterminer les paramètres du modèle.

$$M_{1,1} > M_{1,2} > M_{1,3} > M_{1,4} \quad (3.04)$$

$$\lambda_{min}^i l_s < M_{i,i+1} < \lambda_{max}^i l_s \quad (3.05)$$

$$\text{Avec : } 0 < \lambda_{min} \leq \lambda \leq \lambda_{max} < 1$$

Et  $M_{1,2} = \lambda l_s, M_{1,3} = \lambda^2 l_s, M_{1,4} = \lambda^3 l_s \dots etc$

### 3.4.2. Réponse en moyenne fréquence (sous-bande MFR)

Une augmentation de fréquence a conduit à l'émergence d'autres phénomènes, et l'interaction entre les effets inductifs et capacitifs a créé des fréquences de résonances et antirésonances. L'impédance est affectée dans cette bande, qui est représentée par la fonction de transfert de l'équation (3.06) et illustrée à la Figure 3.2. Les pôles et les zéros représentent respectivement les fréquences naturelles de circuit ouvert et de court-circuit  $O_{cnfs}$  et  $S_{cnfs}$ . Cette bande contient tous les paramètres de l'enroulement, y compris la capacité et l'inductance [2]

$$Z(s) = \frac{\beta_1(s-T) \prod_{i=1}^{N-1} (s-z)(s-z^*)}{\prod_{i=1}^N (s-p)(s-p^*)} \quad (3.06)$$

$\beta_1$  : Facteur d'échelle ;  $S$  : zéro réel ;

$z_i, z_i^*$  Paire zéro de conjugué complexe ;

$p, p_i^*$  Paire pôles de conjugué complexe

Néanmoins, Mukherjee et ses collègues [18] ont établi une relation entre les fréquences de résonance et les paramètres du modèle (capacités et inductances), qui est exprimée comme suit :

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{oci}^2} = \sum_{i=1}^N (l_{ii})C_{si} + \sum_{j=1}^N (M_{0,j})C_{gi} \quad (3.07)$$

$\omega_{oci} = 2\pi O_{cnfi}$  La  $i_{th}$  fréquence de résonance (pulsation) ;

$l_{ii}$  Inductance propre du  $i_{th}$  disque ;

$C_s$  Capacité série du  $i_{th}$  disque ;

$C_g$  Capacité shunt du  $i_{th}$  disque ;

$M_{0,j}$  Inductance totale entre la fin de la ligne et la fin du  $i_{th}$  disque

### 3.4.3. Réponse en haute fréquence (sous-bande HFR)

Aux fréquences plus élevées, l'effet capacitif peut être exprimé par l'équation (3.08). La courbe diminue avec l'augmentation de la fréquence, comme le montre la Figure 3.2. La capacité globale représente une valeur équivalente aux capacités shunt et série de toutes les sections et doit rester approximativement constante. Par conséquent, les paramètres importants dans cette zone sont  $C_{eq}$ ,  $C_g$ ,  $C_s$ , [2].

$$Z(s)_{HFR} = \frac{\sin(\theta)}{sC_{eq}} \quad (3.08)$$

$$\text{Avec : } C_{eq} = \frac{C_g}{2} + \frac{1}{\frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_g + \frac{1}{\frac{1}{C_s + \dots}}}} \quad (3.09)$$

## 3.5. Auto-construction du modèle équivalent de l'enroulement de Transformateur

### 3.5.1. Auto-détermination de la résistance et de l'inductance équivalente

$$R_{dc}, L_{eq}$$

Le modèle du circuit équivalent pour les fréquences basses inférieures à 1000 Hz a été simplifié et se compose des éléments  $R_{dc}$ ,  $l_s$  et  $M_{i,j}$ . La fonction de transfert est donnée par l'Eq. (3.01). Les impédances mesurées dans la plage de fréquences LFR sont des nombres complexes, où la partie

réelle représente la résistance équivalente  $R_{dc}$  (3.10), tandis que la partie imaginaire représente la réactance  $X(f)_{LFR}$  dans l'équation (3.02).

Où :

$$R_{dc} = Re(Z(f)_{LFR}) = N.r \quad (3.10)$$

$r$  : résistance par section

$N$  : le nombre de sections.

$$L_{eq} = \frac{Im(Z(f)_{LFR})}{\omega} = \frac{X(f)_{LFR}}{\omega}$$

### 3.5.2. Auto estimations des inductances propres et mutuelles $l_s$ et $M$

Afin de trouver la solution optimale correspondant aux données de mesure de la sous-bande LFR, l'expression (2) a été simplifiée pour obtenir l'équation de la réactance (3.13). Cette équation contient deux inconnues  $l_s$  et  $\lambda$ , qui sont considérées comme la fonction objectif de l'algorithme de recherche pour estimer  $l_s$  et  $\lambda$ , et les inductances mutuelles  $M_{i,j}$  [2]

$$X(f)_{LFR} = \omega N(l_s + l_m) \quad (3.11)$$

Où :  $l_m = 2 \sum_{i=1}^{N-1} (N-i) M_{i,i+1}$  est l'inductance mutuelle globale

#### 3.5.2.1 Espace de recherche de l'inductance propre et mutuelles

Comme mentionné précédemment, la définition de l'espace de recherche est une étape essentielle dans l'estimation des paramètres des circuits équivalents mutuellement couplés. Cependant, Mukharji et al, [19] ont souligné qu'il n'existe pas de procédure directe pour déterminer les limites de cet espace de recherche. Par conséquent, ces limites peuvent être ajustées en fonction de l'expérience, des essais et des connaissances spécifiques au domaine.

La méthode proposée par les auteurs dans la référence [19] présente un avantage significatif en termes de réduction de l'espace de recherche. Cela est réalisé en calculant les valeurs de  $l_s$  et  $M_{i,j}$  à partir de deux mesures effectuées à partir de points internes des disques de l'enroulement. Les autres inductances mutuelles peuvent ensuite être déterminées en substituant leurs valeurs dans l'équation (3).

$$2 \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{N-i}{N}\right) \lambda_{min}^i l_s < 2 \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{N-i}{N}\right) M_{1,i+1} < 2 \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{N-i}{N}\right) \lambda_{max}^i l_s \quad (3.12)$$

(13) devient comme suite :  $\beta_{Nmin}l_s < l_m < \beta_{Nmax}l_s$

$$\beta_N = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (N-i)\lambda^i$$

Et  $l_m = \beta_N l_s$  ou  $0 < \beta_N < N-1$

Remplaçant  $l_m$  dans l'équation (3.11) devienne (3.13)

$$\begin{aligned} X(f)_{LFR} &= \omega N l_s \left( \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (N-i)\lambda^i + 1 \right) \\ &= \omega N l_s (\beta_N + 1) \end{aligned} \quad (3.13)$$

L'espace de recherche de l'inductance propre  $l_s$  est :

$$\begin{aligned} l_{s \max} &= \frac{X(f)_{LFR}}{\omega \cdot N \cdot (\beta_{Nmin} + 1)} = \frac{1}{(\beta_{Nmin} + 1)} \frac{L_{eq}}{N} \\ l_{s \min} &= \frac{X(f)_{LFR}}{\omega \cdot N \cdot (\beta_{Nmax} + 1)} = \frac{1}{(\beta_{Nmax} + 1)} \frac{L_{eq}}{N} \end{aligned}$$

Les paramètres  $\lambda$  et  $l_s$  sont estimés à partir de l'équation (3.13) dans le but de minimiser la différence entre la courbe  $Z(f)L$  mesurée et la courbe simulée par le modèle équivalent. Ensuite, toutes les inductances mutuelles sont calculées en substituant les valeurs de  $l_s$  et  $\lambda$  dans l'équation (3.03).

### 3.5.3. Auto estimations des capacités séries et shunts $C_s$ et $C_g$

L'estimation des capacités du modèle mutuellement couplé a été mise en évidence dans plusieurs types de recherches. Mukherjee et al [12] ont réalisé une estimation basée sur la corrélation entre les fréquences de résonance et les paramètres d'enroulement tels que les capacités et les inductances comme mentionné ci-dessus dans l'équation (3.07).

Afin de simplifier les calculs, il est nécessaire de déterminer l'inductance totale  $M$  dans l'équation (3.07), qui peut être calculée à l'aide de l'équation (3.14). De plus, la somme des inductances totales est donnée par l'équation (3.15). Après simplification, la relation de l'équation (3.07) est illustrée dans l'équation (3.16).

$$M_{0,N} = N l_s (1 + \beta_N) \quad \beta_N = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (N-i)\lambda^i \quad (3.14)$$

$$\sum_1^N M_{0,N} = l_s \sum_1^N N (1 + \beta_N) \quad (3.15)$$

Lorsque la structure d'enroulement est uniforme, les capacités sont réparties de manière symétrique sur les disques d'enroulement. Dans ce cas, toutes les capacités en série et en shunt de l'équation (3.07) sont identiques, c'est-à-dire  $C_{si} = C_s$  et  $C_{gi} = C_g$ , respectivement, et les inductances propres sont également identiques, c'est-à-dire  $l_i = l_s$ . Après simplification, l'équation (3.07) se réduit à :

$$NC_s + \beta C_g = \delta \quad (3.16)$$

$$\text{Avec : } \delta = \frac{1}{l_s} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{sci}^2}, \quad \beta = \sum_1^N N(1 + \beta_N), \quad \text{et } \beta_N = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (N - i) \lambda^i$$

### 3.5.3.1. Auto-restriction de l'espace de recherche des capacités $C_s$ et $C_g$

Afin de finaliser la construction du circuit équivalent, il est nécessaire de limiter les valeurs des capacités  $C_g$  et  $C_s$  dans les bornes supérieure et inférieure de l'espace de recherche. Le circuit équivalent représenté dans la Figure 3.1 adopte une configuration en réseau en échelle RLC qui permet de reproduire le signal FRA. Cependant, l'inductance équivalente et la capacité shunt du réseau LC présentent une résonance série. Par conséquent, le premier pic est largement influencé par la capacité shunt effective  $C_{g_{eff}}$  [2]

$$C_{g_{ocnf1}} = \frac{1}{N(2\pi i_{ocnf1})^2 L_{eq}} \quad (3.17)$$

De plus, afin de restreindre l'espace de recherche des capacités et de faciliter la restriction autonome, il est possible d'utiliser cette capacité, qui correspond à la première résonance  $C_g$  dans l'équation (3.17), pour obtenir une valeur approximative de la capacité shunt  $C_g$ .

En remplaçant la valeur de  $C_g$  dans l'équation (3.16), on peut également déterminer une valeur approximative de la capacité série  $C_s$ . L'espace de recherche des capacités ainsi obtenu est décrit par l'équation (3.18).

$$\frac{C_{g_{ocnf1}}}{n} < C_g < nC_{g_{ocnf1}} \quad (3.18)$$

$$\frac{C_{s_{ocnf1}}}{n} < C_s < nC_{s_{ocnf1}}$$

### **3.6. Description de la méthode « FRA-SMI » proposée pour automatiser la modélisation de l'enroulement du transformateur**

Pour interpréter les données de mesure FRA, on commence par appliquer un filtrage numérique afin d'éliminer les bruits du signal. Ensuite, pour mettre en évidence l'importance des paramètres dans chaque gamme de fréquences, on utilise une division dynamique en sous-bandes de fréquences. Cela permet de séparer les trois régions de fréquences : LFR (basses fréquences), MFR (fréquences moyennes) et HFR (hautes fréquences).

L'extraction des différents paramètres qui composent le modèle est réalisée de manière séparée pour chaque sous-bande, comme illustré dans la Figure 3.2, et pour cela on travaille avec l'algorithme ANT.

Dans le cadre de cette utilisation pour l'identification des inductances propres mutuelles et des capacités, plusieurs aspects sont nécessaires pour sa mise en œuvre efficace. Cela comprend la définition d'une fonction objectif appropriée, ainsi que la spécification de l'espace de recherche des paramètres. Afin d'améliorer l'efficacité et la précision de l'optimisation, des simplifications mathématiques ont été appliquées pour restreindre l'espace de recherche. Ces simplifications sont examinées en détail ci-dessous, fournissant ainsi une approche plus ciblée pour l'estimation précise des paramètres, [7].

L'approche d'estimation repose sur un critère de performance qui vise à minimiser l'écart entre les courbes mesurées LFR, MFR et HFR et celles simulées à partir du modèle équivalent. Cet objectif est illustré dans l'organigramme de la Figure 3.3, où différentes étapes sont suivies pour évaluer et améliorer la concordance entre les données expérimentales et les prédictions du modèle équivalent.



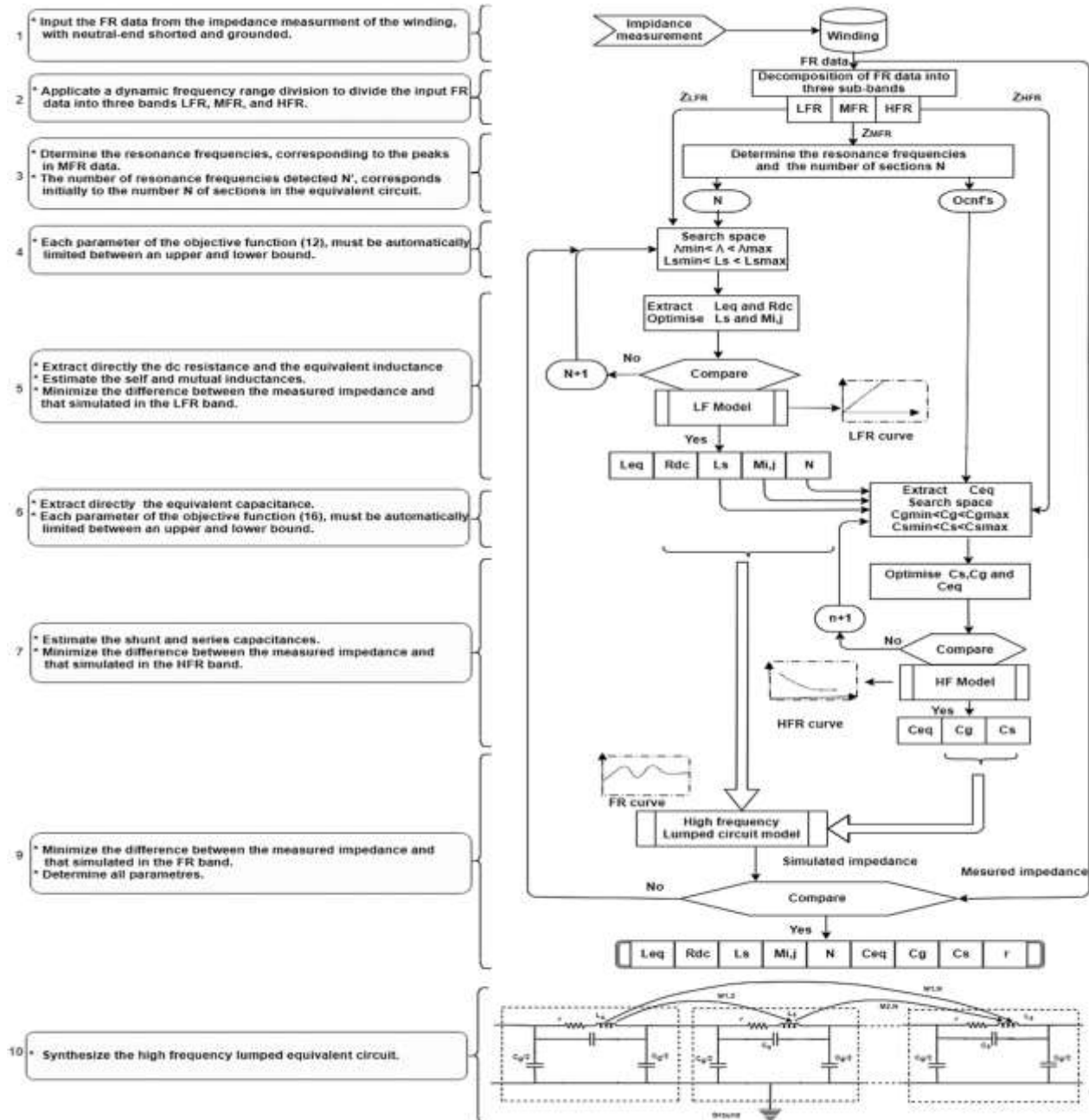


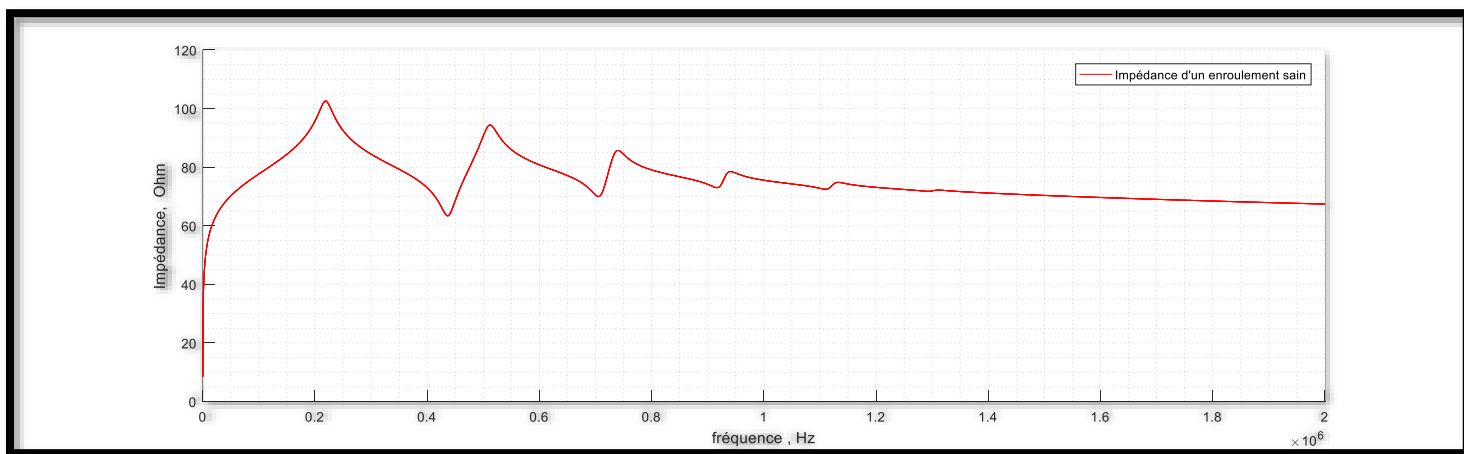
Figure 3.3. Représentation graphique de la procédure proposée [7]

### 3.7. Validation expérimentale de la méthode proposée « FRA-SMI»

Nous avons mise en œuvre la méthode FRA-SMI sur six enroulements réels de laboratoire comme le montre la Figure 3.4. Le processus de synthèse du circuit d'interconnexion commence par la mesure de la réponse en fréquence (FRA) illustrée à la Figure 3.5. L'objectif principal de la méthode FRA-SMI est d'identifier tous les paramètres nécessaires pour reproduire un comportement similaire aux enroulements testés.



**Figure 3.4. Représentation du test FRA expérimentale de l'enroulements réels au laboratoire de l'université DR. YAHIA Fares de Médéa**



**Figure 3.5. Courbe FRA mesurée à l'état sain de l'enroulements réel.**

## - Étude expérimentale d'un cas

La procédure d'identification des paramètres est réalisée en suivant l'organigramme présenté Figure 3.3. Tous les paramètres requis par l'algorithme sont extraits directement à partir des données mesurées de la réponse en fréquence de l'impédance, de la manière suivante :

Les fréquences de résonance,  $O_{cnf}$ , sont extraites de la plage MFR, telle qu'illustrée dans la Figure 3.5, aux fréquences suivantes : (220, 513, 741, 942, 1134) kHz.

Le nombre de sections  $N$ , du circuit équivalent est déterminé, initialement égal au nombre de fréquences  $O_{cnf}$  extraites. Dans ce cas,  $N = 6$ .

La résistance équivalente de l'enroulement est extraite à partir des données LFR et a une valeur de  $R_d = 2,4 \Omega$ .

La valeur de l'inductance équivalente est extraite de la bande LFR et a une valeur de  $L_{eq} = 10.1 \text{ mH}$  (voir section 3.5.1).

Afin de trouver la solution optimale pour l'inductance propre et les inductances mutuelles, il est nécessaire de spécifier la fonction objectif et l'espace de recherche pour l'algorithme d'optimisation. De plus, pour restreindre les limites de l'espace de recherche des inductances propres et mutuelles, les valeurs supérieure et inférieure de  $\lambda$  sont choisies ( $\lambda_{min} = 0.452$  et  $\lambda_{max} = 0.711$ ). Ensuite, les bornes des inductances propres sont obtenues de la manière suivante :

La limite supérieure de  $\lambda_m = 0,711$

La limite inférieure de  $\lambda_m = 0,452$

La limite supérieure de  $l_s = 0.783 \text{ mH}$

La limite inférieure de  $l_s = 0.488 \text{ mH}$

Sachant que :  $\beta_{min} = 1.1522$  et  $\beta_{max} = 2.4494$

L'algorithme a été utilisé pour optimiser l'inductance propre,  $l_s$ , et le coefficient  $\lambda$  afin d'atteindre une erreur minimale (12). Les résultats estimés sont  $\lambda = 0,53$

et  $l_s = 0.7084 \text{ mH}$ .

Pour calculer les inductances mutuelles  $M_{1,i+1}$ , on substitue les valeurs de  $l_s$  et  $\lambda$  dans l'équation (3.03). Les valeurs estimées de l'inductance propre et des inductances mutuelles sont fournies dans le Tableau 3.1.

Paramètres	Valeurs
<b>N</b>	<b>6</b>
<b><math>L_{eq}</math></b>	<b>10.1</b>
<b><math>l_s</math></b>	<b>0.7084</b>
<b><math>M_{1,2}</math></b>	<b>0.3605</b>
<b><math>M_{1,3}</math></b>	<b>0.1835</b>
<b><math>M_{1,4}</math></b>	<b>0.0934</b>
<b><math>M_{1,5}</math></b>	<b>0.0475</b>
<b><math>M_{1,6}</math></b>	<b>0.0242</b>

**Tableau 3.1. Valeur estimées des inductances (mH)**

Dans la bande de fréquence HFR, nous avons utilisé l'équation (3.16) comme fonction objectif pour minimiser l'erreur entre l'impédance mesurée  $Z(f)H$  et la sortie du modèle (Figure 3.6.) En suivant la procédure de calcul détaillée dans la section (3.5.3.1), nous avons appliqué les étapes nécessaires pour obtenir les résultats souhaités.

La valeur approximative de la capacité shunt,  $C_g$ , est calculée en utilisant la première fréquence de résonance, ce qui donne  $C_{g0cnf} = 27.554$  pF. En substituant cette valeur dans l'équation (3.16) tel que  $\delta = 1.0351$ , on obtient une estimation approximative de la capacité série,  $C_s$ , qui est de  $C_{s0cnf} = 63.688$  pF. En fixant un coefficient ( $n = 1.75$ ), les bornes sont déterminées comme suit.

Les limites de recherche de la capacité shunt  $C_g$  :

- $C_{gmax} = 48.2195$  pF
- $C_{gmin} = 15.7451$  pF

Les limites de recherche de la capacité série  $C_s$  :

- $C_{Smax} = 111.454$  pF
- $C_{Smin} = 36.3931$  pF

Paramètres	Valeurs
$C_s$	63.283
$C_g$	18.136
$C_{eq}$	33.89

Tableau 3.2. Valeurs estimées des capacités (pF)

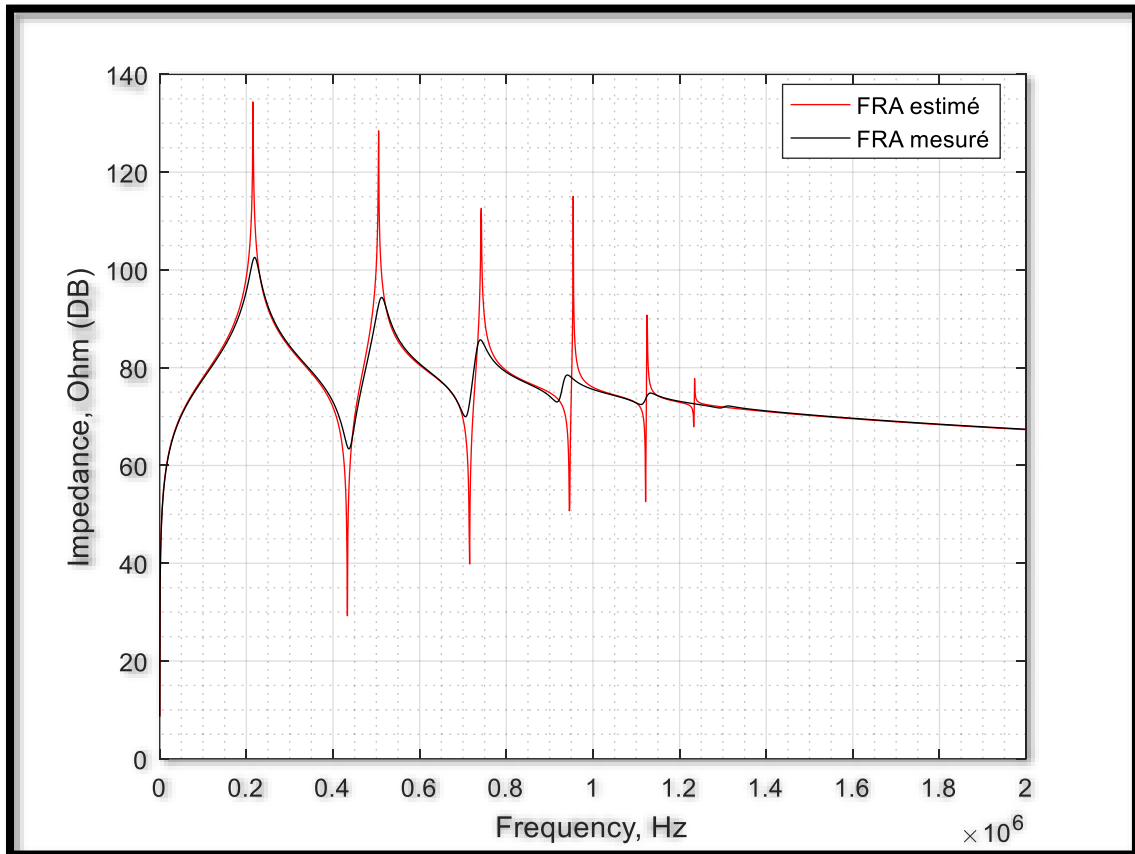


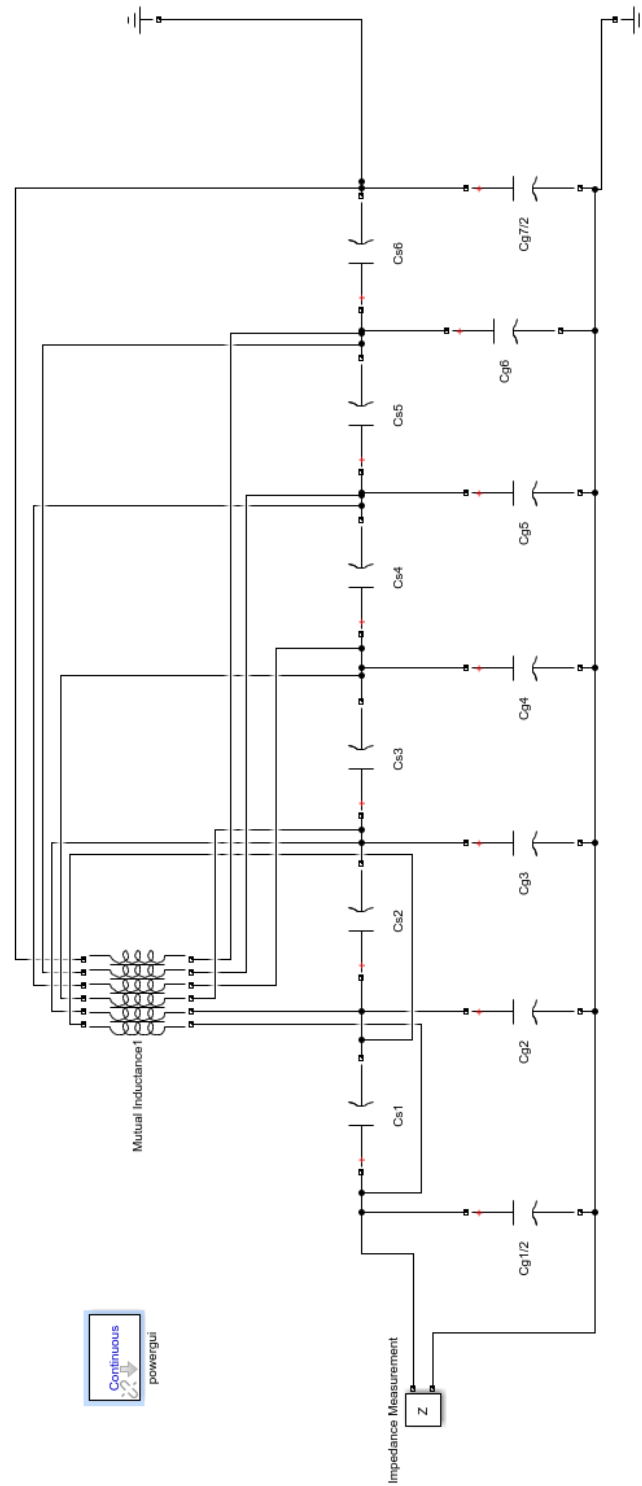
Figure 3.6. Comparaison entre  $Z(f)_{FR}$  mesuré et celle estimé par FRA-SMI.

En outre, la comparaison entre les valeurs de fréquences de résonance mesurées et estimées est présentée dans le Tableau 3.3. Il est évident que ces valeurs sont identifiées avec une grande précision en utilisant l'approche FRA, avec une erreur calculée qui ne dépasse pas 1.81%. Cela démontre l'efficacité de la méthode dans la détermination précise des fréquences de résonance.

<b>Fréquence de résonance</b>	<b>Mesuré</b>	<b>Identifié</b>	<b>Déviaton</b>
$O_{cnf,1}$	220	216	1.81%
$O_{cnf,2}$	513	506	1.36%
$O_{cnf,3}$	741	743	0.26%
$O_{cnf,4}$	942	955	1.38%
$O_{cnf,5}$	1134	1125	0.79%

**Tableau 3.3. Comparaison entre les fréquences propres mesurées et celles estimées**

Le circuit synthétisé, composé de six sections, a été construit en utilisant les paramètres spécifiés (résistance, inductances et capacités exprimées en  $\Omega$ , mH et pF respectivement). Il est représenté dans la Figure 3.7. Les tracés de sa réponse en fréquence sont présentés dans la Figure 3.6, où toutes les fréquences propres de l'enroulement du modèle sont clairement visibles. Cette représentation graphique permet d'observer la variation de l'impédance en fonction de la fréquence de manière détaillée.



**Figure 3.7. Circuit équivalent synthétisé de l'enroulement de transformateur sous test par FRA-SMI**

### 3.8. Conclusion

La méthodologie FRA a été utilisée avec succès pour synthétiser le modèle équivalent mutuellement couplé de l'enroulement de transformateur, en se basant sur l'interprétation de la morphologie du signal FRA. Toutefois, des améliorations ont été apportées afin de construire un circuit équivalent quasi unique de l'enroulement, selon les éléments suivants :

- Une nouvelle approche de restriction de l'espace de recherche a été proposée pour déterminer la matrice d'inductance et la matrice capacitive. Des simplifications mathématiques ont été employées afin de réduire de manière significative l'espace de recherche pour l'algorithme d'optimisation. Cette méthode permet d'obtenir une solution précise dans la gamme des basses fréquences, tout en optimisant le temps de calcul.

En outre, les avantages de cette approche peuvent être énumérés de la manière suivante :

- Seule la mesure FRA est nécessaire en tant qu'entrée.
- Aucune connaissance préalable de la construction de l'enroulement du transformateur n'est requise.
- Réduction significative de l'espace de recherche des paramètres.
- Amélioration de l'efficacité du temps d'exécution.
- Synthèse d'un réseau d'échelle presque unique.
- Facilité d'implémentation.

Par conséquent, en exploitant uniquement une seule mesure d'amplitude de réponse en fréquence et en utilisant les nouvelles procédures de restriction de l'espace de recherche, la méthode proposée a réussi à construire avec succès un réseau équivalent mutuellement couplé unique pour l'enroulement du transformateur. Les résultats obtenus démontrent que FRA se positionne comme un outil autonome capable de déterminer les paramètres de l'enroulement du transformateur et de diagnostiquer ses défauts internes, sans nécessiter de connaissances préalables sur sa construction. À l'heure actuelle, il est possible d'effectuer des mesures FRA à la fois hors ligne et en ligne, ce qui rend l'approche proposée pratiquement applicable dans les techniques de surveillance et de diagnostic.



**Chapitre 4 :**  
**localisation du**  
**déplacement axial**

## **4.1. Introduction**

Les transformateurs subissent des forces mécaniques excessives au cours de leur durée de vie, ce qui entraîne des déplacements et/ou des déformations de l'enroulement. Les effets de ces dommages sont cumulatifs et conduisent souvent à des défaillances majeures. Aux premiers temps, les dommages sont généralement limités à une petite partie de l'enroulement. L'objectif est donc de repérer les dommages à leurs débuts. L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) est un outil puissant et sensible utilisé pour évaluer l'intégrité mécanique et géométrique des transformateurs de puissance, y compris les enroulements et le circuit magnétique. Elle consiste à mesurer les fonctions de transfert sur une large gamme de fréquences. Les dommages mécaniques, tels que le déplacement ou la déformation des enroulements d'un transformateur, sont des problèmes complexes qui nécessitent une détection précoce, une localisation précise et une évaluation approfondie de leur gravité pour éviter d'éventuelles défaillances majeures. Une fois le dommage détecté, la tâche suivante consiste à localiser sa position et à estimer sa gravité.

Ce présent chapitre est organisé comme suit :

- 1-Détermination des paramètres de l'enroulement l'aide de FRA.
- 2-Étude des différents déplacements axiaux.
- 3-Estimation de la localisation et de la gravité de ces déplacements axiaux.

## **4.2. Enroulement et paramètres obtenus par l'analyse de réponse en fréquence (FRA)**

Ce chapitre fournit une méthode pour renforcer l'approche et prouver sa validité, une étude expérimentale a été réalisée sur un enroulement de transformateur isolé comprenant 06 disques. Chaque disque contient 66 spires. L'enroulement a été réalisé à l'aide d'un fil de cuivre plat d'une largeur de 3 mm et d'une épaisseur de 0,8 mm. Les paramètres de l'enroulement et l'impédance ont été mesurés de manière autonome à l'aide du logiciel MATLAB version 2016B [20] via un mesureur LCR (Inductance-Capacitance-Résistance) présentant les caractéristiques suivantes :

- Plage de fréquence : de 20 Hz à 5 MHz
- Mesure effectuée à l'aide d'un câble coaxial de 50 ohms
- Précision de base de 0,1 % avec une résolution de 6 chiffres

### 4.3. Paramètres principaux du modèle mutuellement couplé équivalent à un enroulement du transformateur

On procède à la détermination des principaux paramètres du modèle mutuellement couplé équivalent à un enroulement du transformateur.

#### 4.3.1. Fréquences de résonances

Comme le montre la Figure 4.1, la courbe de réponse en fréquence (FRA) présente des points de résonance et d'antirésonance ( $O_{cnfs}$  et  $S_{cnfs}$ ) dus aux effets inductifs et capacitifs de l'enroulement. Le Tableau 4.1 montre les fréquences de résonance et d'antirésonance ( $O_{cnfs}$  et  $S_{cnfs}$ ) obtenues à partir de la réponse en fréquence des enroulements en bon état.

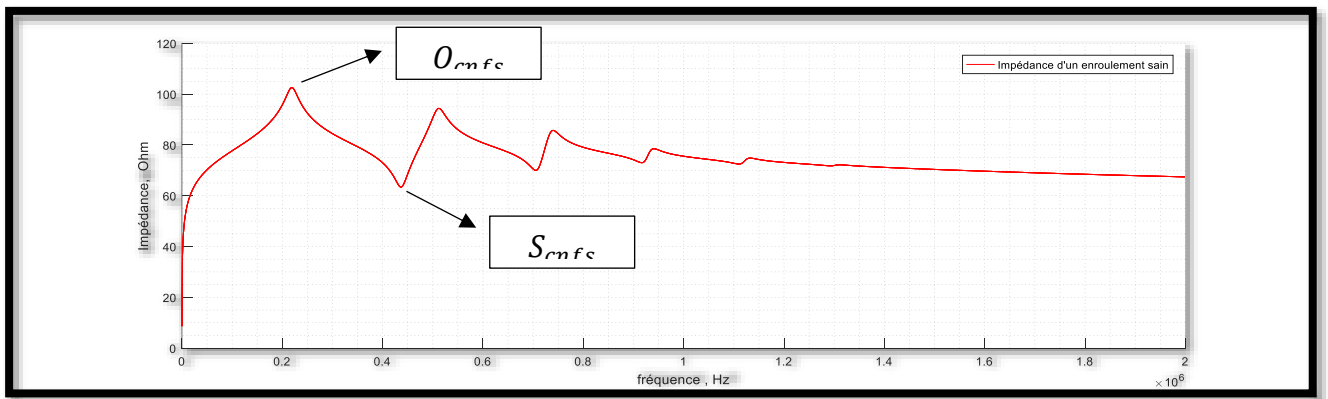


Figure 4.1. Points de résonances et d'antirésonances ( $O_{cnfs}$  et  $S_{cnfs}$ ) de la réponse fréquentielle de l'enroulement.

Fréquences de résonances et d'antirésonances (kHz)	$O_{cnfs}$		$S_{cnfs}$			
	$O_{cnfs}$	220	513	741	942	1134
	$S_{cnfs}$	38	706	917	1111	\

Tableau 4.1. Valeurs des fréquences de résonances et d'antirésonances ( $O_{cnfs}$  et  $S_{cnfs}$ )

### 4.3.2. Inductance équivalente ( $L_{eq}$ ) de l'enroulement du transformateur

On peut mesurer la valeur de l'inductance équivalente de l'enroulement à haute fréquence en utilisant l'approche de K.R Shah, telle que décrite dans [18]. Cette approche consiste à exciter l'enroulement sous test à haute fréquence et à déterminer la valeur de la réactance en utilisant l'amplitude et la phase de la courbe FRA. Ces caractéristiques peuvent être obtenues à l'aide d'un LCR mètre en utilisant la relation suivante. Cependant, la valeur de l'inductance de l'enroulement a été mesurée à 10 KHz à l'aide du LCR mètre, et elle reste pratiquement constante dans cette plage de fréquences, d'où  $L_{eq} = 9.6782 \text{ mH}$

$$L_{eq} = |Z| \frac{\sin \theta}{2\pi f} \quad (4.01)$$

### 4.3.3. Capacité shunt effective ( $C_{g,eff}$ )

Pour mesurer la capacité shunt effective d'un enroulement, il faut isoler l'extrémité neutre de l'enroulement de la terre et court-circuiter la ligne et les bornes des neutres ensemble. Une excitation sinusoïdale de fréquence inférieure à la fréquence de résonance  $O_{cnf}$  est alors appliquée entre l'extrémité de la ligne et la masse ensuite l'impédance correspondante est mesurée. On peut calculer la capacité (C) à l'aide de l'équation (4.02). La valeur de capacité  $C_{g,eff}$  de la bobine a été mesurée à 3 kHz à l'aide d'un compteur LCR pour obtenir la valeur  $C_{g,eff} \approx 118.6 \text{ pF}$

$$C = \frac{\sin \theta}{2\pi f |Z|} \quad (4.02)$$

### 4.3.4. Capacité équivalente ( $C_{eq}$ ) de l'enroulement

Il est généralement admis que l'inductance a un effet négligeable au-dessus de sa valeur maximale. Même si la phase de la réponse d'impédance est proche de  $90^\circ$ , l'effet de la résistance est négligeable. Dans cette gamme de fréquences  $O_{cnf}$ , la capacité équivalente de l'enroulement peut être obtenue à partir de la courbe d'impédance de l'enroulement. Cependant, en utilisant l'équation (4.02), la valeur de capacité équivalente est approximée à des fréquences bien au-dessus de la fréquence la plus élevée  $O_{cnf}$ .  $C_{eq} \approx 33.44 \text{ pF}$  à environ 500 kHz, l'angle de phase est proche de  $-90^\circ$  (environ  $87^\circ$ ).

## 4.4. Études des déplacements axiaux

L'analyse de réponse en fréquence (FRA) est une technique de diagnostic utilisée pour détecter les défauts dans les enroulements du transformateur. A cet effet, des modifications ont été

apportées à la géométrie des enroulements par modification du déplacement axial des différents disques.

#### 4.4.1. Test FRA avec aluminium, neutre flottant, 06 disques (court-circuit) avec un déplacement axial entre les disques 2 et 3

Les courbes FRA de la Figure 4.2, représentent l'impédance de défaut en fonction de la Fréquence, le déplacement de disque 3-2 (5mm, 8 mm et 14 mm).

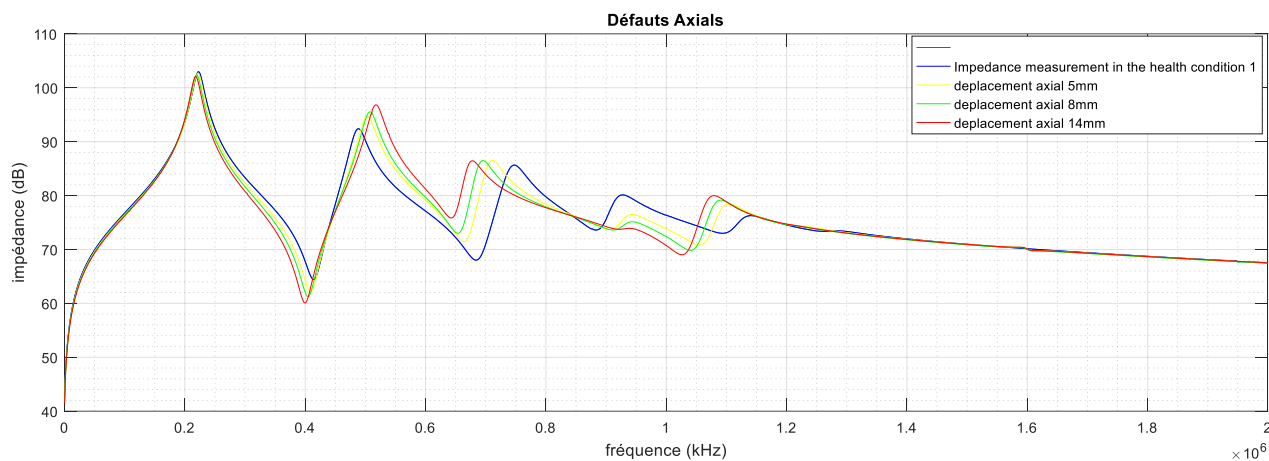


Figure 4.2 : déplacement entre les disques 2 et 3 (5mm, 8 mm et 14 mm).

- 5mm

Fréquences de résonances et d'antirésonances (kHz)					
$O_{cnfs}$	221.1	503.3	711.4	934.5	1105

- 8 mm

Fréquences de résonances et d'antirésonances (kHz)					
$O_{cnfs}$	219.1	507.3	695.6	943.5	1091

- 14 mm

Fréquences de résonances et d'antirésonances (kHz)					
$O_{cnfs}$	218.1	517.3	677.4	938.5	1080

#### 4.4.2. Test FRA avec aluminium, neutre flottant, 06 disques (court-circuit) avec un déplacement axial entre les disques 5 et 6

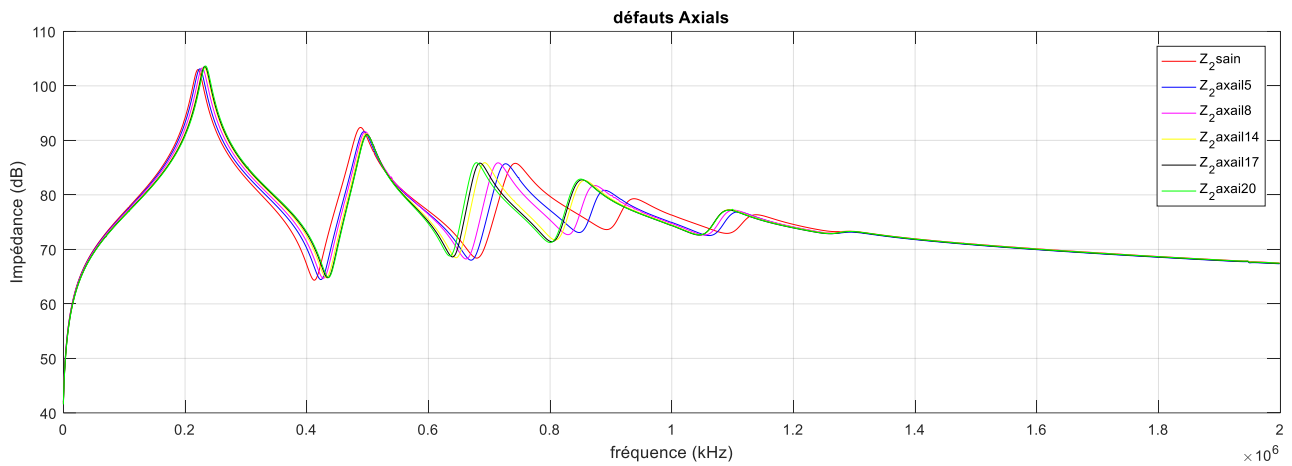


Figure 4.3. Déplacement entre les disques 5 et 6 (5mm, 8 mm, 14 mm, 17mm et 20mm).

- 5mm

Fréquences de résonances et d'antirésonances (kHz)					
$O_{cnfs}$	224.1	494.3	727.4	890.5	1110

- 8 mm

Fréquences de résonances et d'antirésonances (kHz)					
$O_{cnfs}$	228.1	496.3	714.4	873.4	1102

- 14 mm

Fréquences de résonances et d'antirésonances (kHz)					
$O_{cnfs}$	231.1	498.3	692.4	857.4	1096

- 17 mm

Fréquences de résonances et d'antirésonances (kHz)					
$O_{cnfs}$	232.1	499.3	684.4	852.4	1095

- 20 mm :

Fréquences de résonances et d'antirésonances (kHz)					
$O_{cnfs}$	234.1	499.3	679.4	850.4	1100

#### 4.5. Diagnostic des défauts des bobinages du transformateur

Des imperfections telles que l'allongement et les court-circuits dans les enroulements de transformateur conduisent à une structure d'enroulement inégale et modifient les paramètres du modèle de couplage équivalent. Cette dissymétrie de bobinage rend le calcul de ces paramètres très difficile. Cependant, certains de ces paramètres peuvent être mesurés avec un compteur

LCR à régime de fréquence. Par conséquent, la fréquence de résonance, l'inductance et la capacité peuvent être utilisées comme outils pour analyser et interpréter les défauts d'enroulement du transformateur. Ces paramètres permettent d'identifier et d'évaluer la sévérité de ces déformations, [18].

#### 4.5.1. Localisation des déplacements axiaux

La localisation et l'évaluation de l'ampleur des dommages mécaniques réels sur les enroulements du transformateur représentent une tâche extrêmement laborieuse, qui a été abordée par quelques chercheurs. Pour résoudre ce problème, P. Mukherjee [12] a proposé une formule analytique reliant la somme de l'inverse des carrés des fréquences de résonance aux paramètres du modèle mutuellement couplé (équation 4.03). Cette relation peut être utilisée comme un outil pour localiser et évaluer les déformations des enroulements. Dans cette section, nous appliquons l'approche proposée par P. Mukherjee afin de localiser la position des déformations axiaux entre les disques de l'enroulement, puis nous évaluons l'ampleur de ces déformations en examinant la courbe de l'inductance équivalente en fonction des mouvements des disques de l'enroulement.

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{oc_i}^2} = \sum_{i=1}^N L_{ii} C_{si} + \sum_{i=1}^N M_{0i} C_{gi} \quad (4.03)$$

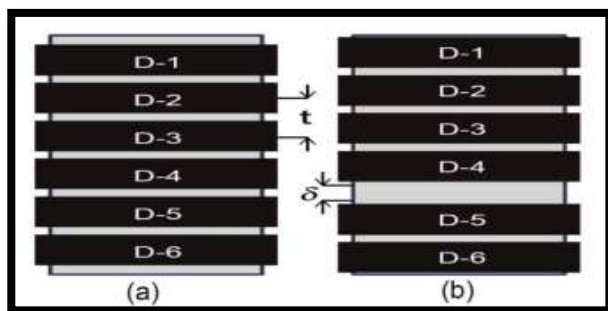
$$\text{Avec : } \Psi_{ocnf} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{oc_i}^2}$$

$\Psi_{ocnf}$  : La somme des carrés des fréquences de résonance

$L_{ii}$  : L'inductance du disque i

$C_{si}$  : La capacité série du disque i

$M_{0i}$  : Les inductances équivalentes entre les disques i et i+1 de l'enroulement



**Figure 4.4. Schéma d'un enroulement a six doubles disques : (a) avant et (b) après un déplacement axial de l'ordre de  $\delta$**

Lorsqu'une bobine à  $N = 6$  spires est déformée axialement, plusieurs effets peuvent se produire selon le type de déformation et les propriétés de la bobine elle-même.



## 1. Changement d'inductance

L'inductance d'une bobine est généralement déterminée par sa forme, le nombre de tours et la présence ou l'absence d'un noyau magnétique. La déformation axiale peut modifier la forme de la bobine, entraînant une modification de l'inductance. La déformation peut comprimer la bobine et augmenter l'inductance, et l'expansion peut diminuer l'inductance.

## 2. Changement de résistance

La résistance de la bobine est généralement déterminée par le matériau conducteur utilisé et la longueur du fil. La déviation axiale peut modifier la longueur effective du fil et, par conséquent, la résistance. La résistance peut augmenter lorsque la bobine se dilate en raison de la déformation et diminuer lorsque la bobine se contracte en raison de la déformation.

## 3. Effet sur les champs magnétiques

La déformation axiale peut modifier la distribution du champ magnétique produit par la bobine. Cela peut affecter l'efficacité de la bobine dans certaines applications. Par exemple, si les enroulements de la bobine sont mal alignés en raison d'une déformation, une fuite de champ magnétique peut se produire et réduire l'efficacité globale de la bobine.

## 4. Influence mécanique

En plus des effets électromagnétiques, la déformation axiale peut avoir des effets mécaniques sur la bobine elle-même. Par exemple, une contrainte excessive peut endommager les fils et les connexions entre les spires, entraînant une défaillance de la bobine.

Il est important de noter que l'ampleur de l'effet de déformation axiale dépend de plusieurs facteurs tels que :

- L'amplitude de la contrainte, la flexibilité du matériau utilisé pour la bobine et la sensibilité de l'application dans laquelle la bobine est utilisée.

Dans certains cas, des techniques de conception spéciales peuvent être introduites pour minimiser les effets néfastes de la déviation axiale, [17].

- Utilisez des matériaux flexibles ou ajoutez un support structurel pour renforcer la bobine. Par conséquent, cette modification capacitive se manifeste dans le modèle mutuellement couplé, et il est possible de localiser le déplacement axial réel de la manière suivante :

### ❖ Détermination de $\Delta\Psi_{Ocnfs}$

Soit les fréquences des résonances ( $O_{cnfs}$ ) de la courbe FRA de l'enroulement avant et après la réalisation du déplacement axial, respectivement notées  $\omega_{Oci}$  et  $\hat{\omega}_{Oci}$ ,

Où  $i = 1, 2, \dots, N$ . Le changement relatif de  $\Delta\Psi_{0cnfs}$  peut être calculé de la manière suivante :  
[19]

$$\Delta\Psi_{0cnfs} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\hat{\omega}_{oci}^2} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{oci}^2} \quad (4.04)$$

❖ **Détermination de  $\Delta C_G$**

Mesure de la capacité de la terre avant et après le déplacement axial est calculé comme suit:

$$\Delta C_G = \hat{C}_G - C_G \quad (4.05)$$

❖ **Détermination de  $\Delta L_{eq}$**

Pour la démonstration, on considère un déplacement axial tel que décrit dans la Figure 4.4. Les valeurs mesurées  $L_{eq}$ ,  $\hat{L}_{eq}$  et la matrice d'inductance nominale  $\mathbb{L}$  sont nécessaires à cet effet. Révèle qu'il n'y aura pas de changement significatif dans les self-inductances des doubles disques, car leurs spires individuelles ne sont pas modifiées et leur intégrité mécanique individuelle reste intacte. Remarque : il y aura des changements mineurs dans les inductances propres. Mais comme la contribution des variations de l'inductance mutuelle est beaucoup plus importante que celle des variations des inductances propres, elles sont ignorées. De même, l'inductance mutuelle entre deux doubles disques n'est pas modifiée tant qu'ils sont présents du même côté du déplacement axial. Cela s'explique par le fait que leur espacement relatif reste inchangé. En revanche, les inductances mutuelles entre les doubles disques situés d'un côté ou de l'autre du déplacement axial subiront des changements significatifs à mesure qu'ils seront plus éloignés l'un de l'autre. Pour faciliter la visualisation, considérons la matrice d'inductance nominale, correspondant à la figure 4.5a, comme suit : [12]

$$\mathbb{L} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} & L_{15} & L_{16} \\ L_{12} & L_{22} & L_{23} & L_{24} & L_{25} & L_{26} \\ L_{13} & L_{23} & L_{33} & L_{34} & L_{35} & L_{36} \\ L_{14} & L_{24} & L_{34} & L_{44} & L_{45} & L_{46} \\ L_{15} & L_{25} & L_{35} & L_{45} & L_{55} & L_{56} \\ L_{16} & L_{26} & L_{36} & L_{46} & L_{56} & L_{66} \end{bmatrix} \quad (4.06)$$

Après un déplacement axial, la matrice d'inductance modifiée est désignée par  $\hat{\mathbb{L}}$ . La matrice  $\hat{\mathbb{L}}$  est représentée dans l'éqt (4.07) et les éléments subissant un changement (et devant être estimés) sont indiqués en grisé. Les autres restent inchangés.

$$\hat{\mathbb{L}} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} & L_{15} & L_{16} \\ L_{12} & L_{22} & L_{23} & L_{24} & L_{25} & L_{26} \\ L_{13} & L_{23} & L_{33} & L_{34} & L_{35} & L_{36} \\ L_{14} & L_{24} & L_{34} & L_{44} & L_{45} & L_{46} \\ L_{15} & L_{25} & L_{35} & L_{45} & L_{55} & L_{56} \\ L_{16} & L_{26} & L_{36} & L_{46} & L_{56} & L_{66} \end{bmatrix} \quad (4.07)$$

Mathématiquement, pour un déplacement axial se produisant entre les doubles disques  $D(n-1)$  and  $Dn$  (dans un enroulement à  $N$  doubles disques), le changement d'inductance est modélisé par un changement de  $L_{ij}$ .

Lorsque  $1 \leq i \leq n-1, n \leq j \leq N$  et pour  $n \leq i \leq N, 1 \leq j \leq n-1$ .

$L_{eq}$  est la somme des éléments individuels de  $\mathbb{L}$ , donc :

$$L_{eq} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N L_{ij} \quad (4.08)$$

Exprimée par :  $\Delta L_{eq} = \hat{L}_{eq} - L_{eq}$

#### 4.5.1.1. Localisation de la position de défaut

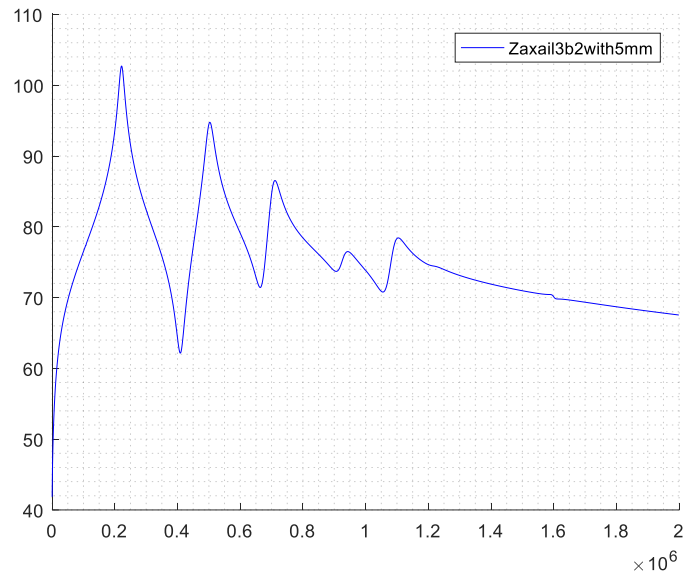


Figure 4.6. Déplacement axial entre D4 et D5 avec un déplacement plus ou moins important.

- **Déplacement axial entre les disques 3 et 2**

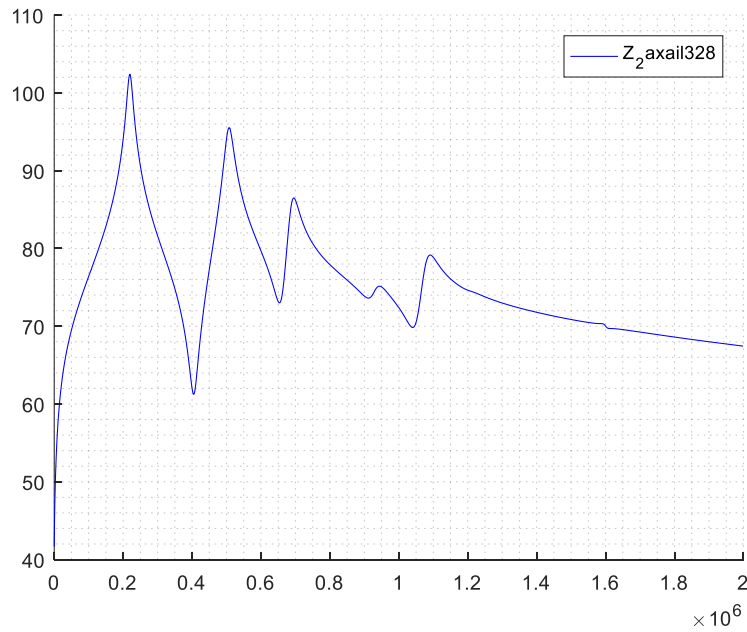
○ **5 mm**

- En utilisant l'équation (4.4) :  $\Delta\Psi_{Ocnfs} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\hat{\omega}_{Oci}^2} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{Oci}^2} = -2 \times 10^{-15}$
- D'après l'équation (4.5) :  $\Delta C_G = \hat{C}_G - C_G = 34.4 \text{ pF}$
- $\Delta L_{eq} = \hat{L}_{eq} - L_{eq} = -0.0518 \text{ mH}$



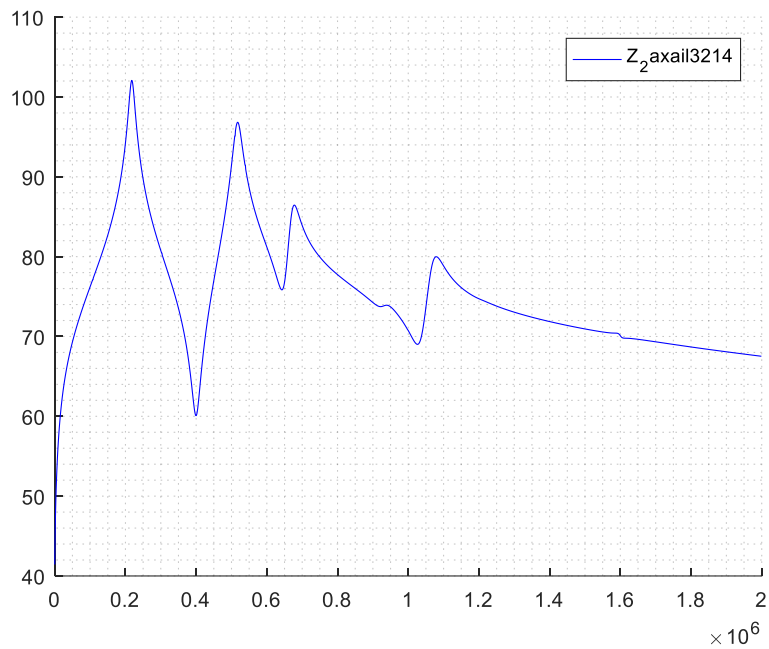
○ **8 mm**

- $\Delta\Psi_{Ocnfs} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\hat{\omega}_{Oci}^2} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{Oci}^2} = 8.82 \times 10^{-15}$
- $\Delta C_G = \hat{C}_G - C_G = 37.1 \text{ pF}$
- $\Delta L_{eq} = \hat{L}_{eq} - L_{eq} = -0.4965 \text{ mH}$



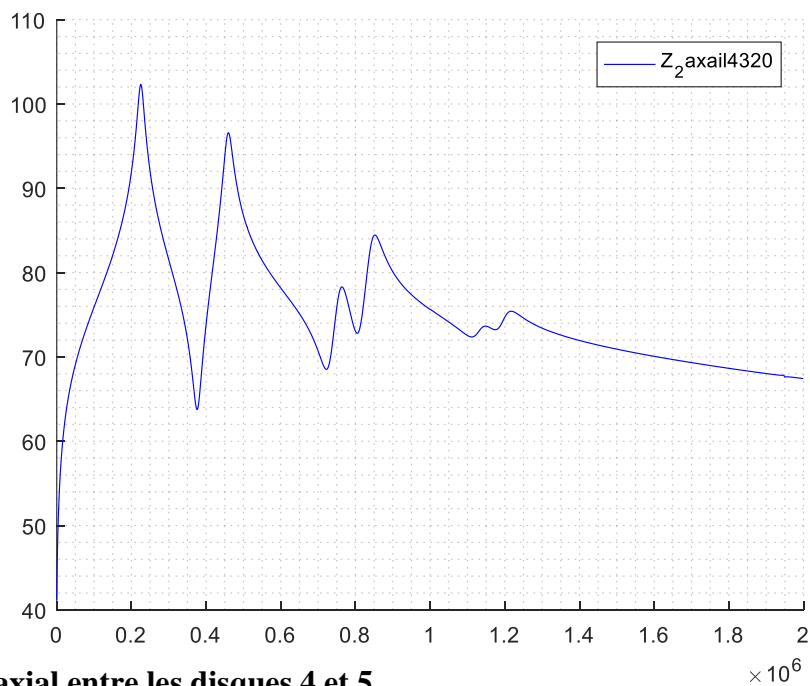
○ **14 mm**

- $\Delta\Psi_{Ocnfs} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\hat{\omega}_{oci}^2} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{oci}^2} = 1.348 \times 10^{-14}$
- $\Delta C_G = \hat{C}_G - C_G = 41.4 \text{ pF}$
- $\Delta L_{eq} = \hat{L}_{eq} - L_{eq} = -0.7147 \text{ mH}$



○ **20 mm**

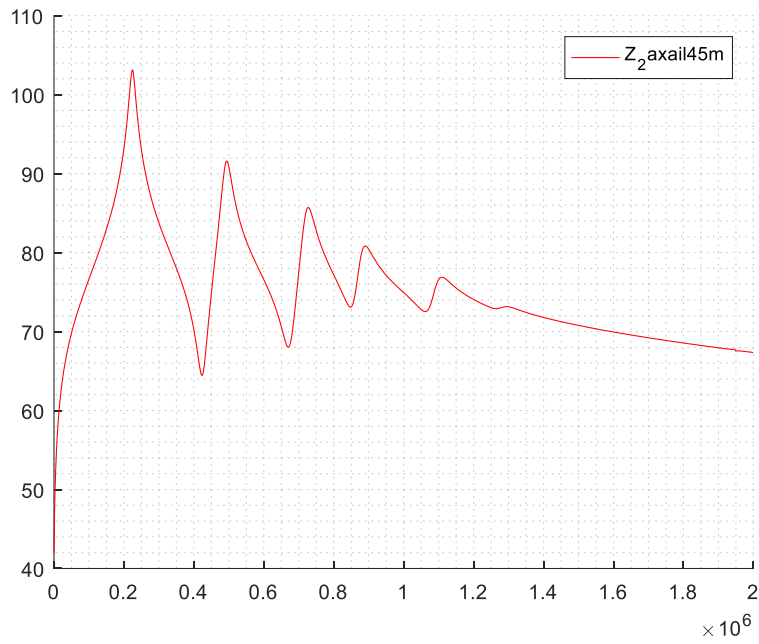
- $\Delta\Psi_{Ocnfs} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\hat{\omega}_{oci}^2} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{oci}^2} = -4.3 \times 10^{-15}$
- $\Delta C_G = \hat{C}_G - C_G = 11.4 \text{ pF}$
- $\Delta L_{eq} = \hat{L}_{eq} - L_{eq} = -0.8922 \text{ mH}$



- **Déplacement axial entre les disques 4 et 5**

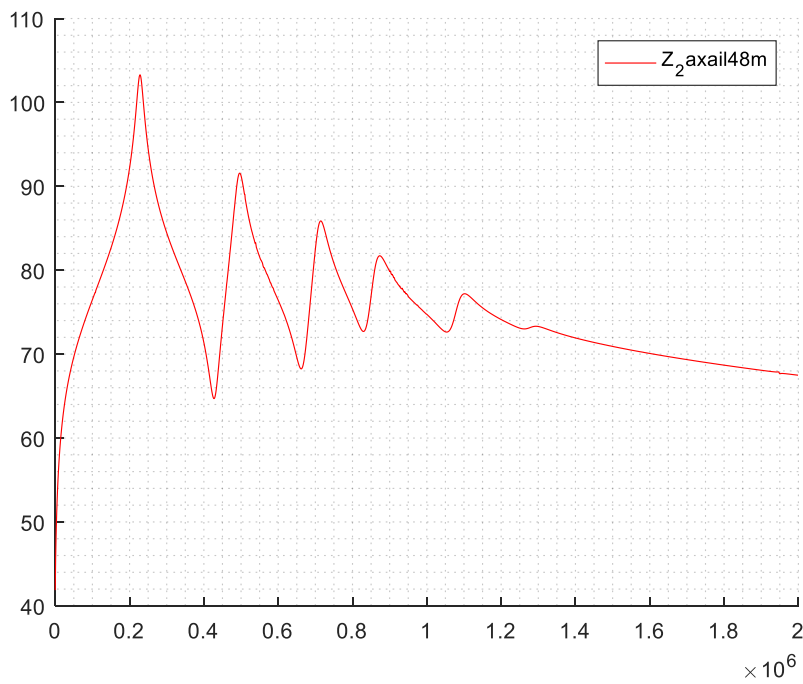
○ **5 mm**

- $\Delta\Psi_{Ocnfs} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\hat{\omega}_{oci}^2} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{oci}^2} = -1.08 \times 10^{-14}$
- $\Delta C_G = \hat{C}_G - C_G = 12 \text{ pF}$
- $\Delta L_{eq} = \hat{L}_{eq} - L_{eq} = -0.193 \text{ mH}$



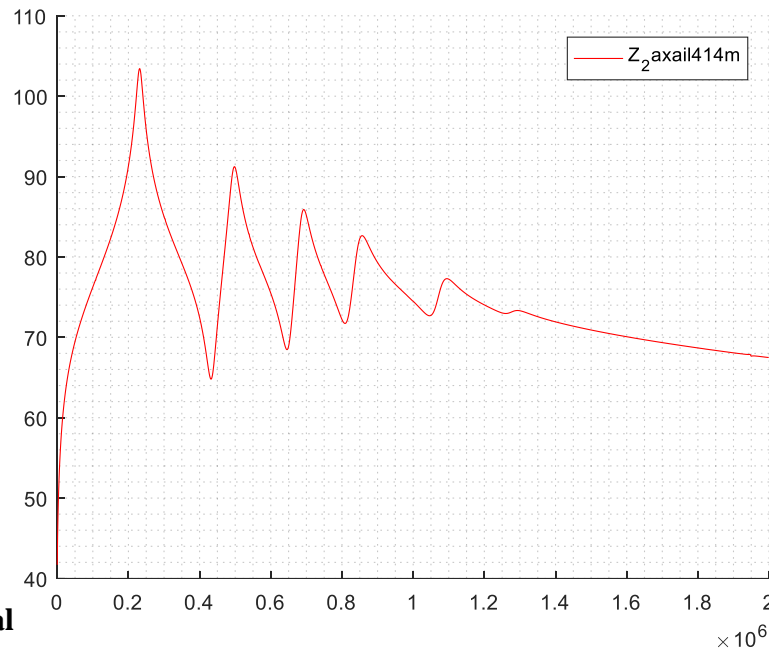
○ **8 mm**

- $\Delta\Psi_{Ocnfs} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\hat{\omega}_{oci}^2} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{oci}^2} = -2.58 \times 10^{-14}$
- $\Delta C_G = \hat{C}_G - C_G = 10.1 \text{ pF}$
- $\Delta L_{eq} = \hat{L}_{eq} - L_{eq} = -0.3162 \text{ mH}$



○ **14 mm**

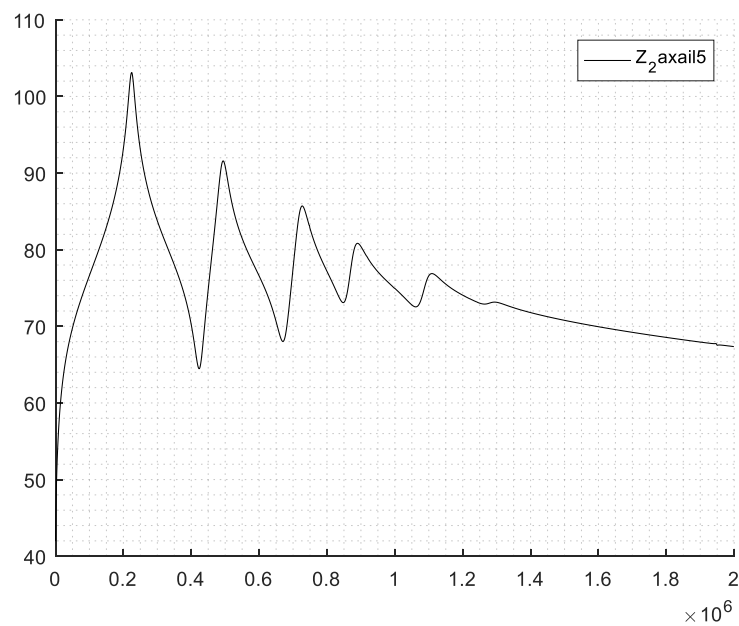
- $\Delta\Psi_{Ocnfs} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\hat{\omega}_{oci}^2} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{oci}^2} = -3.45 \times 10^{-14}$
- $\Delta C_G = \hat{C}_G - C_G = 17.3 \text{ pF}$
- $\Delta L_{eq} = \hat{L}_{eq} - L_{eq} = -0.516 \text{ mH}$



- **Déplacement axial**  
**disques 5 et 6**

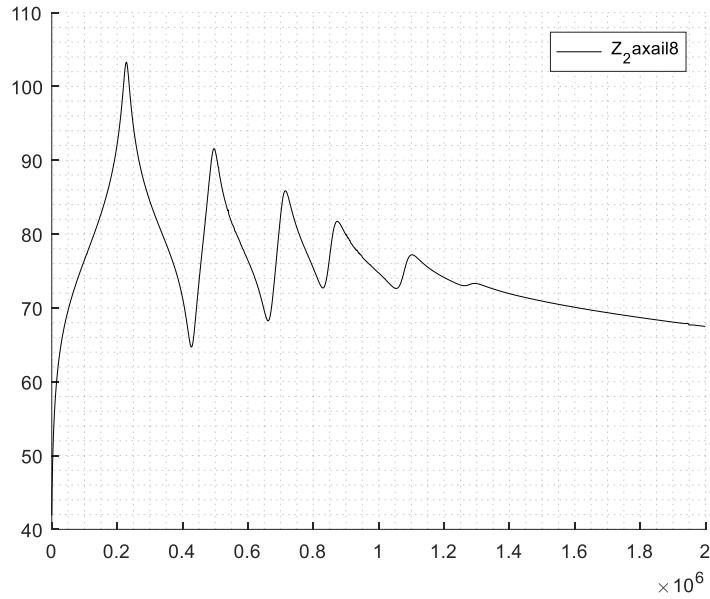
○ **5 mm**

- $\Delta\Psi_{Ocnfs} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\hat{\omega}_{oci}^2} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{oci}^2} = 4.707 \times 10^{-13}$
- $\Delta C_G = \hat{C}_G - C_G = 12 \text{ pF}$
- $\Delta L_{eq} = \hat{L}_{eq} - L_{eq} = -0.193 \text{ mH}$



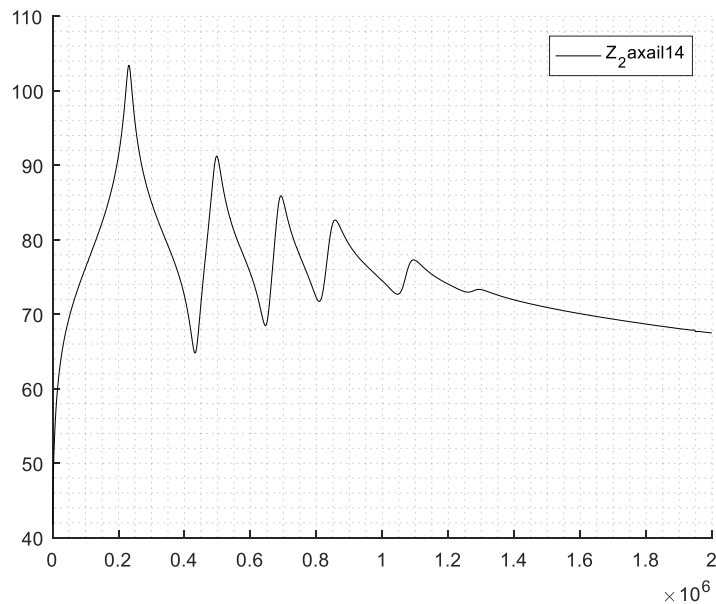
○ **8 mm**

- $\Delta\Psi_{Ocnfs} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\hat{\omega}_{oci}^2} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{oci}^2} = 1.86 \times 10^{-12}$
- $\Delta C_G = \hat{C}_G - C_G = 10.1 \text{ pF}$
- $\Delta L_{eq} = \hat{L}_{eq} - L_{eq} = -0.3162 \text{ mH}$



○ **14 mm**

- $\Delta\Psi_{Ocnfs} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\hat{\omega}_{oci}^2} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{oci}^2} = 3.53 \times 10^{-14}$
- $\Delta C_G = \hat{C}_G - C_G = -17.3 \text{ pF}$
- $\Delta L_{eq} = \hat{L}_{eq} - L_{eq} = 0.516 \text{ mH}$

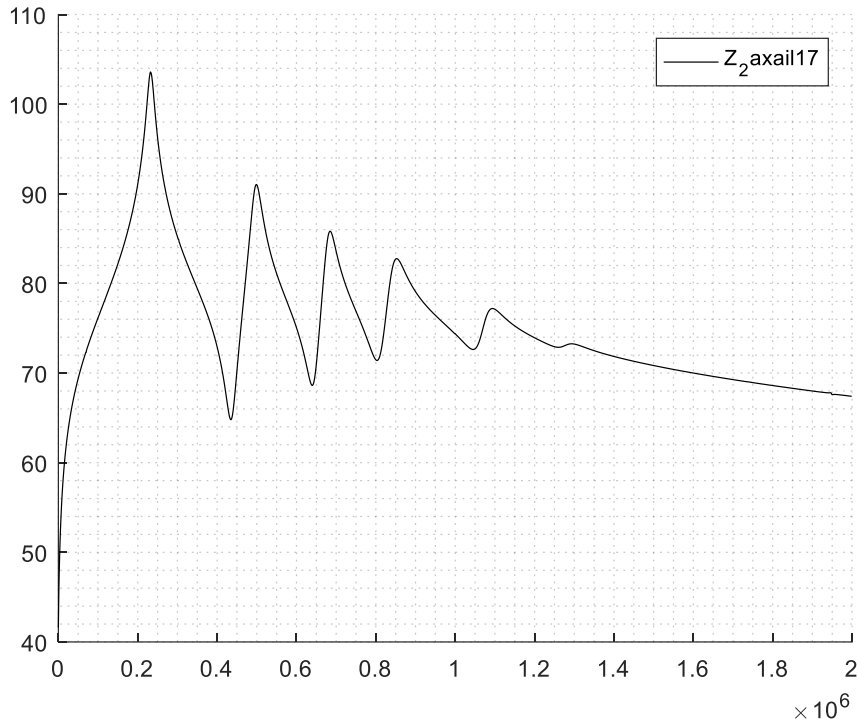


○ **17 mm**

- $\Delta\Psi_{Ocnfs} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\hat{\omega}_{oci}^2} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{oci}^2} = -3.79 \times 10^{-14}$

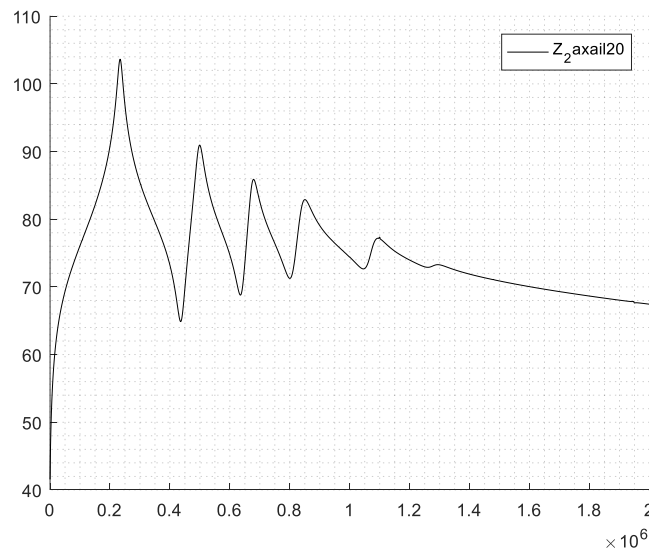


- $\Delta C_G = \hat{C}_G - C_G = 14.1 \text{ pF}$
- $\Delta L_{eq} = \hat{L}_{eq} - L_{eq} = -0.6053 \text{ mH}$



○ **20 mm**

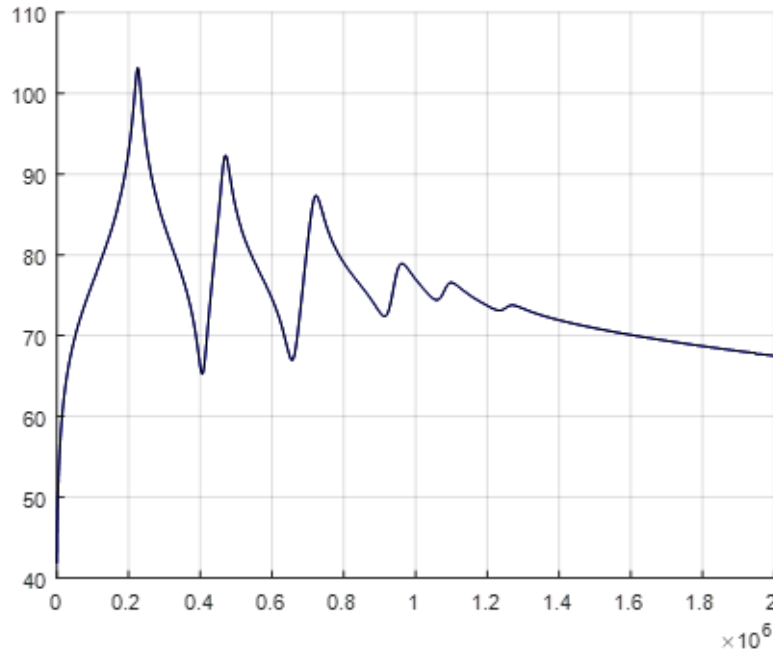
- $\Delta \Psi_{Ocnfs} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\hat{\omega}_{Oci}^2} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{Oci}^2} = -4.53 \times 10^{-14}$
- $\Delta C_G = \hat{C}_G - C_G = 19.4 \text{ pF}$
- $\Delta L_{eq} = \hat{L}_{eq} - L_{eq} = -0.655 \text{ mH}$



- **Déplacement axial entre les disques 4 et 3**

○ **5 mm**

- $\Delta\Psi_{Ocnfs} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\hat{\omega}_{Oci}^2} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_{Oci}^2} = 1.37 \times 10^{-14}$
- $\Delta C_G = \hat{C}_G - C_G = 4 \text{ pF}$
- $\Delta L_{eq} = \hat{L}_{eq} - L_{eq} = -0.2481 \text{ mH}$



#### 4.5.2. Les caractéristiques de $\Delta L_{eq}$ en fonction de $\delta$

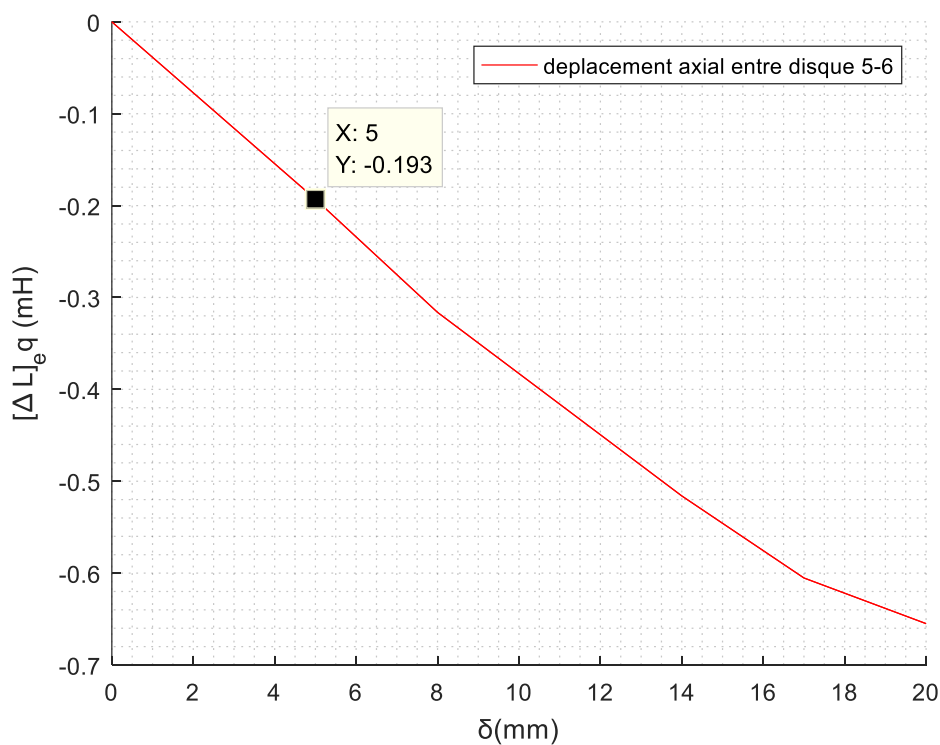
Il est crucial d'analyser les caractéristiques de l'inductance équivalente en relation avec les déplacements axiaux des disques afin de mieux appréhender le fonctionnement de l'enroulement dans diverses configurations. Les déplacements axiaux des disques peuvent influencer l'alignement des spires ainsi que la géométrie de l'enroulement, ce qui a un impact direct sur l'inductance totale, [12].

En étudiant ces caractéristiques, il est possible de comprendre comment les mouvements axiaux des disques impactent l'inductance équivalente. Par exemple, le déplacement des disques vers l'extrémité de la ligne peut entraîner une augmentation de l'inductance en raison de l'allongement du trajet magnétique. À l'inverse, un déplacement des disques vers le centre de l'enroulement peut entraîner une diminution de l'inductance.

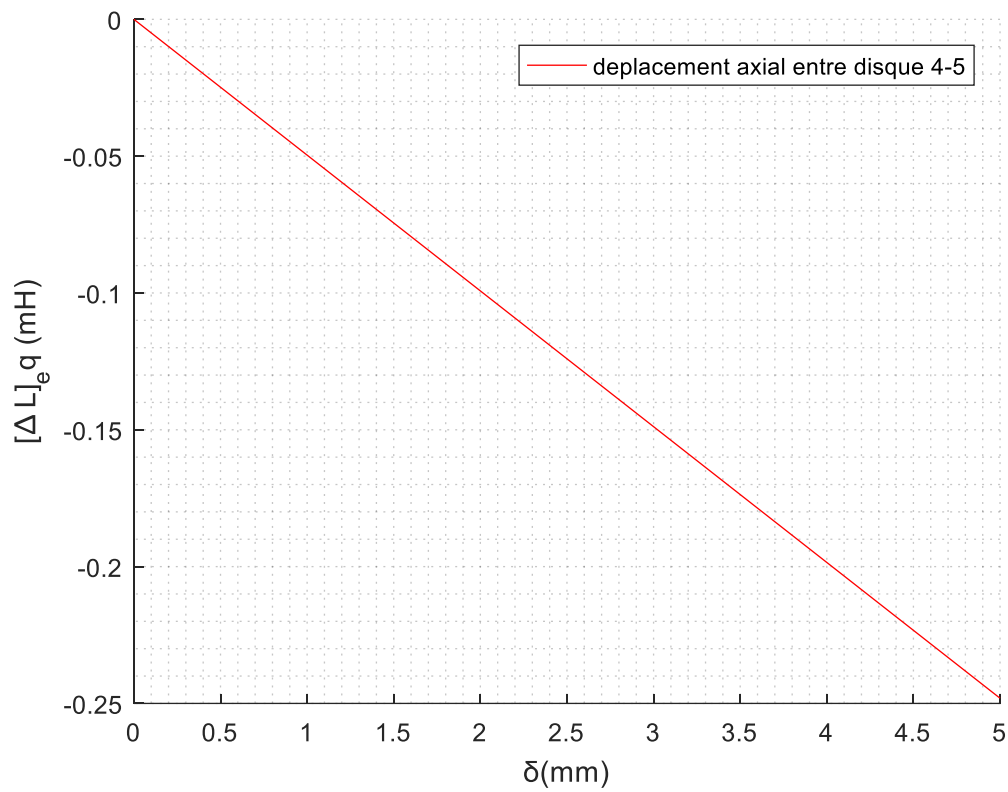
En acquérant une compréhension de ces variations d'inductance, nous sommes en mesure d'évaluer l'impact des mouvements axiaux des disques sur les performances globales de l'enroulement. Cela inclut des aspects tels que les résonances, la réponse en fréquence, les courants induits et la stabilité du système électrique. Cette connaissance est cruciale lorsqu'il s'agit de concevoir, d'optimiser et de maintenir des enroulements dans différentes applications électrotechniques, comme les transformateurs, les moteurs électriques et les générateurs.

Les variations de l'inductance équivalente en fonction des déplacements axiaux des disques sont représentées dans la Figure 4.1. On peut observer que la valeur de l'inductance diminue à mesure que le degré de déformation des disques 4-3 4-5 et 5-6 augmente. Ces caractéristiques peuvent être utilisées pour évaluer la gravité des défauts.

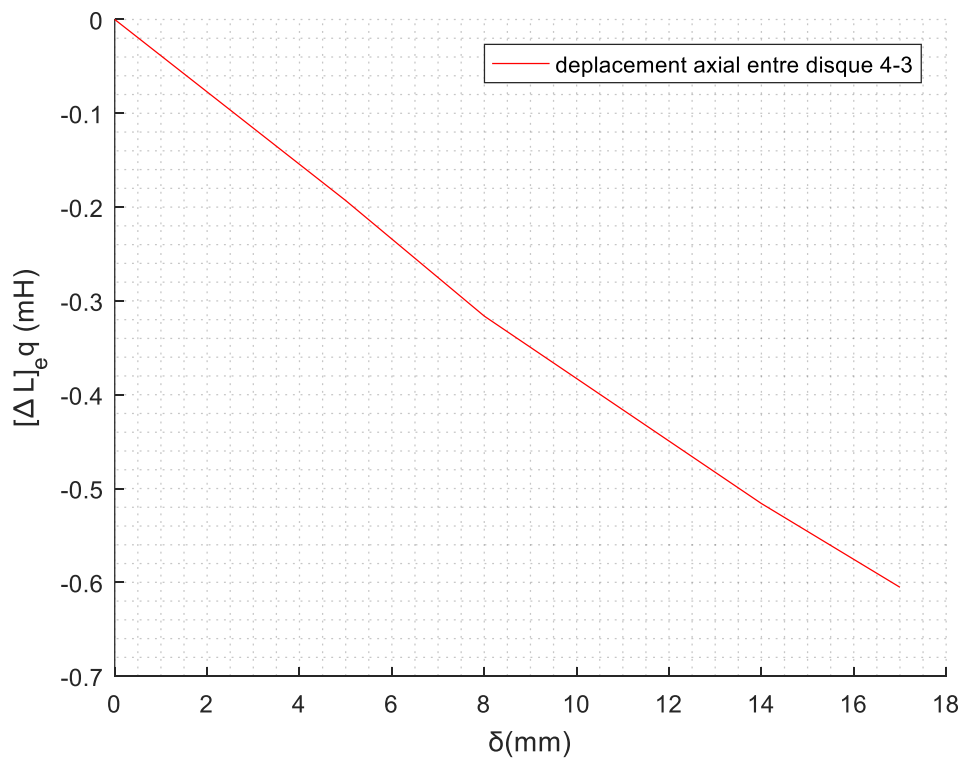
Cependant, un déplacement axial a été réalisé entre les disques 5-6, variant de 0 mm à 16 mm, et l'inductance équivalente de l'enroulement a été mesurée à environ 9,95 mH. En utilisant, par exemple, la courbe de l'inductance en fonction des déplacements axiaux en millimètres, il est possible d'évaluer l'étendue du défaut. La valeur mesurée de l'inductance, d'environ 9,95 mH, on place  $\Delta L_{eq} = -0.22$  est placée sur l'axe des ordonnées pour déterminer le degré de défaut sur l'axe des abscisses de graphe, à partir de laquelle l'étendue du déplacement est entre 4 et 6mm donc on a estimée à environ 6 mm.



**Variation de  $\Delta L_{eq}$  en fonction de  $\delta$  pour un déplacement axial entre D5-D6**



**Variation de  $\Delta L_{eq}$  en fonction de  $\delta$  pour un déplacement axial entre D4-D5**

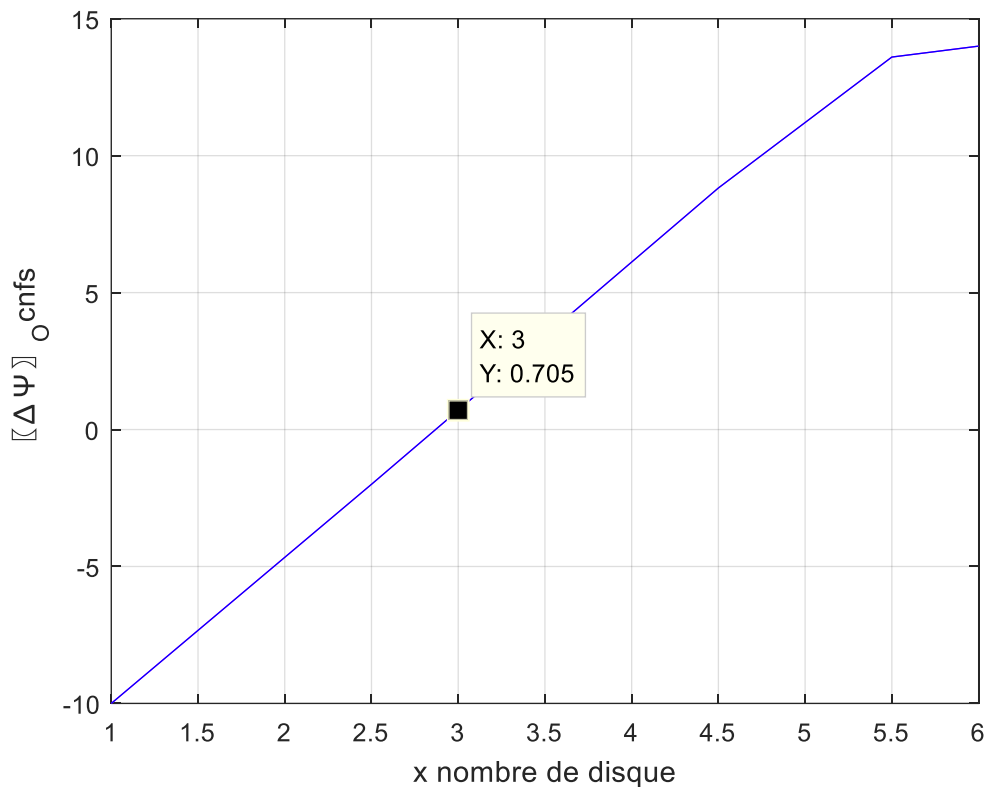


**Variation de  $\Delta L_{eq}$  en fonction de  $\delta$  pour un déplacement axial entre D4-D3**

### 4.5.3. Les caractéristiques de $\Delta\Psi_{Ocnfs}$ en fonction de x (nombre de disque)

Les  $\Delta\Psi_{Ocnfs}$  sont tracés en fonction de x dans la Figure, mettant en évidence leur augmentation continue avec le déplacement axial. Il est important de souligner que, contrairement à AD où la monotonie a été prouvée analytiquement, il n'est pas possible de démontrer cette propriété de manière analytique pour les  $\Delta\Psi_{Ocnfs}$  en raison des nombreux changements de variables introduits lors de l'utilisation d'un AD. Par conséquent, afin de vérifier indirectement la monotonie, des simulations approfondies ont été réalisées en utilisant diverses valeurs d'inductance et de capacité couramment rencontrées. Dans chaque cas, le comportement monotone des  $\Delta\Psi_{Ocnfs}$  a été observé de manière cohérente.

#### - Exemple pour un déplacement de 5mm



#### Localisation de déplacement axial on utilise $\Delta\Psi_{Ocnfs}$ en fonction de x

Après avoir mesuré les  $O_{cnfs}$ , nous avons calculé  $\Delta\Psi_{Ocnfs}$ , qui s'est avéré être égal à 0,705. En analysant le tracé de  $\Delta\Psi_{Ocnfs}$  en fonction de X, nous avons constaté que la valeur de  $\Delta\Psi_{Ocnfs}$  0,705 correspond à  $x=3$ . Cela nous permet de conclure que le déplacement axial s'est produit entre les positions 2D et 3D. Vous pouvez voir la localisation exacte sur la Figure.

## 4.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé une formulation pour traiter un déplacement axial. En d'autres termes, cette formulation est renforcée pour tenir compte des changements simultanés de la capacité et d'inductance. L'applicabilité de la méthode aux enroulements de transformateurs réels a été démontrée par des expériences sur un seul enroulement de transformateur isolé à disque continu. L'estimation de la localisation et de la gravité des déplacements axiaux a fait l'objet d'une étude approfondie. Les résultats ont montré que la précision de la localisation de l'AD<sup>1</sup> et de l'évaluation de la gravité était correcte dans tous les cas. Comme cette méthode repose sur une base analytique, elle garantit l'unicité du résultat. Comme il s'agit d'une solution de nature analytique, il était nécessaire de garder le modèle initial simple ce qui a permis de comprendre la variation monotone de  $\Psi_{0cnf}$  en fonction de la localisation. La méthode peut localiser avec précision et évaluer la gravité d'un déplacement axial. D'autres études sont nécessaires pour traiter la présence d'autres enroulements et les dommages de nature non localisée.

---

<sup>1</sup> AD : déplacement axial.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'objectif de notre travail dans le cadre de notre mémoire de fin d'études concerne l'identification et le diagnostic de défauts dans les enroulements des transformateurs de puissance en utilisant la FRA. L'importance des techniques de diagnostic pour réduire le risque de panne, prévenir la dégradation du service et prolonger la durée de vie du transformateur nous en avons souligné l'importance.

Parmi les modèles considérés, ce lui basé sur la mutuelle inductance est évalué comme le plus usité. Ce modèle s'est avéré particulièrement pertinent car il permet de considérer divers phénomènes le long des enroulements des transformateurs notamment ceux de forte puissance. Cependant, pour obtenir des résultats fiables il est indispensable de préciser les étapes de calcul des paramètres du modèle considéré.

Nous avons testé la méthode proposée sur les enroulements d'un transformateur et tiré les conclusions suivantes :

- Des court-circuits consécutives se manifestent par des pics de résonance dans la gamme de fréquences 40-500 kHz. Le déplacement de ces pics dépend de la position du défaut le long du fil.
- Des imperfections associées aux ouvertures dans les enroulements produisent un bruit important dans la gamme de fréquences 0-460 kHz.
- Une défaillance due à la distorsion inhérente de la bobine est représentée par un pic de résonance dans la plage de 240 kHz à 480 MHz.

Enfin, nous nous sommes consacrés au diagnostic des problèmes d'enroulement des transformateurs de puissance à l'aide de techniques d'analyse de réponse en fréquence. Comme dans le cas des travaux de ceux et celles qui nous ont précédé, nous avons montré que cette méthode était efficace dans l'identification et l'évaluation des défauts. Elle aide à assurer la fiabilité et une durée de vie plus importante pour les transformateurs de puissance. Cependant, des recherches supplémentaires et une amélioration continue sont nécessaires pour affiner les techniques de diagnostic et les rendre plus précises et plus fiables.

Concernant les perspectives dans ce travail, nous recommandons les points suivants :



- Calcul précis des paramètres du modèle équivalent en tenant compte des variations des différents paramètres avec la fréquence.
- Mener des études expérimentales sur plusieurs et différentes bobines défectueuses pour valider les modèles développés afin d'étayer notre conclusion.
- Comparaison économique des différentes méthodes de diagnostic de défauts au niveau de transformateur de puissance (aspect technique et économique).
- La proposition de l'application de la télésurveillance par la méthode de FRA pour diagnostiquer les défauts de l'enroulement en particulier les déformations géométriques à distance.

# **Références Bibliographiques**

## Références

- [1] S. A. Bakhytzhanova., «Simulation models of power engineering objects in theory and practice,» *Master Dissertation*, almaty, 2014.
- [2] A. Amara, «Contribution à la conception d'une plateforme embarquée sans fils pour la détection de défauts dans les transformateurs,» *thèse du doctorat, Université de Médéa, Médéa, Algérie, 2022.*
- [3] J. Sanchez, «Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance,» *These de doctorat ,Université de Grenoble, France., 2011.*
- [4] LEFEVRE.Anthony, «Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs,» *These de doctorat, Ecole Polytechnique de Nantes, 2006.*
- [5] Souhila ABDOUN, «Etude de l'Influence du Noyau sur les Surtensions Impulsionnelles dans les Enroulements du Transformateur,» *memoire de magister, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU , 2009.*
- [6] D. Nilly, «Le diagnostic d'état des transformateurs de puissance, Electromagnétisme,» *HAL Open Science ,2017.*
- [7] Abderrazak Amara, Abderrazak Gacemi, Hamza Houassine, Moustafa Sahnoune Chaouche , «A novel methodology for high-frequency lumped equivalent circuit of an isolated transformer winding construction based on frequency response analysis signal morphology interpretation,» *IET Electr. Power Appl, 2021.*
- [8] Mezari naouel, «diagnostic des transformateurs de puissances» *memoire de magister (université mouloud mammeri de tizi-ouzou , 2011.*
- [9] Berrached Amina, Bouzouina Siham, «Modélisation numérique du comportement haute fréquence d'un transformateur de puissance,» *mémoire de Master, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2015.*
- [11] S. Tenbohlen, «Assessment Of Power Transformer Reliability Xvii,» *International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, 2011.*
- [12] S. S. L. Pramanik, «Diagnosing Axial Displacement in an Actual, Singal, Isolated Transformer Winging,» *IEEE Trans. Power Deliv. Vol 24, No. 2, 2017.*
- [13] J.-F. Scheid, «Introduction aux méthodes heuristiques,» *cour - Graphes et RO – TELECOM Nancy , 2018.*
- [14] Sidi Mohamed Douiri, Souad Elbernoussi, Halima Lakhbab, «Méthodes de Résolution Exactes Heuristiques et Métaheuristiques,» *Cours de master Codes, Cryptographie Et Sécurité De L'information Université Mohammed V, Faculté des Sciences de Rabat, 2017.*

- [15] JOHN WILEY, «Matlab, an introduction with application,» 2007.
- [16] K. Ragavan and L. Satish, «Localisation of changes in a model winding based on terminal,» *IEEE Trans. Power Deliv*, VOL. 22, NO. 3, JULY 2007
- [17] Shah, K., Ragavan, K, «Estimation of transformer winding capacitances through frequency response analysis – an experimental investigation,» *Int. J. Emerg. Elec. Power Syst*, 2013.
- [18] Krupa Rajendra Shah, K. Ragavan, «Assessing mechanical deformations in two winding transformer unit using reduced-order circuit model,» *IEEE, Electr. Power Energy Syst*, Volume 79, 2016.
- [19] K. Krupa Rajendra Shah, «Assessing mechanical deformations in two winding transformer unit using reduced circuit model,» *IEEE, , Electrical Power and Energy Systems*, p. 10, 2016.
- [20] Matlab version 2016b.
- [21] T.Noda, H. Nakamoto, S.Yokoyama, «Accurate Modeling of Core-Type Distribution Transformers for Electromagnetic Transient Studies,» *IEEE Transaction on Power Delivery*, . vol 17, No.4, 2002.
- [22] Moustafa Sahnoune Chaouche, «Application des méthodes intelligentes pour le contrôle non destructif des l'enroulement du transformateur de puissance,» *thèse de doctorat, université de Dr Yahia Fares, MEDEA, algerie*, 2019.
- [23] S Ryder, S Tenbohlen, «A comparison of the swept frequency and impulse response methods for making frequency response analysis measurements,» , *Double Conference Möchengladbach, GERMANY*, 2003