

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJE-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département : Génie Electrique

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté par :

**Rezine Ziri**

**Bouguelimina Said**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

Filière : ELECTROMECHANIQUE

Option : ELECTROMECHANIQUE

**Thème :**

Etude des défaillances mécaniques dans un enroulement de transformateur de puissance.

**Devant le jury composé de :**

Mr. ISSAOUNI	MCA	UAMOB	Président
Mr. HOUASSINE	MCB	UAMOB	Promoteur
Mr. BENSALD	Professeur	UAMOB	Co-promoteur
Mr. YAHIOU	MAB	UAMOB	Examineur
Mr. MOUASSA	MAA	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2018/2019

*Nous remercions Allah notre Dieu qui nous a donné la force et la patience pour accomplir  
ce travail.*

*Nous tenons à exprimer nos remerciements à notre promoteur monsieur **HOUASSINE Hamza**  
et à monsieur **BENSAID Samir**.*

*Qui a mis toute sa compétence à notre disposition et pour son suivi régulier à l'élaboration de  
ce modeste travail, ses orientations, ses conseils qui nous ont servis de référence.*

*Nous tenons à remercier les membres de jury d'avoir répondu présent à l'évaluation de  
ce notre travail de fin d'étude.*

*Nous désirons exprimer notre profonde et vive reconnaissance à Monsieur ISSAOUNI d'avoir  
accepté de présider le jury de Soutenance.*

*Nous adressons un grand merci à monsieur YAHIOU et à monsieur MOUSSA l'honneur qu'il  
nous a fait en acceptant à examiner ce mémoire.*

*Nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à concrétiser ce travail.*

*Bien entendu, nous restons seuls responsables des erreurs et imperfections qui*

*Pourraient subsister dans ce mémoire.*

# *Dédicace*

*Ce travail qui marque la fin de mes études pour l'obtention de mon diplôme de master 02, c'est le moment pour moi de partager cette joie avec les êtres qui me sont les plus chers dont beaucoup sont des guides pour la réussite de mes études.*

*A ma très chère mère qui m'a soutenue durant toute ma vie grâce à son amour, son affection et sa patience.*

*A mon très cher père qui grâce à ses sacrifices je suis devenu ce qui j'ai toujours souhaité.*

*A mes frères que Dieu veille sur eux Adel et wassim la source de ma joie*

*A mes sœurs qui ne cessent de s'inquiéter pour me voire heureux.*

*A toute ma famille REZINE.*

***Rezine ziri***

# ***Dédicace***

*Chaleureusement, je dédie ce modeste travail :*

*A mes chers parents, en témoignage de leur amour et de leur sacrifice sans limites,  
nous leurs souhaite une bonne santé, que Dieu me les garde.*

*A mon frère Brahim.*

*A mes amis Slimane et Redouane.*

*A tous mes collègues de la promotion 2019.*

*A tous ma famille.*

***Said Bouguelimina***

# *Sommaire*

Introduction général.....	1
---------------------------	---

## **Chapitre I : Généralité sur le transformateur**

I. Introduction.....	2
I.1. Définition de transformateur.....	2
I.1.1.Symbole de transformateur.....	2
I.2.Principe de fonctionnement.....	3
I.2.1 Schéma électrique équivalent.....	3
I.3.Différents types de transformateurs.....	3
I.3.1. Transformateurs immergé dans l’huile.....	3
I.3.2 Transformateurs secs.....	4
I.4. Constitutions générale.....	5
I.4.1. Partie active.....	5
I.4.1.1. Circuit magnétique.....	5
I.4.1.2. Les enroulements.....	7
I.4.1.2.1.Les deux techniques d’enroulement.....	8
I.4.1.3. Isolants.....	9
I.4.2. Partie constructive.....	9
I.4.2.1.La Cuve.....	9

I.4.2.2. Le couvercle de cuve et ses sorties .....	10
I.5. Source de défaut.....	10
I.6.Quelques types des défauts affectant le transformateur.....	10
I.6.1. Défaut dans les enroulements .....	11
I.6.1.1.Court-circuit entre spires.....	11
I.6.1.2. Déformation géométrique des enroulements (électrodynamique).....	11
I.6.2.Défaut dans la cuve .....	12
I.7 Conclusion .....	12

## **Chapitre II: Méthode de diagnostic de transformateur**

II. Introduction .....	13
II.1. L'importance des techniques de diagnostic .....	13
II.2. Méthode de diagnostic de défaut dans les transformateurs .....	13
II.2.1. Analyse de l'huile dans les transformateurs.....	13
II.2.1.1. Les analyses physico-chimiques .....	13
II.2.2. Analyse des gaz dissous .....	15
II.2.3.Mesures diélectriques .....	17
II.2.3.1. Mesure du facteur de puissance et de la capacité .....	17
II.2.3.2. Mesure de résistance d'isolement en courant continue .....	18
II.2.4. Mesures électriques .....	18
II.2.4.1. Mesure du courant d'excitation .....	18
II.2.4.2. Mesure de rapport de transformation.....	18
II.2.4.3. Mesure de la résistance d'enroulement .....	18
II.2.5. Observations de l'état extérieur général du transformateur.....	19
II.2.6. Méthode de thermographie .....	19
II.2.7. Analyses de réponse en fréquence .....	20
II.2.7.1. les avantages de la méthode FRA .....	20
II.2.7.2. Utilités des analyses de la réponse en fréquence .....	21
II.2.7.3. Aspect d'utilisation du FRA .....	21
II.2.7.4. Objectifs des mesures par FRA .....	21

II.2.7.5. Principe de la méthode .....	22
II.2.7.6. Raccordement du FRA à un transformateur de puissance.....	23
II.2.7.7. L'exploitation des mesures .....	25
II.3. Conclusion .....	25

### **Chapitre III: Test FRA sur un enroulement**

III. Introduction .....	26
III.1. Présentation de l'enroulement d'essai.....	26
III .2. Présentation du banc d'essai .....	27
III.3. Méthodologie de mesure .....	29
III.4.Résultat expérimentaux .....	29
III.5. Localisation de défaut dans l'enroulement.....	39
III.5.1 Discussion des résultats .....	43
III.6. Conclusion.....	44
Conclusion général .....	45

Référence

# *Liste des figures*

<b>Figure I.1:</b> Une vue intérieure d'un transformateur, type colonne.....	2
<b>Figure I.2.:</b> Symbole de transformateur. ....	2
<b>Figure I.3:</b> Transformateur généralisé. ....	3
<b>Figure I.4:</b> Schéma électrique d'un transformateur monophasé. ....	3
<b>Figure I.5:</b> Transformateur immergé dans l'huile. ....	4
<b>Figure I.6 :</b> Transformateur sec. ....	4
<b>Figure I.7:</b> Schémas des tôles d'un transformateur. ....	5
<b>Figure I.8:</b> circuit magnétique représente les colonnes et les culasses.....	6
<b>Figure I.9:</b> disposition cuirassé. ....	6
<b>Figure I.10:</b> disposition colonne. ....	7
<b>Figure I.11:</b> Enroulement de transformateur à colonne. ....	8
<b>Figure I.12:</b> Enroulement en couche. ....	8
<b>Figure I.13:</b> Enroulement en galettes.....	9
<b>Figure I.14:</b> Exemple d'un système d'isolation.....	9
<b>Figure I.15:</b> Source des défauts dans le transformateur [16].....	10
<b>Figure I.16:</b> Court-circuit entre spires.....	11
<b>Figure I.17:</b> Déformation mécanique d'un Enroulement.....	12
<b>Figure I.18:</b> Déformation de Fuite d'huile.....	12
<b>Figure II.2:</b> Exemple de boue acide dans un transformateur.....	14

<b>Figure II.2:</b> création du bulle de gaz lorsque de papier contient trop d'eau.....	14
<b>Figure II.3:</b> Cycle permet la détection des gaz dissous.....	16
<b>Figure II.4:</b> état extérieur d'une partie du transformateur.....	19
<b>Figure II.5:</b> Exemple de thermographie infrarouge sur une connexion mal boulonnée du transformateur.....	20
<b>Figure II.6:</b> Modèle d'un enroulement de transformateur avec réseau RLC.....	23
<b>Figure II.7:</b> Principe de la méthode FRA [24].....	23
<b>Figure II.8:</b> Le raccordement du FRA au transformateur de puissance .....	24
<b>Figure III.3:</b> Opération de fabrication des disques de l'enroulement. ....	26
<b>Figure III.4:</b> Assemblage des disques constituant le bobinage test. ....	27
<b>Figure III.5:</b> Appareil de mesure d'impédance RLC mètre.....	27
<b>Figure III.6:</b> l'enroulement test. ....	28
<b>Figure III.7:</b> Ordinateur. ....	28
<b>Figure III.8:</b> Banc expérimental, de mesure de la réponse fréquentielle de l'enroulement...	29
<b>Figure III.9:</b> Réponse fréquentiel en impédance d'un enroulement sain. ....	30
<b>Figure III.10:</b> Réponse fréquentiel en phase d'un enroulement sain. .....	31
<b>Figure III.11:</b> Décalage du 1er et du 2ème disque sur l'axe radial. .....	32
<b>Figure III.12:</b> Un déplacement de 2.5cm du premier disque. ....	33
<b>Figure III.13:</b> Comparaison entre la réponse fréquentielle en impédance d'un enroulement sain et la réponse fréquentielle en impédance d'un enroulement défaillant dans le disque 1...	33

<b>Figure III.14:</b> Comparaison entre la réponse fréquentielle en phase d'un enroulement sain et la réponse fréquentielle en phase d'un enroulement défaillant dans le disque 1. ....	34
<b>Figure III 15:</b> Comparaison entre la réponse fréquentielle en impédance d'un enroulement sain et la réponse fréquentielle en impédance d'un enroulement défaillant dans le disque 2...	35
<b>Figure III.16:</b> Comparaison entre la réponse fréquentielle en phase d'un enroulement sain et la réponse fréquentielle en phase d'un enroulement défaillant dans le disque 2.....	36
<b>Figure III.17:</b> Décalage de la 1ère résonance en fonction du déplacement du disque.....	42
<b>Figure III.18:</b> Décalage de la 2ème résonance en fonction du déplacement du disque .....	42
<b>Figure III.19:</b> Décalage de la 3ème résonance en fonction du déplacement du disque .....	43

# *Liste des Tableaux*

<b>Tableau II.1:</b> Gaz dissous et leurs origines.....	17
<b>Tableau II.2:</b> Domaines typiques d'interprétation de FRA .....	25
<b>Tableau III.1:</b> Comparaison entre les fréquences de résonances d'un enroulement sain et les défauts des déformations radiales .....	37
<b>Tableau III 2:</b> Pourcentage de décalage fréquentiel de première résonance .....	39
<b>Tableau III.3:</b> Pourcentage de décalage fréquentiel de deuxième résonance .....	40
<b>Tableau III.4:</b> Pourcentage de décalage fréquentiel de troisième résonance .....	41

# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

Le transformateur joue un rôle essentiel dans toutes les entreprises, il permet d'élever l'amplitude de la tension alternative ou bien abaisser la tension selon les besoins de l'entreprise.

Le transformateur subit généralement différents types de défauts qui provoquent des contraintes thermique et mécanique à l'intérieur du transformateur.

Une avarie de court-circuit (défaut) provoque des contraintes mécaniques qui engendrent des forces radiales et axiales sur les enroulements du transformateur, ces contraintes peuvent induire des déformations des enroulements.

Les transformateurs sont exposés à plusieurs contraintes internes et externes qui peuvent altérer son bon fonctionnement, pour cela, le diagnostic s'avère une tâche importante pour se prévenir des défaillances afin d'éviter les désagréments liés au dysfonctionnement de la machine et pour ça prévoir des maintenances pour augmenter la durée de vie de cette dernière.

Plusieurs méthodes de diagnostic existent dans la littérature, la plus pertinente et récente est l'analyse de la réponse fréquentielle des enroulements (ARF).

Afin de bien mener notre étude, on a subdivisé notre travail en trois chapitres.

- Le premier chapitre porte sur les généralités sur les transformateurs de puissance, en mettant en relief leur principe de fonctionnement, leur constitution et les différents défauts qui peuvent y avoir lieu.
- Une revue générale sur les méthodes de diagnostic des transformateurs ont fait l'objet du second chapitre, un accent est mis sur la méthode FRA puisqu'elle est l'objet de notre travail.
- Le troisième chapitre est consacré à une étude de cas réel sur un bobinage réalisé au laboratoire afin de mettre en évidence les différents changements du comportement fréquentiel de ce dernier suite à un défaut de décalage radial, défaut très rencontré dans la réalité.

On finira notre étude sur les transformateurs par une conclusion générale et quelques perspectives.

# **Chapitre I :**

# **Généralité sur le**

# **transformateur**

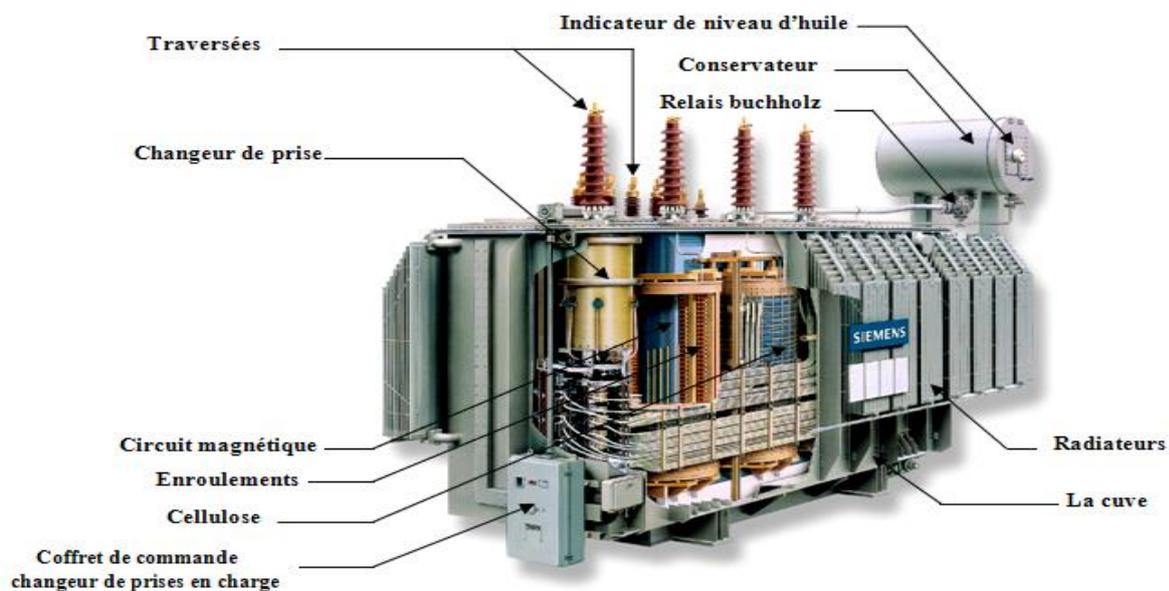
## I. Introduction

La centrale électrique est un pion essentiel dans la production de l'énergie électrique, et pour que cette énergie arrive au consommateur, un transformateur est essentiel pour son acheminement, car la centrale électrique est généralement implantée en d'hors des centres urbains.

Notre étude rentre dans le cadre de la maintenance des transformateurs, pour cela ce premier chapitre est consacré aux généralités sur les transformateurs.

### I.1. Définition de transformateur

Le transformateur est une machine électrique statique destinée à transformer une tension (courant) alternative en une autre tension (courant) alternative de même fréquence et d'amplitudes généralement différentes afin de l'adapter aux différents besoins d'utilisation [1]. La figure I.1 représente une vue intérieure d'un transformateur.



**Figure I.2:** Une vue intérieure d'un transformateur, type colonne.

#### I.1.1. Symbole de transformateur

On trouve deux symboles de transformateur (A) et (B) illustré par la figure I.2. Les deux barres verticales dans le symbole (A) symbolisent le noyau magnétique.



**Figure I.2.:** Symbole de transformateur.

## I.2.Principe de fonctionnement

Son fonctionnement est basé sur l'interaction électromagnétique de deux ou de plusieurs circuits immobiles l'un par rapport à l'autre.

Si deux bobines sont placées sur un même circuit magnétique, et si l'une des bobines, dite primaire, est reliée à une source de courant alternatif, elle crée dans le noyau un flux alternatif dont les variations provoquent dans la deuxième bobine, dite secondaire, une force électromotrice d'induction alternative de même fréquence que celle du courant d'alimentation mais d'une amplitude différente [3]. La figure I.3 représente le schéma généralisé du transformateur.

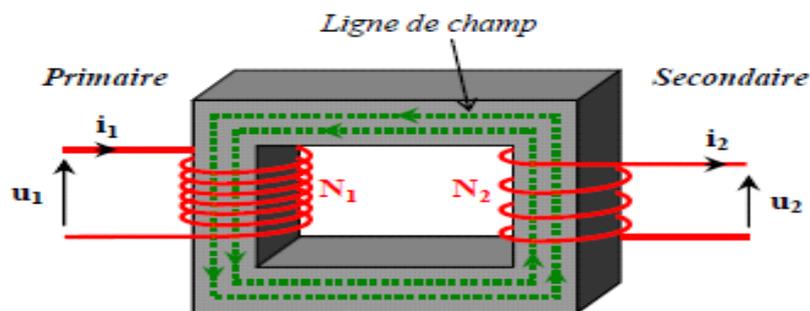


Figure I.3: Transformateur généralisé.

### I.2.1 Schéma électrique équivalent

La figure I.4 montre le schéma électrique équivalent d'un transformateur monophasé réel.

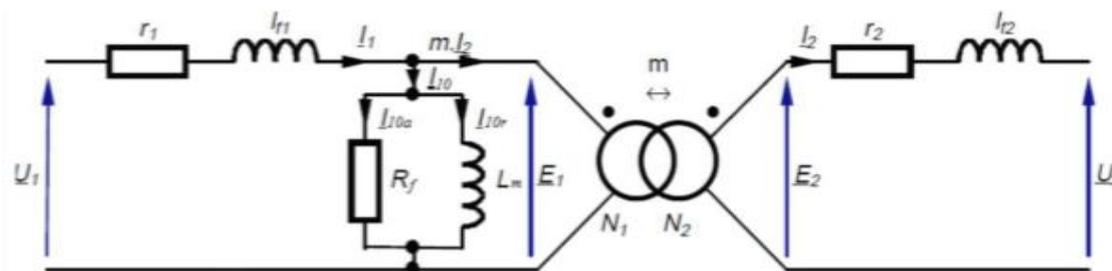


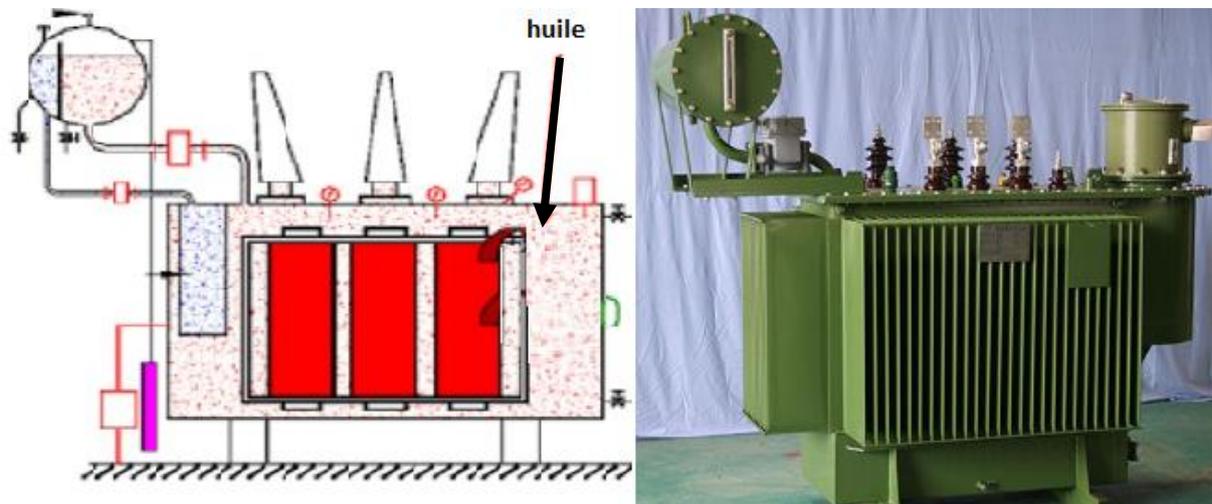
Figure I.4: Schéma électrique d'un transformateur monophasé.

## I.3.Différents types de transformateurs

### I.3.1. Transformateurs immergés dans l'huile

Le transformateur est disposé dans un bain d'huile qui assure l'isolement et le refroidissement. Ce transformateur est moins onéreux et a des pertes moindres que le transformateur sec [4]. Ce transformateur est constitué d'un circuit magnétique en tôle à cristaux orientés, d'enroulements en cuivre ou en aluminium, d'une cuve métallique, d'un

couverture et des bornes de raccordement MT et BT. La figure I.5 représente un modèle d'un transformateur immergé dans l'huile.



**Figure I.5:** Transformateur immergé dans l'huile.

### I.3.2 Transformateurs secs

Les enroulements BT et les enroulements HT sont concentriques et enrobés dans une résine époxy. Le circuit magnétique est isolé dans une matière isolante sèche, le refroidissement est assuré par l'air ambiant, ils sont utilisés dans des locaux où les conditions de poussière, d'humidité et de température sont maîtrisées, ils sont notamment utilisés pour les grands bâtiments car ils présentent peu de risque en cas d'incendie [5]. La figure I.6 représente un modèle d'un transformateur sec.



**Figure I.6 :** Transformateur sec.

#### I.4. Constitutions générale

Le transformateur comporte deux parties essentielles, la partie active et la partie constructive.

##### I.4.1. Partie active

Cette partie est constituée de :

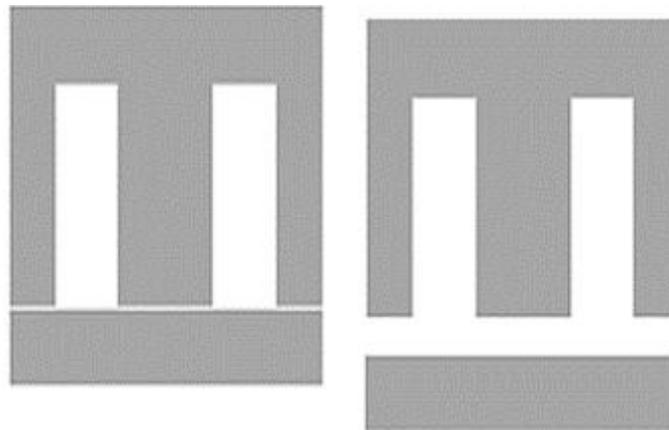
###### I.4.1.1. Circuit magnétique

Le circuit magnétique est constitué des plusieurs noyaux fermés par des culasses.

Le noyau est composé d'un empilage de tôles ferromagnétiques à cristaux orientés, isolées électriquement entre elles afin de réduire les pertes par courants de Foucault. Les tôles de circuit magnétique de type (Fe-Si), à grain orienté laminé à froid, ont une épaisseur qui varie de 0.15mm à 0.3mm [6]. Des joints enchevêtrés et orthogonaux effectuent la liaison entre les colonnes et les culasses sur les transformateurs de petite puissance [7].

Le noyau magnétique dans le transformateur assure deux fonctions principales :

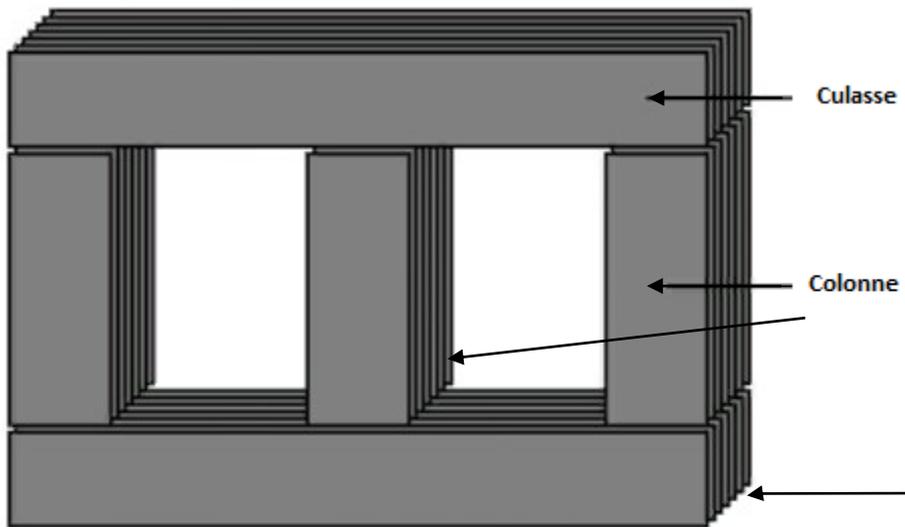
- Réduire les fuites magnétiques et améliorer les performances du transformateur [8].



**Figure I.7:** Schémas des tôles d'un transformateur.

**Les colonnes :** Si pour les faibles puissances les sections sont carrées, on réalise des sections circulaires pour les grandes puissances. En effet, les bobines sont à section circulaire pour des raisons de résistance aux efforts électrodynamiques entre spires en cas de court-circuit ainsi que pour une réalisation plus facile [7].

**Les culasses :** ne portent pas de bobines, elles peuvent être rectangulaires.



**Figure I.8:** Circuit magnétique représente les colonnes et les culasses.

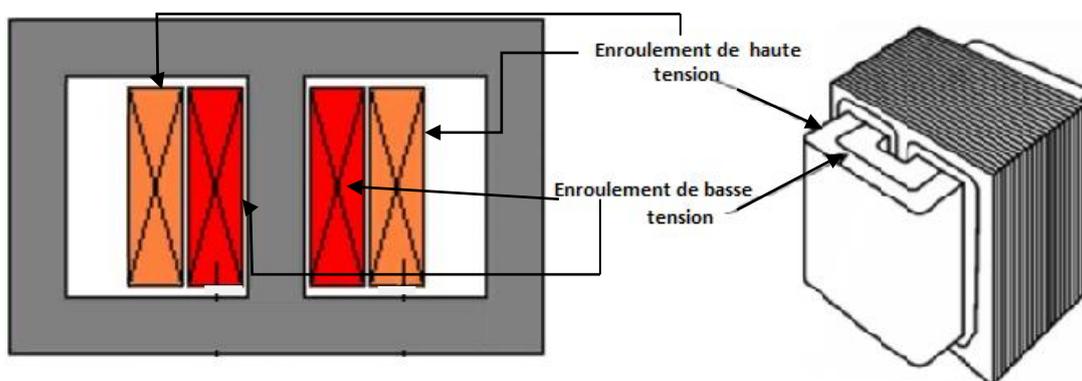
❖ Selon le type du noyau constituant le transformateur, on distingue :

- **Transformateur cuirassé**

Dans la technologie cuirassée le circuit magnétique entoure complètement l'enroulement des deux côtés.

Dans ces transformateurs cuirassés les chemins de retour du flux magnétique à travers le circuit magnétique sont externes et entourent les bobinages.

Ces transformateurs sont utilisés au sein des réseaux de transport et de répartitions où les surtensions transitoires sont fréquentes. Dans cet environnement, ils doivent se prémunir des effets néfastes de ces surtensions sur les enroulements. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages [9]. La figure I.9 illustre une disposition cuirassée d'un transformateur.

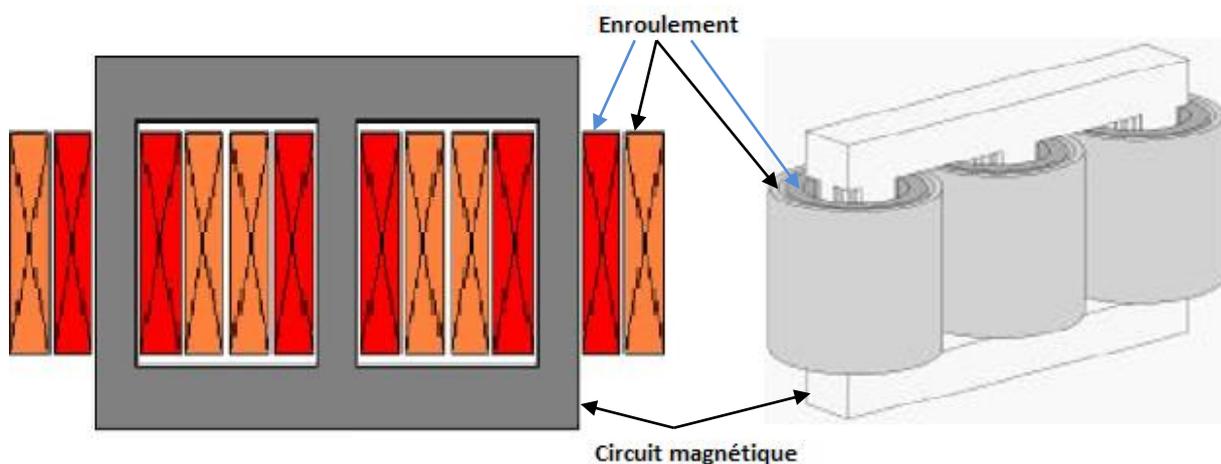


**Figure I.9:** Disposition cuirassée.

- **Transformateur à colonnes**

Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs [7].

Le transformateur à colonnes est constitué de deux ou plusieurs enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur un noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique [10]. La figure I.10 illustre une disposition colonnes d'un transformateur.



**Figure I.10:** Disposition colonne.

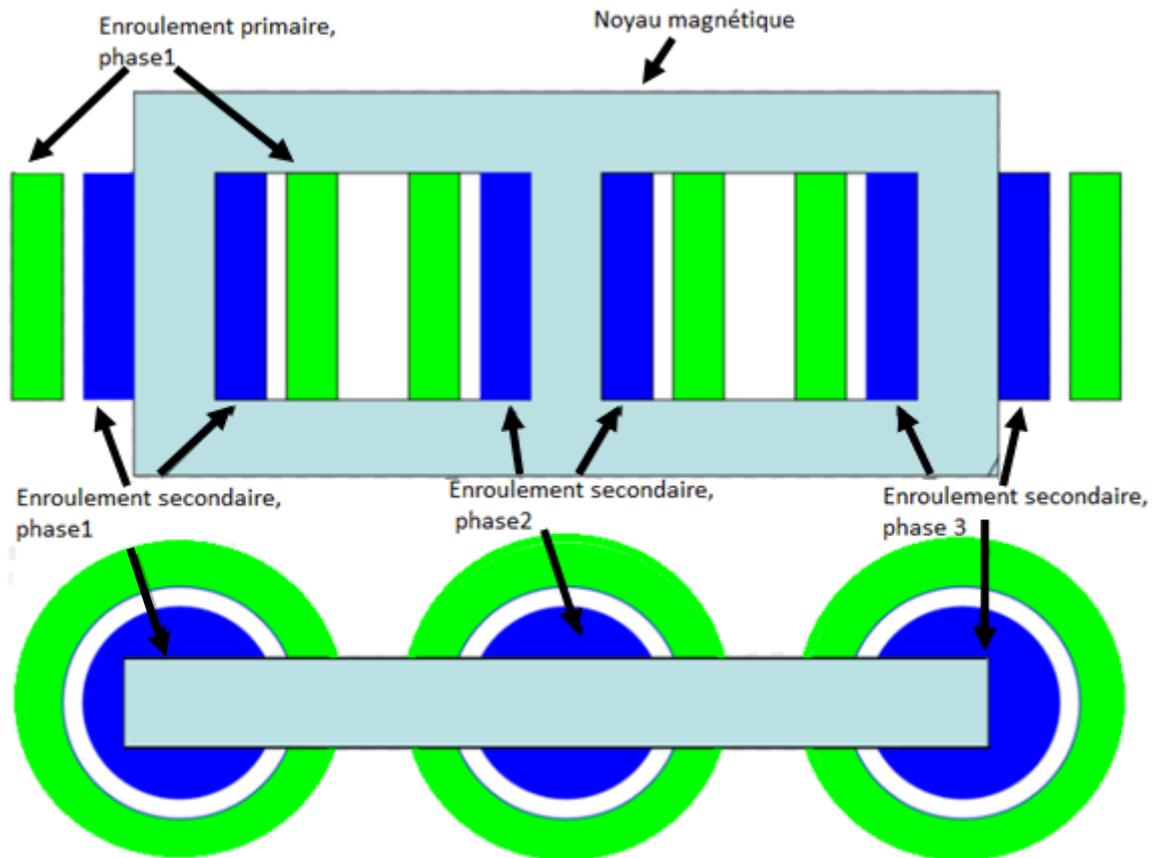
#### I.4.1.2. Les enroulements

Les enroulements du transformateur sont l'ensemble des spires fabriqués généralement en cuivre émaillé de section ronde ou rectangulaire, isolées entre elles par du papier Kraft pour que l'énergie n'est transmise que grâce à leur couplage magnétique [11].

Pour une phase d'un transformateur donné, il y a un enroulement par niveau de tension considéré : une basse tension (BT) et une haute tension (HT), avec parfois une moyenne tension (MT) supplémentaire. Ces différents enroulements sont imbriqués les uns dans les autres avec généralement l'enroulement basse tension à l'intérieur et les enroulements de niveaux de tensions supérieures de façon croissante vers l'extérieur. L'ensemble de ces enroulements constituant une phase est installé sur les noyaux du circuit magnétique [12]. La figure I.11 illustre les enroulements de transformateur à colonne.

##### ➤ Rôle des enroulements

Les enroulements permettent le transfert de la puissance du primaire vers le secondaire tout en modifiant la tension (circulation du courant) [11].



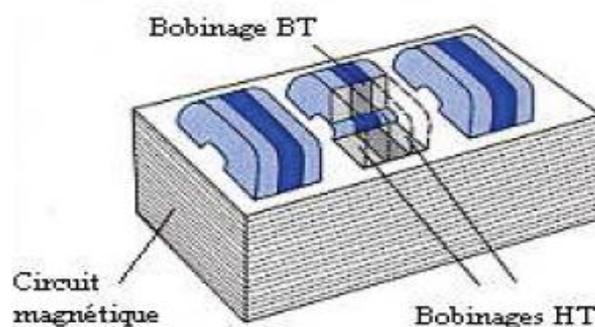
**Figure I.11:** Enroulement de transformateur à colonne.

#### I.4.1.2.1. Les deux techniques d'enroulement

Il existe plusieurs techniques d'enroulement :

- L'enroulement en couches.

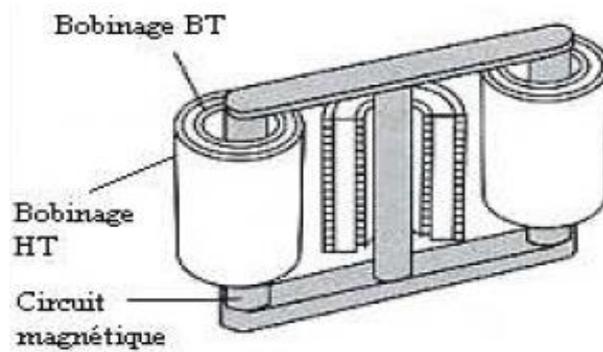
Pour la basse tension le plus souvent en feuilles de cuivres pour des tensions  $U < 750\text{V}$ .



**Figure I.12:** Enroulement en couche.

- L'enroulement en galettes.

Pour les hautes tensions, on opte pour les enroulements en galette qui sont formé de fil rond émaillé ou méplats. Cet enroulement peut être réalisé aussi en couches.

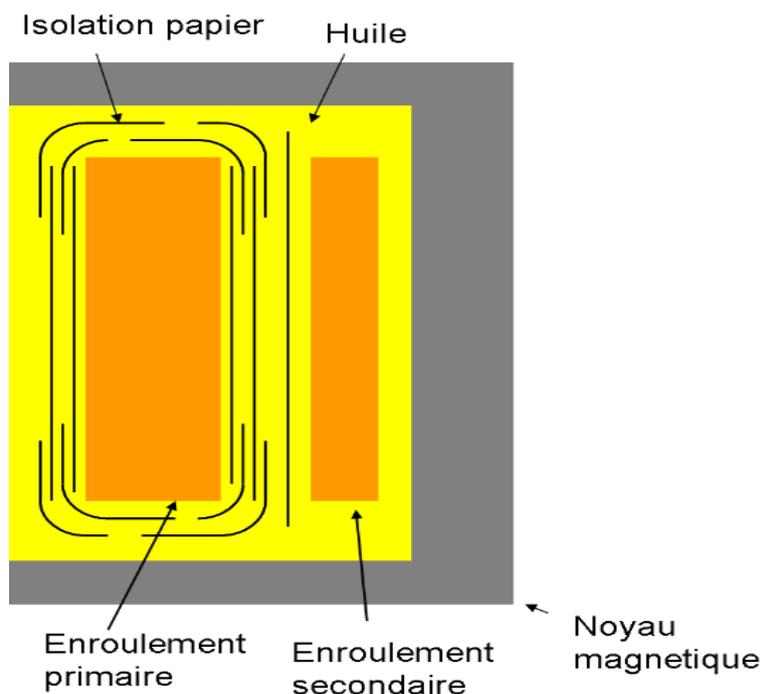


**Figure I.13:** Enroulement en galettes.

### I.4.1.3. Isolants

Les isolants peuvent être liquides (huiles minérale, huile silicone), solides (papier, carton, fibre de verre).

Les isolants doivent assurer l'isolation diélectrique des enroulements entre eux ainsi que le refroidissement du transformateur.



**Figure I.14:** Exemple d'un système d'isolation.

## I.4.2. Partie constructive

### I.4.2.1. La Cuve

La constitution de la cuve du transformateur est liée aux calculs thermiques du transformateur [13].

Le matériel utilisé est l'acier carbone (acier de construction) en tôles et profil laminé, liés par électro-soudure constituant un tout résistant au vide, surpressions et étanche d'huile.

La cuve assure le maintien mécanique du circuit magnétique et des enroulements. Elle épouse naturellement le contour de la partie active et minimise ainsi le volume d'huile de transformateur [10].

➤ Rôle de la cuve :

- Contenir l'huile ;
- La protection de la partie active du transformateur ;
- Canaliser partiellement les flux de fuites.

#### I.4.2.2. Le couvercle de cuve et ses sorties

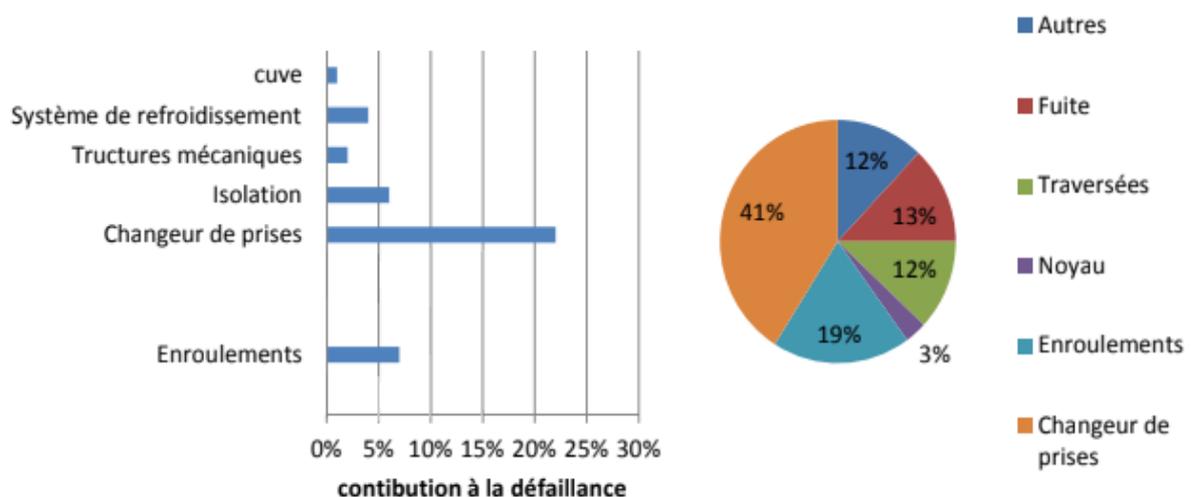
Sur le couvercle sont placées plusieurs pièces dont les plus importantes sont[14] :

- Les isolateurs de sortie des enroulements HT et BT ;
- Le conservateur d'huile ;
- Le tube d'évacuation des gaz pour les transformateurs de puissance d'une valeur  $\geq 1000\text{kVA}$ .

#### I.5. Source de défaut

Les transformateurs sont des ouvrages électriques sensibles, peuvent être sujet de plusieurs défauts, qui peuvent être externes ou internes touchant ainsi une plusieurs parties du transformateur.

La figure ci-dessous montre des statistiques des défauts affectant différentes parties les plus du transformateur, on voit bien que les parties les plus vulnérables sont les enroulements et les changeurs de prise.



**Figure I.15:** Source des défauts dans le transformateur [15].

## I.6. Quelques types des défauts affectant le transformateur

### I.6.1. Défaut dans les enroulements

#### I.6.1.1. Court-circuit entre spires

Le contact électrique anormal entre les spires d'un même enroulement cause un court-circuit et pour éviter, ce type de défaut les spires doivent être isolées entre elles.

Ce type de défaut apparait souvent lors du déchirement du papier isolant suite à une déformation mécanique des enroulements ou à un amorçage diélectrique entre spires entretenu.

Ce défaut peut aller jusqu'à la fusion du cuivre des conducteurs, et l'ouverture du circuit électrique dans certains cas [16].



**Figure I.16:** Court-circuit entre spires[16].

#### I.6.1.2. Déformation géométrique des enroulements (électrodynamique)

Des déplacements mécaniques des enroulements peuvent être constatés lors des courts-circuits internes ou externes qui provoquent des courants extrêmement élevés car le courant au sein des enroulements sont très importants.

Un transformateur avec une telle déformation mécanique peut dans certains cas fonctionner à son régime nominal. Il reste néanmoins fragilisé et il n'est absolument pas certain qu'il puisse ainsi tenir des perturbations de court-circuit ou de surtensions ultérieures sans amorcer [16].



**Figure I.17:** Déformation mécanique d'un Enroulement [16].

### I.6.2. Défaut dans la cuve

La cuve de transformateur possède de nombreux joints en caoutchouc, qui peuvent être la cause de fuite d'huile. Du durcissement ou dégradation par le temps de ces joints.

Des visites visuelles régulières de l'état du transformateur avec une maintenance adaptée permettent de s'affranchir des fuites d'huile [17].



**Figure I.18:** Déformation de Fuite d'huile [17].

### I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur les transformateurs, et leurs principaux éléments qui les constituent avec quelques défauts qui peuvent affecter ce dernier.

Afin d'assurer une longue durée de vie du transformateur une maintenance régulière est nécessaire, le second chapitre portera sur les différentes méthodes de diagnostic de défaillances du transformateur.

# **Chapitre II :**

## **Méthode de diagnostic de transformateur**

### II. Introduction

Les transformateurs sont des machines sensibles affectées par des facteurs entravent leur bon fonctionnement et de présenter un risque pour l'être humain et c'est ce que nous aborderons dans ce chapitre, dans lequel nous avons présenté un certain nombre des problèmes au quels le transformateur est exposé et un ensemble de solutions permettant d'éliminer les défauts.

#### II.1. L'importance des techniques de diagnostic

Le diagnostic est une tâche très importante pour la maintenance de transformateur, il peut évaluer l'état des composants du transformateur de puissance et afin de programmer des activités préventives et correctives sur les dispositifs diagnostiquent.

#### II.2. Méthode de diagnostic de défaut dans les transformateurs

##### II.2.1. Analyse de l'huile dans les transformateurs

L'huile d'isolation des transformateurs se dégradent au cours de leur fonctionnement ce qui entraine un endommagement intense liés aux décharges dans l'huile et d'autres matériaux isolants, pour cette raison une analyse périodique d'huile d'isolation sur des appareilles de puissance HT doit être réalisée [18].

##### II.2.1.1. Les analyses physico-chimiques

Analyses physico-chimiques ont pour but de déterminer les caractéristiques de l'huile pour assurer ses fonctions de base d'isolation et de transfert de chaleur. Les paramètres généralement analysés sont les suivants [15] :

- **Analyse visuelle (coloration)**

Un contrôle de l'huile permet de déterminer la présence des corps en suspension et des résidus. En bon état l'huile est limpide et une propreté intrinsèque de l'huile neuve. Elle évolué d'une couleur jaunâtre presque transparente à une couleur rougeâtre ou rouge foncée quand elle devient usée et vieille [19].

- **Indice d'acidité**

L'oxydation de l'huile caractérise son vieillissement. L'augmentation de l'indice de neutralisation signifie que certaines molécules de l'huile se sont oxydées pour former des acides. Les résultats sont exprimés en mg de potasse (KOH) pour neutraliser un gramme d'huile [20].

Lorsque l'indice d'acidité est trop élevé, des boues acides se créent dans le transformateur. Cette grandeur ne peut pas s'appliquer aux huiles silicones car, ils ne possèdent pas de carbone [20]. La figure II.1 représente un Exemple de boue acide dans un transformateur.



**Figure II.2:**Exemple de boue acide dans un transformateur.

- **Teneur en eau**

La teneur en eau est un des paramètres influençant la durée de vie.

La teneur en eau de l'huile est le reflet de la teneur en humidité de l'isolation. Toutefois, les teneurs respectives en eau, dans l'huile, dans l'isolation cellulosique et de vapeur d'eau dans le conservateur résultent d'un équilibre dynamique très lent et très sensible à la température. C'est pourquoi, il est fortement recommandé de pratiquer le prélèvement d'huile lorsque le transformateur est encore chaud dans un état d'équilibre thermique [20].

Donc l'analyse de la teneur en eau permet de quantifier la concentration de l'eau dans le fluide en ppm due :

- ✓ A la dégradation des composantes internes (papiers, fluide lui-même) ;
- ✓ Aux influences extérieures (migration d'humidité atmosphérique).



**Figure II.2:** création du bulle de gaz lorsque de papier contient trop d'eau.

- **Rigidité diélectrique**

L'analyse de la rigidité diélectrique de l'huile vise à contrôler sa fonction d'isolation. La mesure de la rigidité diélectrique est effectuée à l'aide d'un spintermètre et les résultats sont exprimés (en kV) par la moyenne des 6 derniers essais. On peut suspecter la présence de particules en cas de dispersion importante entre les tensions de claquage lors des essais [20].

La rigidité diélectrique aussi appelée tension de claquage est le taux maximal du champ électrique que l'on peut lui appliquer avant déclenchement d'un arc électrique. Dans l'industrie, elle est maximisée conventionnellement par la tension efficace nécessaire pour provoquer dans les conditions normalisées, le claquage d'un volume de liquide compris entre deux électrodes dont la forme, distance et nature sont spécifiées [18].

- **Densité**

La densité peut être utile pour identifier le type d'huile. Dans les climats froids, la densité (masse volumique) peut être importante pour la détermination du bon fonctionnement de l'huile. Cependant, la densité n'est pas un facteur essentiel pour définir la qualité d'une huile [20].

### **II.2.2. Analyse des gaz dissous**

L'Analyse des gaz dissous dans l'huile minérale est un outil très puissant et reconnue pour identifier des deux types de défauts (défaut thermique ou électrique).

L'huile minérale est un mélange d'alcanes, de naphènes et des hydrocarbures aromatiques raffinés du pétrole brut [22].

L'huile minérale est la nouvelle génération de transformateur de puissance, elle est faite de plusieurs particules d'hydrocarbure. Les défaillances électriques et thermiques peuvent provoquer la rupture des liaisons entre ces particules qui conduisent à la formation de gaz, conformément à l'intensité dégagée du défaut [22].

Les principaux gaz qui sont produits après l'apparition des défauts sont montrés dans la figure (II.3) et tableau (II.1).

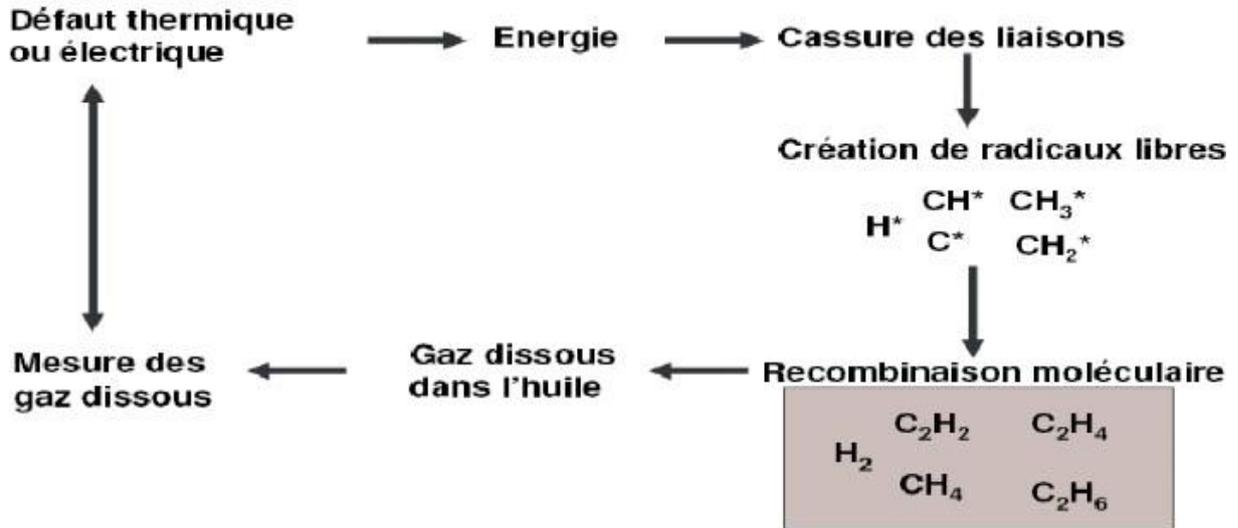


Figure II.3: Cycle permet la détection des gaz dissous [21].

Le tableau II.1 résume les différents types des gaz et leurs origines.

Type	Gaz (Symbol)	Défaut et Origine
<b>Gaz combustibles</b>	Hydrogen ( $H_2$ )	Défauts électriques :décharge partielle (DP)
	Méthane ( $CH_4$ )	Des décharges partielles ou de décomposition thermique de l'huile.
	Acétylène( $C_2H_2$ )	Défaut électriques Décharges de basses et hautes énergies
	éthylène ( $C_2H_4$ )	Défaut thermique $T > 300^\circ C$ : La décomposition thermique de l'huile ou de l'isolement solide.

	éthane ( $C_2H_6$ )	Défaut thermique $T < 300^\circ C$ : Provi ent de la décomposition thermique de l'huile.
	monoxyde de Carbone ( $CO$ )	Dégradation de la cellulose (des matériaux qui composent l'isolation d'un transformateur).
<b>Gaz non combustibles</b>	Dioxyde de Carbone ( $CO_2$ )	
	Azote ( $N_2$ )	Oxydation Pour vérifier la prise d'échantillon.

**Tableau II.1:** Gaz dissous et leurs origines [23].

**II.2.3. Mesures diélectriques**

Parmi les défauts du transformateur précisément les isolants électriques des équipements, on a le vieillissement qui a lui-même donne lieu à une perte progressive des caractéristiques diélectrique.

Les mesures diélectriques ont pour objet de dévoiler d'éventuelle dégradations dans l'isolement du transformateur afin de pouvoir intervenir avant la survenu d'un incident due à une avarie [24].

La condition d'isolement est un facteur essentiel de la fiabilité opérationnelle des transformateurs. Pour évaluer son état on doit effectuer la mesure des paramètres suivants :

- ✓ Mesure du facteur de puissance et de la capacité ;
- ✓ Mesure de la résistance d'isolement en courant continu.

**II.2.3.1. Mesure du facteur de puissance et de la capacité**

Les mesures de la capacité et du facteur de puissance sont effectuées dans le but d'étudier l'état de l'isolation des transformateurs de puissance et des traversées. Ces deux systèmes d'isolation sont indispensables au fonctionnement fiable du transformateur [25].

A partir de ce paramètre de mesure, on peut déterminer les problèmes d'isolation avant qu'une panne ne survienne.

### II.2.3.2. Mesure de résistance d'isolement en courant continue

Ce type d'expérimentation comporte essentiellement la mesure de la conductivité superficielle de l'isolement, et utilisé aussi dans la détection d'une faille imminente.

Comme elle consiste aussi à vérifier l'isolement :

- ✓ Entre l'enroulement lui-même ;
- ✓ Entre l'enroulement et la cuve ;
- ✓ Entre cuve et masse.

### II.2.4. Mesures électriques

#### II.2.4.1. Mesure du courant d'excitation

Pour découvrir un problème s'il est associé au noyau (des tôles coupées, des joints défectueux) ou bien un problème associé aux bobines (des spires en court-circuité ou en circuit ouvert), on procède à l'essai du courant d'excitation d'un transformateur qui est un courant consommé dans le cas d'un enroulement alimenté à une tension alors que le second groupe des enroulements est ouvert, ce courant total à vide a une composante de magnétisation et une composante de perte, est comparé à celui donnée par le constructeur [26].

#### II.2.4.2. Mesure de rapport de transformation

Les mesures du rapport de transformation des transformateurs servent à vérifier la fonction fondamentale d'un transformateur de puissance. En mesurant le rapport et le déphasage d'un enroulement à l'autre, on peut détecter :

- ✓ Les circuits ouverts (des problèmes de connexion ou un défaut dans le régulateur) ;
- ✓ Des courts-circuits (entre l'enroulement bobiné ou contre le circuit magnétique).

La technique de mesure consiste à injecter une tension à chaque phase de l'enroulement primaire, puis la tension est mesurée sur la phase secondaire correspondant à la même colonne [25].

Les mesures sont effectuées :

- ✓ A la mise en service ;
- ✓ pendant les tests de réception en usine ;
- ✓ Lors d'un entretien détaillé ;
- ✓ En cas d'une défaillance ;
- ✓ Après une réparation.

#### II.2.4.3. Mesure de la résistance d'enroulement

Les mesures de la résistance d'enroulement servent à évaluer les défauts possibles dans les enroulements ou les problèmes de contact, notamment entre les traversées et les enroulements, entre les enroulements et le changeur de prises.

Cette technique consiste à déterminer l'existence des déviations sur les valeurs de conception des résistances dans chaque bobinage, entre autres cette technique détermine les pertes par effet joule dans les enroulements et les connexions. La mesure est effectuée par l'application d'un courant continu sur le bobinage, en mesurant ensuite la chute de tension par conséquent sa résistance. En prenant le soin de relever la température des enroulements afin de pouvoir ramener les valeurs mesurées vers des valeurs à la température référence [27].

### II.2.5. Observations de l'état extérieur général du transformateur

Cette étape consiste a regardé [28]:

- ✓ Etat de peinture, présence de trace de rouille ;
- ✓ Etat des accessoires ;
- ✓ Etat des coffrets de commande.

FigureII.4 représente état extérieure d'une partie du transformateur.



**Figure II.4:** état extérieur d'une partie du transformateur.

### II.2.6. Méthode de thermographie

La thermographie ou bien appelée thermographie infrarouge, est une technique permettant de mesurer à distance et d'obtenir l'image thermique d'une scène observée dans l'infrarouge, au moyen d'un appareillage approprié, cette technique permet de repérer en particulier des extrémités de bornes mal boulonnées, qui par suite chauffent anormalement comme est indiqué dans la figure II.2, ou des aéroréfrigérants qui fonctionnent mal [28].

Cette technique est particulièrement utilisée en surveillance industrielle pour détecter les pannes. La figure II.5 illustre un Exemple de thermographie infrarouge sur une connexion mal boulonnée du transformateur.



**Figure II.5:** Exemple de thermographie infrarouge sur une connexion mal boulonnée du transformateur.

### II.2.7. Analyses de réponse en fréquence

Notre travail consiste à l'évaluation des défauts relatifs au déplacement radial du bobinage du transformateur par l'analyse fréquentielles. Pour cette raison, nous présentant au début la méthode d'analyse réponse fréquentielle FRA utilisée dans le domaine de diagnostic des transformateurs.

L'analyse des comportements du transformateur est généralement effectuée à l'aide de l'analyse de la réponse en fréquence (FRA) qui consiste à mesurer la fonction de transfert entre les bornes de ses enroulements. L'amplitude et la phase de l'impédance des enroulements du transformateur en fonction de la fréquence peuvent être extraites en connaissant la fonction de transfert qui représente les caractéristiques fondamentales d'un transformateur. La technique FRA est un outil très utile pour le diagnostic de ce type de système [29].

Les changements physiques à l'intérieur du transformateur constaté à partir des technique FRA (changement de signal de la réponse en fréquence) dont la cause doit être en suite identifiée et analysée [16].

#### II.2.7.1.les avantages de la méthode FRA [30]

- ✓ Méthode la plus sensible pour détecter les changements mécaniques et électriques dans la partie active des transformateurs ;

- ✓ Méthode de mesure non intrusive, qui permet d'évaluer l'intégrité des transformateurs sans appliquer de hautes tensions ;
- ✓ Méthode complète, fournissant des informations additionnelles pour faciliter l'évaluation de l'état des transformateurs.

### II.2.7.2. Utilités des analyses de la réponse en fréquence

La méthode FRA permet de détecter les défauts et défaillances dans le circuit magnétique, les enroulements et les structures de serrage des transformateurs, tels que [31] [30] :

- La déformation radiale et axiale des enroulements ;
- Le décalage entre enroulements HT et BT ;
- L'affaissement partiel d'un enroulement ;
- Les courts circuits et coupures de spires ;
- Les défauts de mise à la terre du circuit magnétique et des écrans ;
- La rupture des structures de serrages ;
- problèmes de raccordements internes ;
- Déplacement du circuit magnétique.

Les tests FRA sont plus précis pour détecter les déformations axiales ou radiales ainsi que les problèmes de connexions, qui apparaissent à des fréquences au-delà de 2kHz.

### II.2.7.3. Aspect d'utilisation du FRA

Il est conseillé de procéder au test FRA dans les cas suivants [24], [32]:

- Avant et après chaque transport ;
- Après chaque défaut à forte énergie, soit à l'intérieur du transformateur ou traversant (défaut réseau proche) ;
- Après un séisme ;
- Suite à des courts circuits élevés survenant sur le réseau électrique ;
- Après l'installation et de réinstallation ;
- Après avoir connu des pannes électriques ;
- Essai d'usine ;
- Durant une opération de maintenance systématique.

### II.2.7.4. Objectifs des mesures par FRA

L'intérêt des mesures par FRA sur les transformateurs est de détecter des déformations des enroulements dû aux forces électromagnétiques qui s'exercent du fait des surintensités apparaissant au moment de défauts directs, de défauts dans le régulateur, de mauvaises synchronisations [33].

A la suite d'une détérioration de l'isolement entre spire provoque un défaut dans les enroulements du transformateur, induit la diminution de la tenue diélectrique et aboutir à des spires courts-circuités. Comme un amincissement de l'isolation ou sa détérioration par usage, augmente le risque de défaut par diminution de la tenue mécanique des assemblages de l'enroulement [33].

Le diagnostic des défauts dû au court-circuit, est d'un grand intérêt à la détection avant son apparition, l'évolution de l'état mécanique permettant d'apprécier la fiabilité escomptée des transformateurs, en termes de susceptibilité accrue à des courts circuits futurs.

Les mesures par FRA pour le contrôle de l'intégrité mécanique d'un transformateur après transport, c'est un moyen fiable de confirmer que les assemblages du noyau et des enroulements n'ont subi aucune détérioration [33].

Les mesures par FRA peuvent donner des informations sur la tenue des structures géométriques des enroulements.

#### **II.2.7.5.Principe de la méthode**

Une relation directe entre la configuration géométrique des enroulements et le circuit magnétique à l'intérieur du transformateur de puissance et la distribution des éléments qui le composent tels que : résistances, inductances et capacitances. Ce réseau RLC peut être identifié par des fonctions de transfert dépendant de la fréquence. Or le changement dans la configuration géométrique engendre la variation de l'impédance du réseau et de ce fait déplace la fonction de transfert. Les changements dans la fonction de transfert vont révéler un grand rang de modes de défaillance [34].

Donc, l'approche FRA permet la détection des changements dans la fonction de transfert d'un enroulement individuel à l'intérieur du transformateur de puissance [34].

Les mouvements dans l'enroulement seront donc déterminés en fonction des capacitances et modifieront ainsi la forme de la courbe.

Le principe de fonctionnement de la méthode FRA, est d'injecter une tension à fréquence variable de quelques Hz à quelques MHz, donne un signal de réponse fréquentielle d'un enroulement par rapport à son environnement mécanique et électrique. Par comparaison avec une mesure de référence, ou sur un enroulement similaire [17].

FigureII.6 représente modèle d'un enroulement de transformateur avec réseau RLC.

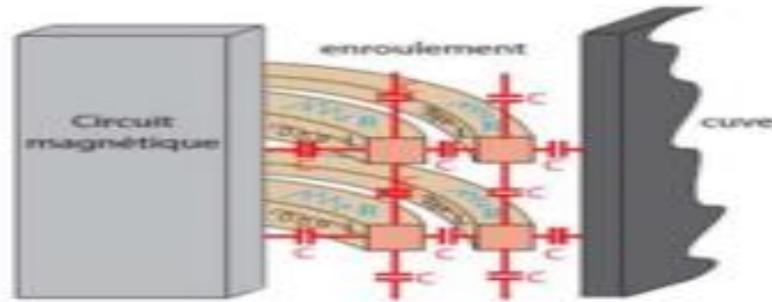


Figure II.6: Modèle d'un enroulement de transformateur avec réseau RLC.

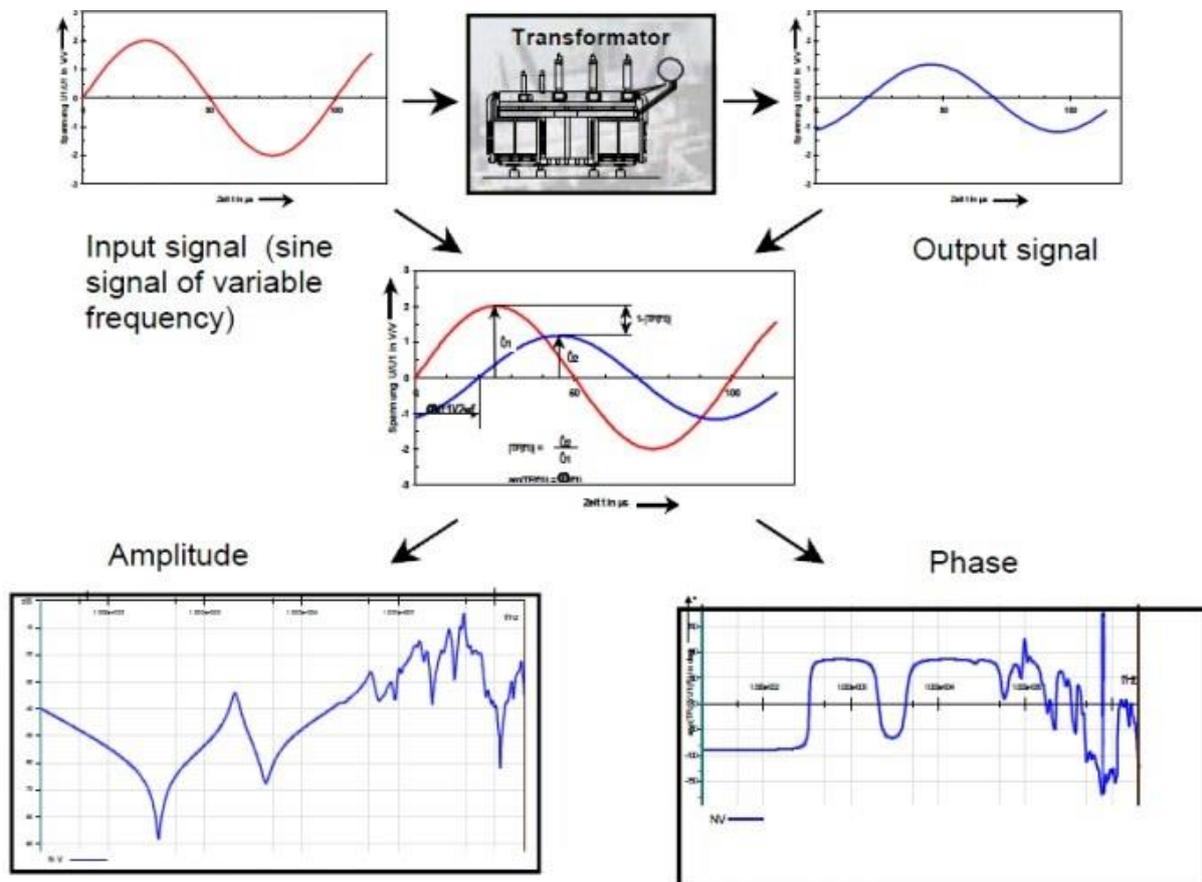


Figure II.7: Principe de la méthode FRA [24].

**II.2.7.6. Raccordement du FRA à un transformateur de puissance**

Le raccordement du FR Analyzer au transformateur de puissance à l'essai se fait comme suit [35]:

Les pinces utilisées peuvent être montées sur les traversées du transformateur ce qui permettrait d'obtenir un contact électrique fiable.

1. Fixer une pince de mesure sur la borne de référence de traversée du transformateur.

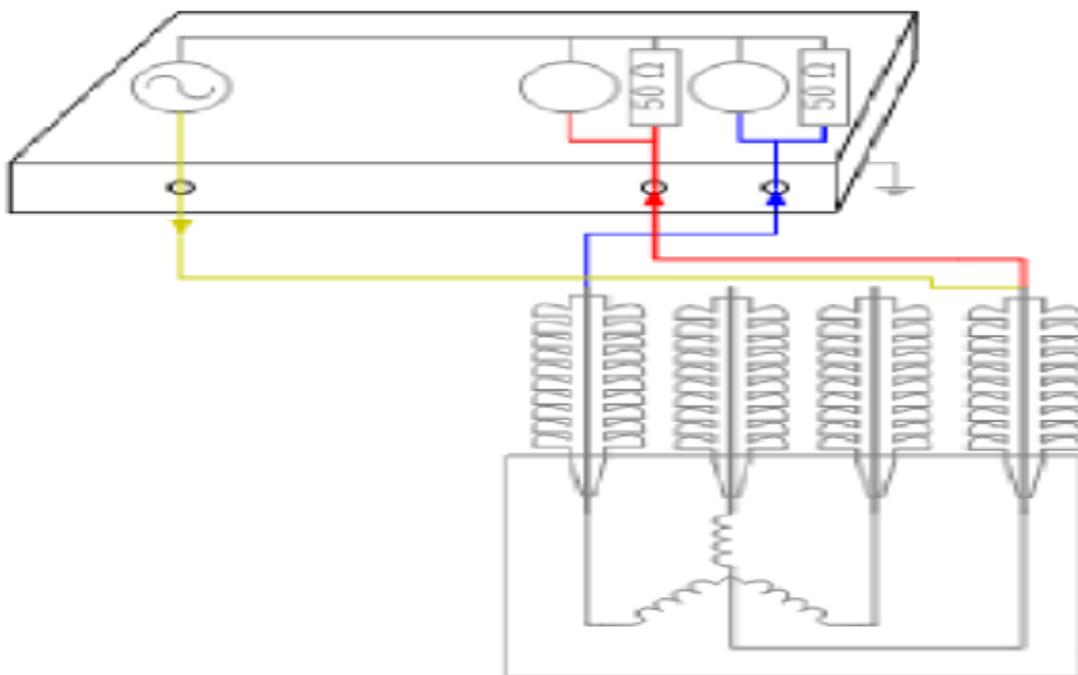
Le choix de la borne de référence se fait comme suit :

- Couplage étoile : injection sur la borne neutre N à travers les deux câbles (rouge et jaune) ;
  - Couplage triangle : injection sur une phase à travers les deux câbles (rouge et jaune).
2. Raccorder les câbles coaxiaux jaune et rouge via un adaptateur BNC livré au connecteur BNC de la pince.
  3. Raccorder les tresses en aluminium à la pince au borne de traversée à l'aide des vis se trouvant sur la pince et serrer les vis à fond.

Si nécessaire, utiliser la gaine isolante livrée pour éviter tout contact électrique entre la tresse en aluminium et le transformateur.

4. Raccorder les tresses en aluminium à la cuve de transformateur en utilisant les pinces à vis. Assurez-vous que toutes les pinces et les tresses sont vissé à fond et qu'il existe un contact électrique entre les pinces et la cuve du transformateur. En cas de doute, décapez la couche de vernis à l'aide de la lime livrée.
5. Fixer une autre pince sur la borne de mesure de traversée du transformateur.
6. Raccorder le câble coaxial bleu au connecteur BNC sur la pince pour borne de traversée.
7. Pour mettre à la terre la pince pour borne de traversée de mesure, répéter les étapes 3 et 4.

La figure II.8 illustre le raccordement du FRA au transformateur de puissance.



**Figure II.8:**Le raccordement du FRA au transformateur de puissance [24].

### II.2.7.7.L'exploitation des mesures

La méthode d'analyse de réponse fréquentielle est basée sur l'étude comparative des différentes courbes de la réponse généralement, on utilise une simple technique c'est l'observation visuelle de ces pour évaluer l'état des transformateurs [31].

Il y a trois approches pour obtenir des informations de références :

- Les mesures sont comparées à des courbes de référence antérieures ;
- Mesures sur des transformateurs identiques et saines ;
- Mesures sur des phases d'un même transformateur mais on doit être prise en compte leur différence constructive intrinsèque.

#### ➤ Domaine de fréquence pour les interprétations

Le Tableau II-2 montre le domaine d'interprétation de FRA compte tenu des limites venant de la géométrie des installations d'essai et de certaines conditions d'incertitude liées à des flux rémanents.

En règle générale, les spires court-circuitées, l'aimantation et d'autres défauts reliés au noyau magnétique altèrent la forme de la courbe aux basses fréquences. Les moyennes fréquences quant à elles représentent des mouvements axiaux ou radiaux de l'enroulement, et les hautes fréquences indiquent des défauts quant aux câbles qui relient les enroulements aux traversées et aux changeurs de prise[35].

<b><math>f &lt; 2000 \text{ Hz}</math></b>	Déformations du noyau, magnétisme résiduel
<b><math>2000 \text{ Hz} &lt; f &lt; 20 \text{ kHz}</math></b>	Court-circuit entre spires, circuits ouverts.
<b><math>20\text{kHz} &lt; f &lt; 200 \text{ kHz}</math></b>	Déplacements relatifs entre les enroulements.
<b><math>200\text{kHz} &lt; f &lt; 2 \text{ MHz}</math></b>	Déformations propres de l'enroulement.
<b><math>2 \text{ MHz} &lt; f &lt; 10 \text{ MHz}</math></b>	Disposition de couplages et câbles de mesure.

**Tableau II.2:** Domaines typiques d'interprétation de FRA [24].

### II.3.Conclusion

D'après ce qui a été présenté au chapitre II, nous avons conclu que le diagnostic est d'une importance capitale pour une meilleure maintenance de transformateur.

Le prochain chapitre traitera le diagnostic de défaillance liée un déplacement relatif des enroulements.

**Chapitre III :**  
**Test FRA sur**  
**un**  
**enroulement**

### III. Introduction

Les enroulements du transformateur sont sujet de sollicitations externes telles que : la foudre, séisme, court-circuit.....etc. qui peuvent engendrer des déformations géométriques des bobinages. Dans le présent chapitre, une étude de la détection des déformations radiales sera effectuée en utilisant la technique d'analyse de la réponse fréquentielle de l'enroulement.

Des tests expérimentaux ont été réalisés afin de mettre en évidence les changements liés à ce type de défaut.

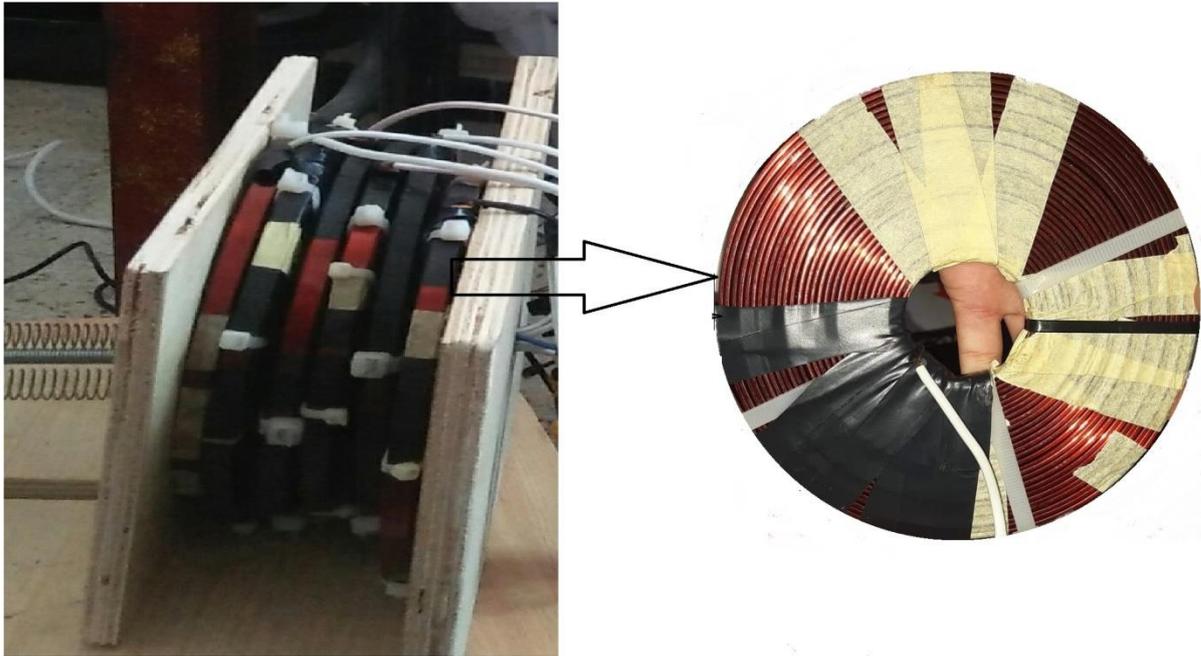
#### III.1. Présentation de l'enroulement d'essai

L'enroulement réalisé dans le cadre de notre étude est composé de six disques et chaque disque est constitué de trente spires de diamètre 18cm et ce disque été enroulé dans un gabarit à axe rond de 6cm comme illustré dans la figure ci-dessous.

Le cuivre que nous avons utilisé dans la fabrication des enroulements est de 8mm de large et 2mm d'épaisseur.



**Figure III.1:**Opération de fabrication des disques de l'enroulement.



**Figure III.2:** Assemblage des disques constituant le bobinage test.

### III .2. Présentation du banc d'essai

#### 1. Appareil de mesure

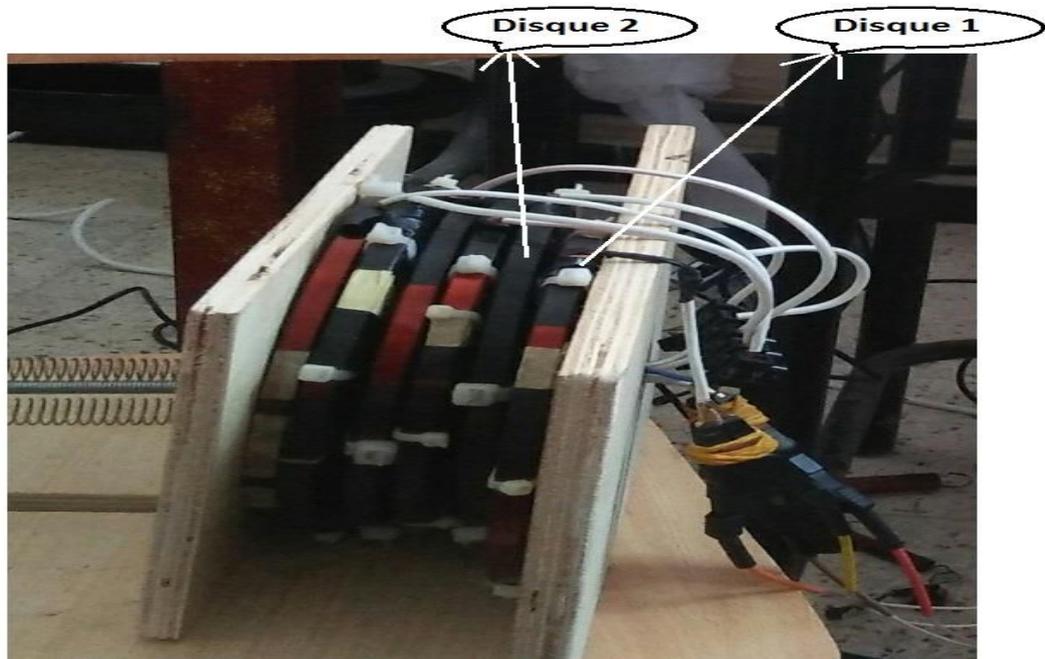
Appareil de mesure RLC mètre de précision hautes performance permet de caractériser très rapidement tout composant passif, dans une gamme de fréquences 20Hz-5Mhz.



**Figure III.3:**Appareil de mesure d'impédance RLC mètre

### 2. L'enroulement d'essai

Comme il est présenté dans la figure (III.4), l'enroulement d'essai est composé de six disques montés sur une structure permettant de faire des déplacements relatifs d'un disque ou deux plusieurs disques.



**Figure III.4:** l'enroulement test.

### 3. Ordinateur

Le RLC mètre est relié au PC par une liaison RS232, dans le but de faire l'acquisition et le stockage des données.



**Figure III.5:** Ordinateur.

### III.3. Méthodologie de mesure

Les mesures effectuées consistent :

- 1) Injection d'une tension de 1 Volt de fréquence 20Hz-50MHz dans l'enroulement test.
- 2) Acquisition de l'impédance en fonction de la fréquence par RLC mètre piloté par LabVIEW disponible au laboratoire LM2D.

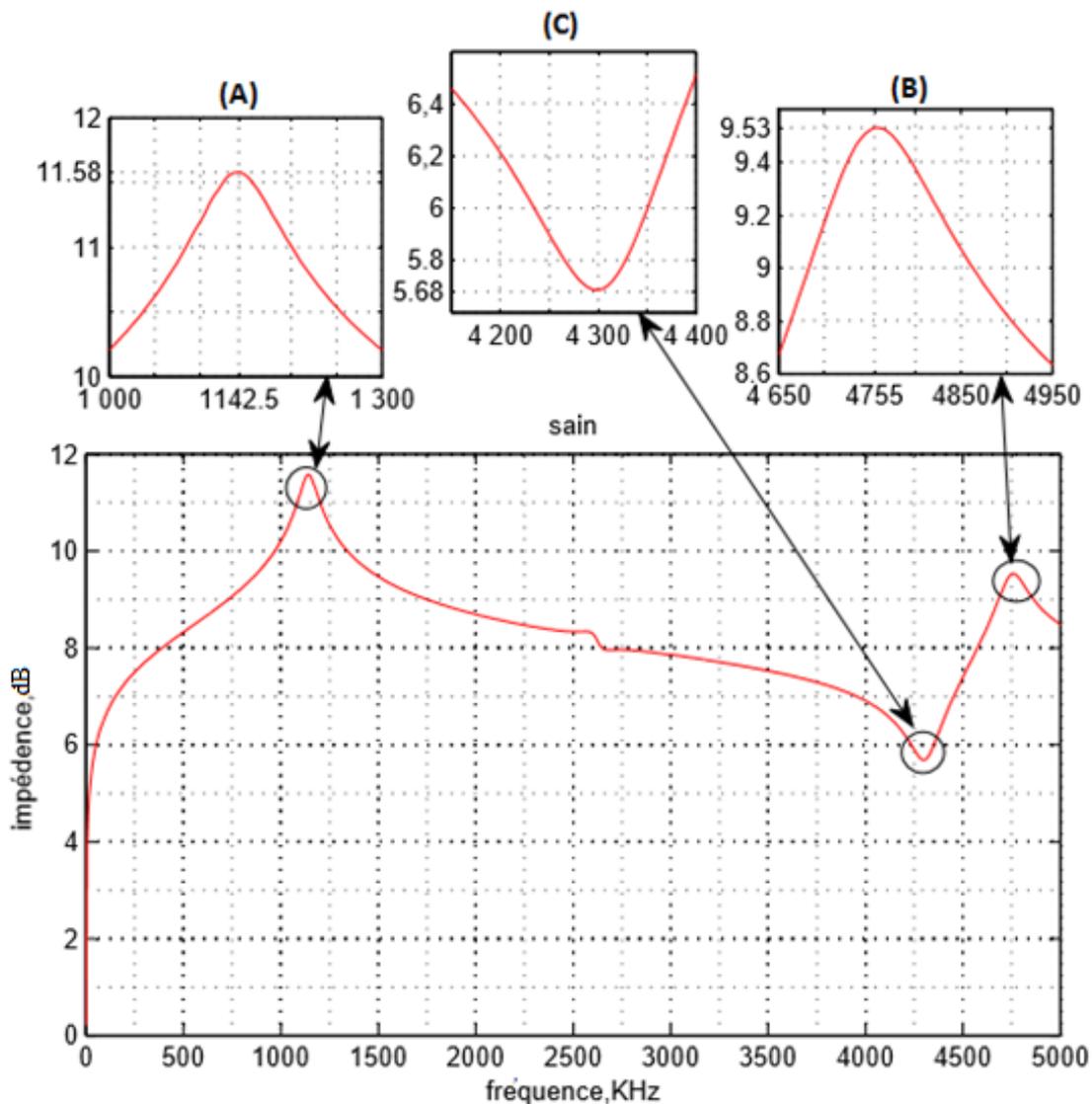


**Figure III.6:**Banc expérimental, de mesure de la réponse fréquentielle de l'enroulement.

### III.4. Résultat expérimentaux

#### 1) Réponse fréquentielle d'un enroulement sain

Conformément à la méthodologie de mesure précédente, un test a été réalisé sur l'enroulement dans une bande de fréquence 20Hz-5MHz. La figure (III.7) représente la réponse en impédance mesurée du bobinage.



**Figure III.7:** Réponse fréquentielle en impédance d'un enroulement sain.

Comme on le voit sur cette figure, la réponse en fréquence de l'impédance présente 03 point de résonances dont deux point (A-B) correspondant à des impédances de 11.58Ω et 9.53Ω respectivement pour des fréquences respectives 1142.5KHz et 4755KHz. Ces points correspondent des valeurs élevées d'impédance, ce qui nous amène à dire que ces fréquences de coupures sont des fréquences dites « fréquences normales en circuit ouvert ».

On a constaté aussi que la réponse  $Z = f(f)$  présente un autre point (C) de résonance où l'impédance est relativement faible de valeur 5.68Ω pour une fréquence 4300KHz, cette fréquence induisant un point minimum d'impédance dite « fréquence normale en court-circuit ».

Les fréquences de coupure ainsi relevées sur la réponse expérimentale de l'enroulement, seront exploitées pour diagnostic de l'influence du déplacement radial des disques de l'enroulement sur sa réponse fréquentielle.

Les fréquences de coupures sont traduites aussi par le passage de la réponse en phase par zéro comme illustre dans la figure (III.8).

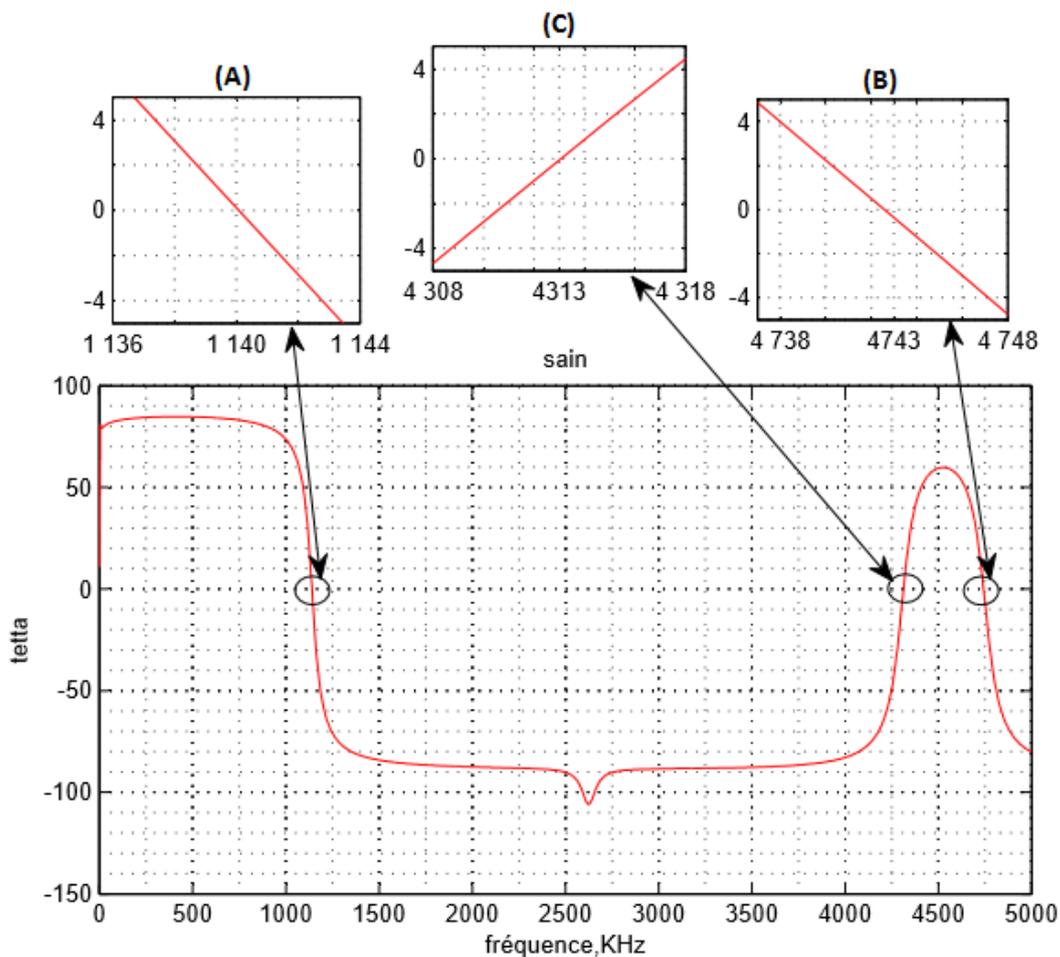


Figure III.8: Réponse fréquentielle en phase d'un enroulement sain.

## 2) Réponse d'un enroulement défaillant

Les défauts réalisés dans le cadre de notre travail sont des défauts de déplacement radial des bobinages du transformateur, ce défaut est très récurrent et peut avoir lieu après un court-circuit sévère, un séisme... etc. Les défauts réalisés sont des déplacements radiaux de 0 jusqu'à 5cm avec un pas de 0.5cm. Les relevés ont été pris par un LCR mètre connecté au PC via d'une liaison RS232 piloté par Labview.

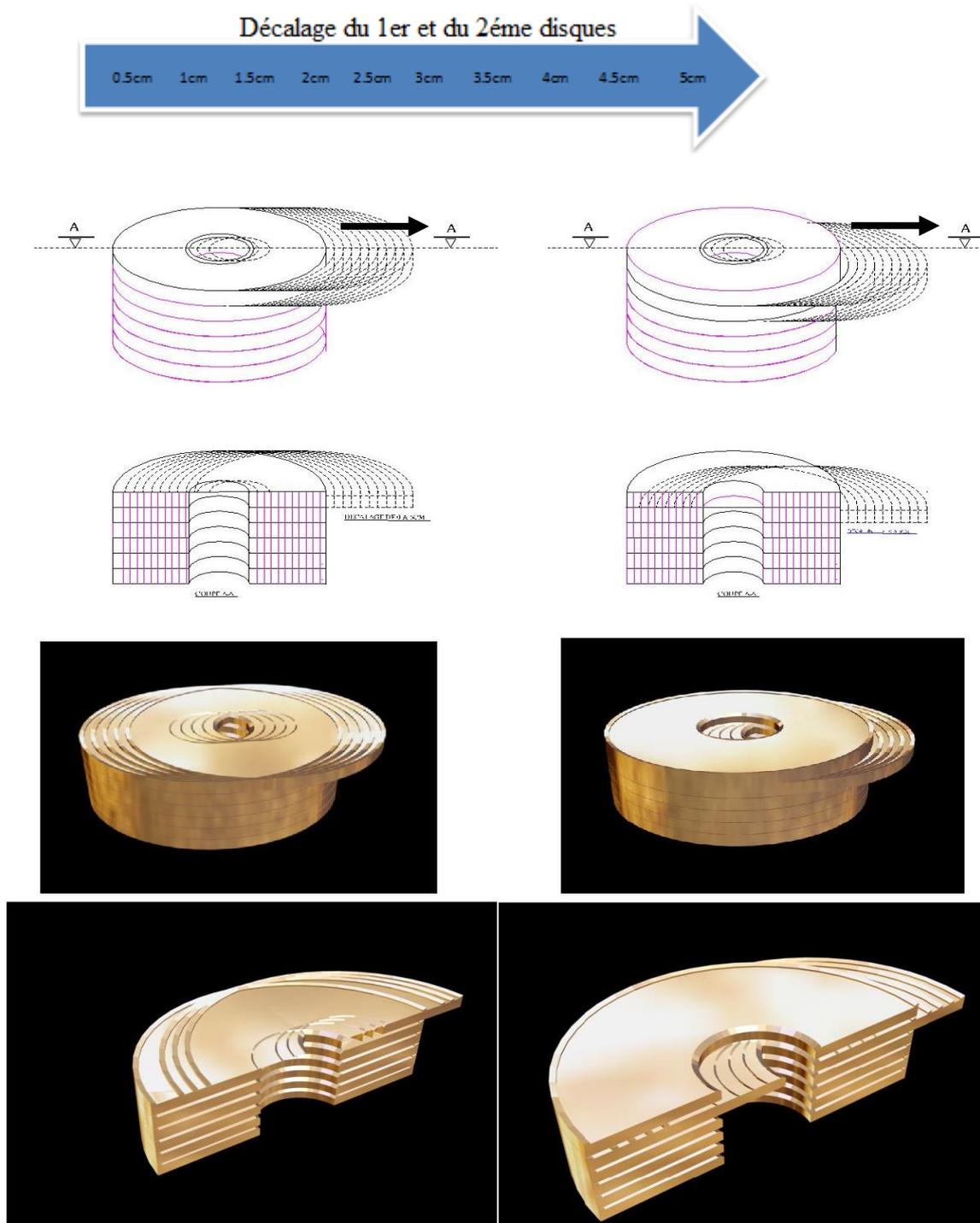


Figure III.9: Décalage du 1er et du 2ème disque sur l'axe radial.



Figure III.10: Un déplacement de 2.5cm du premier disque.

- Défaut réalisé sur le premier disque

La figure (III.11) et (III.12) représente les réponses fréquentielles en impédance et en phase de l'enroulement pour les différents déplacements réalisés comparées à celle d'un enroulement sain.

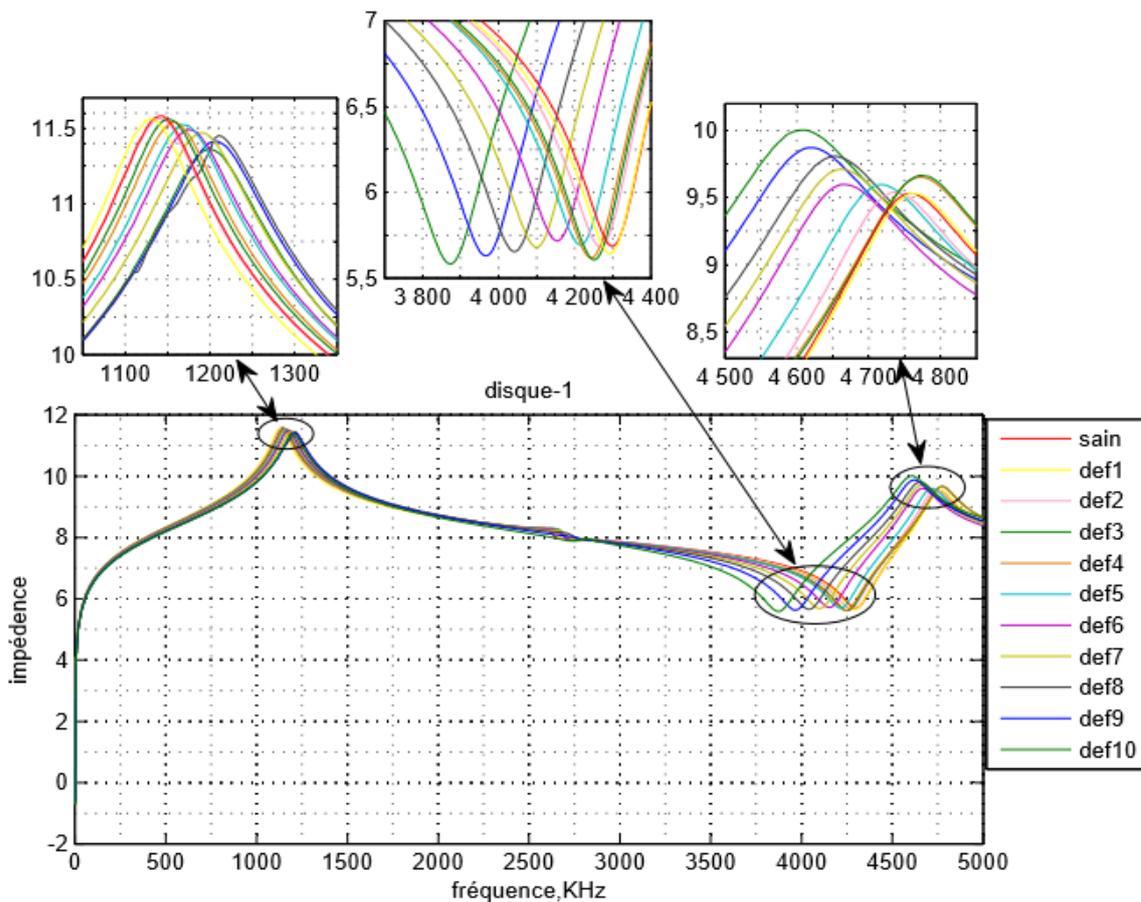
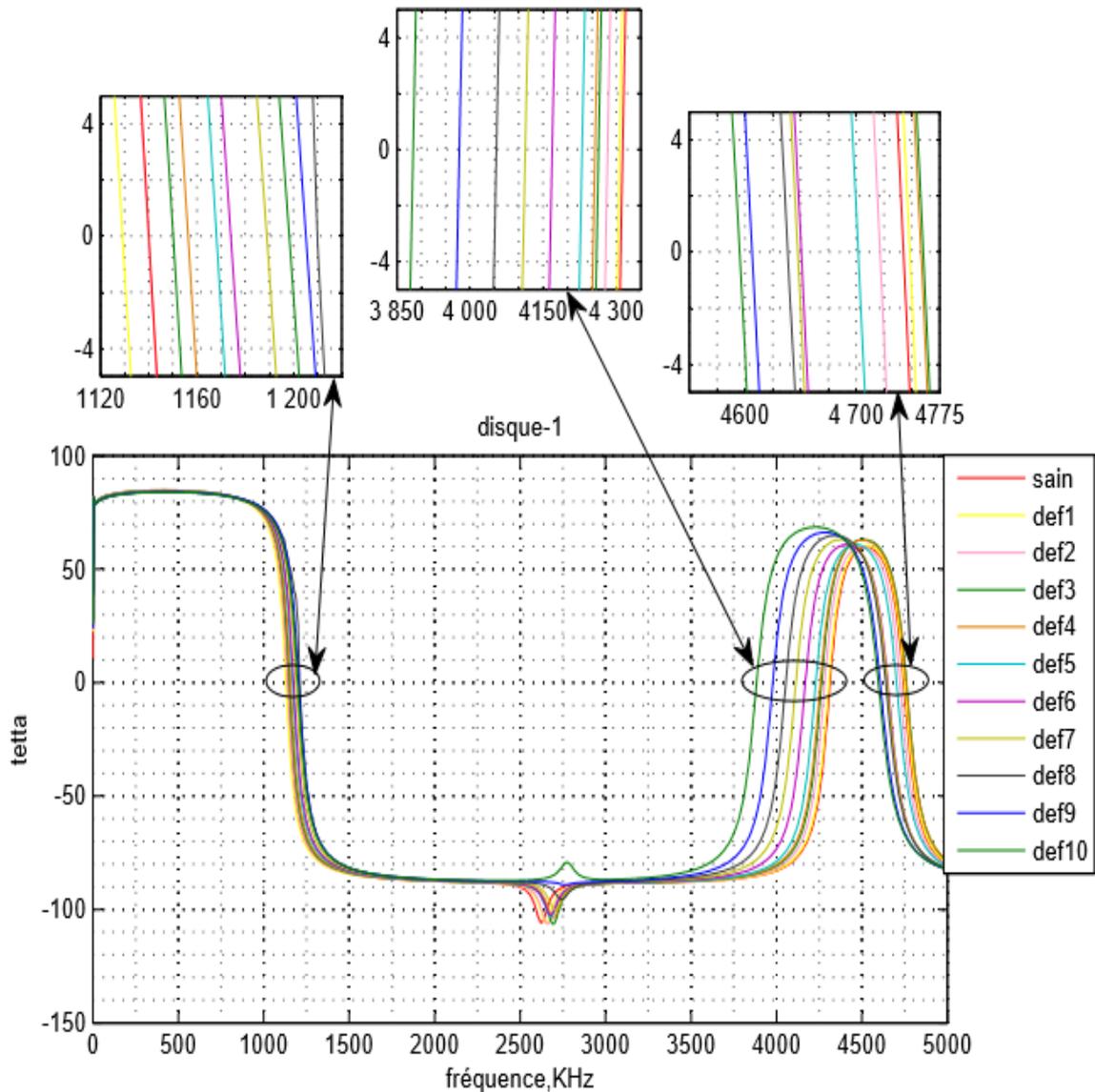


Figure III.11: Comparaison entre la réponse fréquentielle en impédance d'un enroulement sain et la réponse fréquentielle en impédance d'un enroulement défaillant dans le disque 1.



**Figure III.12:** Comparaison entre la réponse fréquentielle en phase d'un enroulement sain et la réponse fréquentielle en phase d'un enroulement défaillant dans le disque 1.

D'après ces figures, il est clair que le déplacement réalisé affecte la réponse en fréquence de l'enroulement, les défauts sont associés à des variations dans gamme de fréquence (200Khz – 2000Khz).

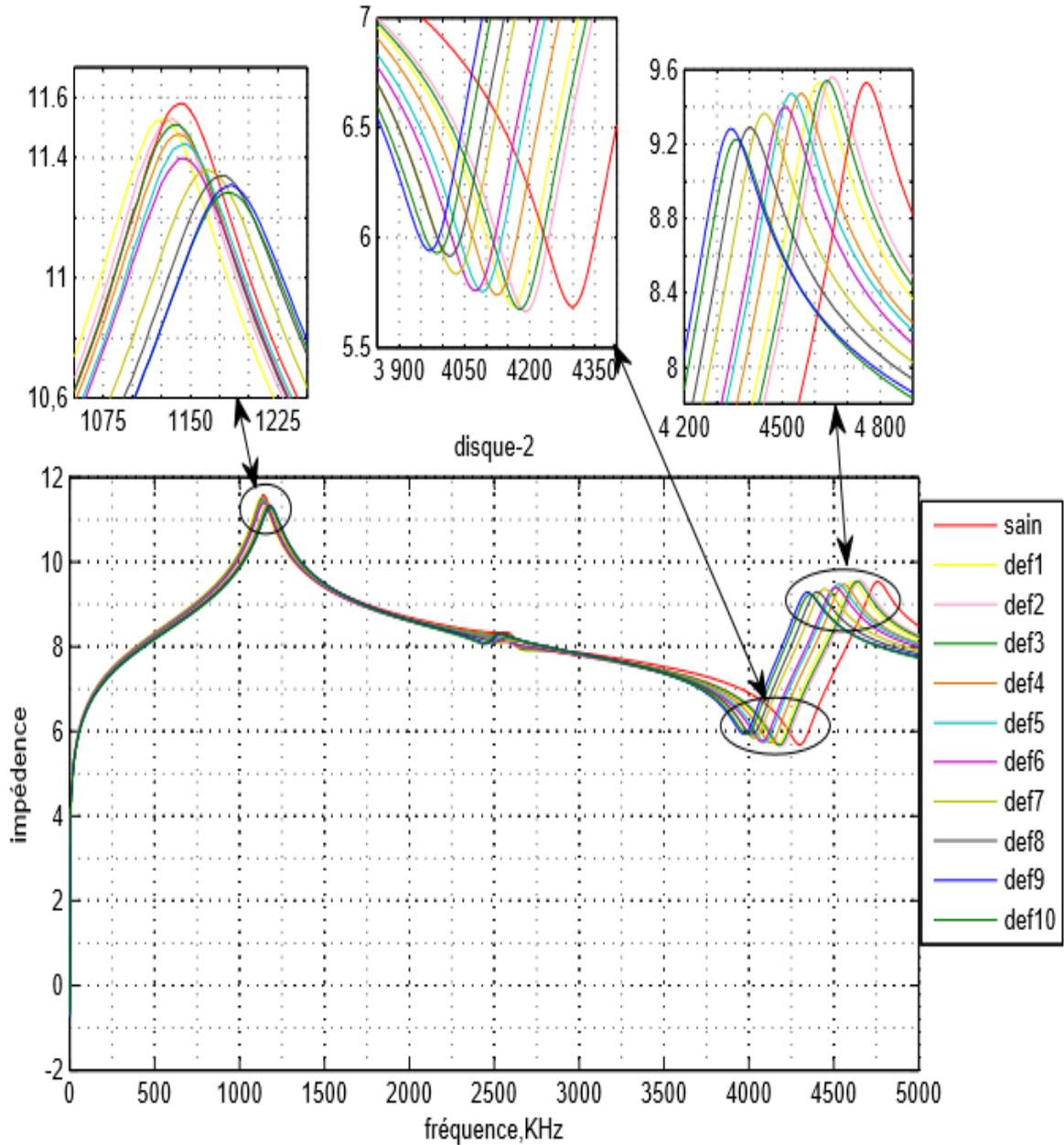
Tableau II-2 indique que le défaut réalisé correspond à un déplacement de l'enroulement.

- **Défaut réalisé sur le deuxième disque**

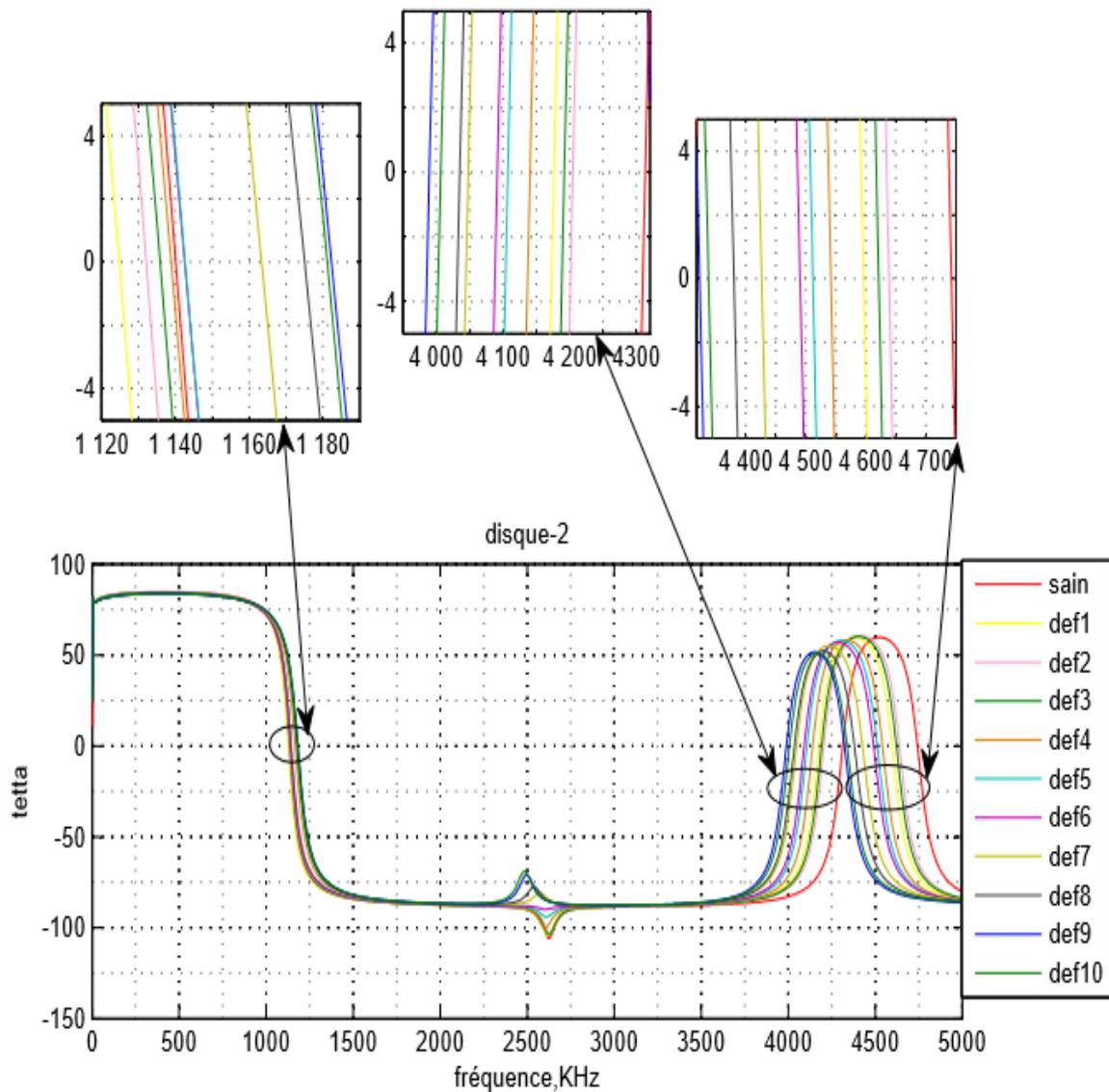
Les mêmes défauts sont réalisés sur le disque numéro 2 dans l'objectif de déceler les changements qui peuvent avoir lieu en déplacement la position du défaut.

Les figures (III.13) et (III.14) représentent respectivement les réponses en impédance et en phase de l'enroulement.

Dans ces figures, on a remarqué qu'effectivement tout déplacement induit un changement de la réponse  $Z = f(f)$ .



**Figure III 13:** Comparaison entre la réponse fréquentielle en impédance d'un enroulement sain et la réponse fréquentielle en impédance d'un enroulement défaillant dans le disque 2.



**Figure III.14:** Comparaison entre la réponse fréquentielle en phase d'un enroulement sain et la réponse fréquentielle en phase d'un enroulement défaillant dans le disque 2.

Dans l'objectif de détecter et localiser le défaut, des relevés de fréquence de coupures ont été effectués dans les différentes configurations à savoir : enroulement sain, déplacement du disque 1 et le déplacement du disque 2.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau (III-1).

<b>Etat d'enroulement</b>		<b>Fréquence des résonances (kHz)</b>		
Enroulement sain		Fréquence de Résonance N : 1	Fréquence de Résonance N : 2	Fréquence de Résonance N : 3
		1142.5	4300	4755
Enroulement défaillant		Fréquence de Résonance N : 1	Fréquence de Résonance N : 2	Fréquence de Résonance N : 3
Les défauts sur le disque 1	Défaut 1	1130	4295	4765
	Défaut 2	1140	4270	4735
	Défaut 3	1150	4250	4775
	Défaut 4	1160	4245	4770
	Défaut 5	1170	4215	4720
	Défaut 6	1180	4155	4670
	Défaut 7	1190	4100	4660
	Défaut 8	1210	4040	4655
	Défaut 9	1206	3965	4620
	Défaut 10	1200	3875	4610
	Défaut 1	1130	4165	4610
	Défaut 2	1135	4190	4650
	Défaut 3	1140	4180	4635
	Défaut 4	1140	4125	4560

Les défauts sur le disque 2	Défaut 5	1145	4095	4530
	Défaut 6	1150	4075	4505
	Défaut 7	1165	4030	4450
	Défaut 8	1480	4015	4400
	Défaut 9	1485	3970	4345
	Défaut 10	1485	3990	4360

**Tableau III.1:** Comparaison entre les fréquences de résonances d'un enroulement sain et les défauts des déformations radiales.

D'après les résultats obtenus on a constaté ce qui suit :

- **Pour le premier disque :**
- Une déformation de 0.5cm et 1cm provoque un décalage vers la gauche de fréquence de la première résonance de l'ordre de 12.5KHz et 2.5KHz par rapport à la fréquence de la première résonance de l'enroulement sain.
- Une déformation de 1.5cm à 3.5cm avec un pas de 0.5cm engendre un décalage vers la droite par rapport à la fréquence de la première résonance d'enroulement sain, la fréquence de résonance des différents déplacements présente un décalage d'une valeur de 10KHz les unes des autres.
- Une déformation de 4cm, 4.5cm et 5cm induit un décalage vers la gauche par rapport à la fréquence de résonance d'enroulement défaillant à 3.5cm mais toujours à droite par rapport à la fréquence de la première résonance de l'enroulement sain.
- **Pour le deuxième disque :**
- Une déformation de 0.5cm induit un décalage vers la gauche de la fréquence de première résonance par rapport à la fréquence de la première résonance d'enroulement sain, la fréquence de la première résonance d'enroulement défaillant est 1130KHz par contre la fréquence de résonance d'enroulement sain est 1142.5KHz suit un décalage 12.5KHz.
- Une déformation de 1cm engendre un décalage vers la gauche de la fréquence de la première résonance par rapport à la fréquence de la première résonance d'enroulement sain. La fréquence de la première résonance d'enroulement défaillant est 1135KHz.

- Une déformation de 1.5cm et 2cm provoque un décalage vers la gauche toujours d'une même fréquence de résonance de 1140KHz par rapport à la fréquence de la première résonance d'enroulement sain.
- Une déformation de 2.5cm à 5cm avec un pas de 0.5cm provoque un décalage vers la droite par rapport à la fréquence de la première résonance d'enroulement sain, la fréquence de résonance correspondant à chaque déplacement sont respectivement : 1145KHz, 1150KHz, 1165KHz, 1180KHz, 1185KHz, 1185KHz suit un décalage de qui peut être 40Khz pour un déplacement maximum de 5cm.

**III.5. Localisation de défaut dans l'enroulement**

Dans le but de distinguer entre les défauts réalisés sur les deux disques pour différents déplacements, nous avons comparé les fréquences de résonances des différentes configurations de défaut par rapport aux fréquences de résonance enregistrées dans le cas d'un enroulement sain.

- **Le décalage de première résonance en pourcentage :**

Position de Défaut : $\Delta x(\text{cm})$	Fréquence De première Résonance d'enroulement Sain $f_{\text{sain}}$	Fréquence de première résonance d'enroulement défaillant :		$\Delta f = \left  \frac{f_{\text{sain}} - f_{\text{défaut}}}{f_{\text{sain}}} \right  \%$	
		Sur le disque1 : $f_{\text{Défaut}}$	Sur le disque2 : $f_{\text{Défaut}}$	$\Delta f = \left  \frac{f_{\text{sain}} - f_{\text{défautdisque1}}}{f_{\text{sain}}} \right  \%$	$\Delta f = \left  \frac{f_{\text{sain}} - f_{\text{défautdisque2}}}{f_{\text{sain}}} \right  \%$
0.5	1142.5	1130	1130	1.09	1.09
1		1140	1135	0.22	0.66
1.5		1150	1140	0.66	0.22
2		1160	1140	1.53	0.22
2.5		1170	1145	2.41	0.22
3		1180	1150	3.28	0.66
3.5		1190	1165	4.16	1.97

4		1210	1180	5.9	3.28
4.5		1206	1185	5.56	3.72
5		1200	1185	5.03	3.72

**Tableau III 2:** Pourcentage de décalage fréquentiel de première résonance

- Le décalage de deuxième résonance en pourcentage :

position de Défaut : $\Delta x(\text{cm})$	Fréquence de deuxième Résonance D'enroulement Sain $f_{\text{sain}}$	Fréquence de deuxième résonance d'enroulement défaillant :		$\Delta f = \left  \frac{f_{\text{sain}} - f_{\text{défaut}}}{f_{\text{sain}}} \right  \%$	
		Sur le disque1 : $f_{\text{Défaut}}$	Sur le disque2 : $f_{\text{Défaut}}$	$\Delta f = \left  \frac{f_{\text{sain}} - f_{\text{défautdisque1}}}{f_{\text{sain}}} \right  \%$	$\Delta f = \left  \frac{f_{\text{sain}} - f_{\text{défautdisque2}}}{f_{\text{sain}}} \right  \%$
0.5	4300	4295	4160	0.12	3.14
1		4270	4190	0.7	2.56
1.5		4250	4180	1.16	2.79
2		4245	4125	1.28	4.07
2.5		4215	4095	1.98	4.77
3		4155	4075	3.37	5.23
3.5		4100	4030	4.65	6.28
4		4040	4015	6.05	6.63
4.5		3965	3970	7.8	7.67
5		3875	3990	9.88	7.21

**Tableau III.3:** Pourcentage de décalage fréquentiel de deuxième résonance

- Le décalage de troisième résonance en pourcentage :

position de Défaut : $\Delta x(\text{cm})$	Fréquence de troisième Résonance d'enroulement Sain $f_{\text{sain}}$	Fréquence de troisième résonance d'enroulement défaillant :		$\Delta f = \left  \frac{f_{\text{sain}} - f_{\text{défaut}}}{f_{\text{sain}}} \right  \%$	
		Sur le disque1 : $f_{\text{Défaut}}$	Sur le disque2 : $f_{\text{Défaut}}$	$\Delta f = \left  \frac{f_{\text{sain}} - f_{\text{défautdisque1}}}{f_{\text{sain}}} \right  \%$	$\Delta f = \left  \frac{f_{\text{sain}} - f_{\text{défautdisque2}}}{f_{\text{sain}}} \right  \%$
0.5	4755	4765	4610	0.21	3.05
1		4735	4655	0.42	2.1
1.5		4775	4635	0.42	2.52
2		4770	4560	0.32	4.1
2.5		4720	4530	0.74	4.73
3		4665	4510	1.89	5.15
3.5		4660	4445	2	6.52
4		4655	4400	2.1	7.47
4.5		4620	4345	2.84	8.62
5		4605	4360	3.15	8.31

**Tableau III.4:** Pourcentage de décalage fréquentiel de troisième résonance.

Les figures (III.15), (III.16) et (III.17), illustrent le pourcentage de décalage des trois fréquences de résonances par rapport aux fréquences de référence qui sont celle de l'enroulement sain.

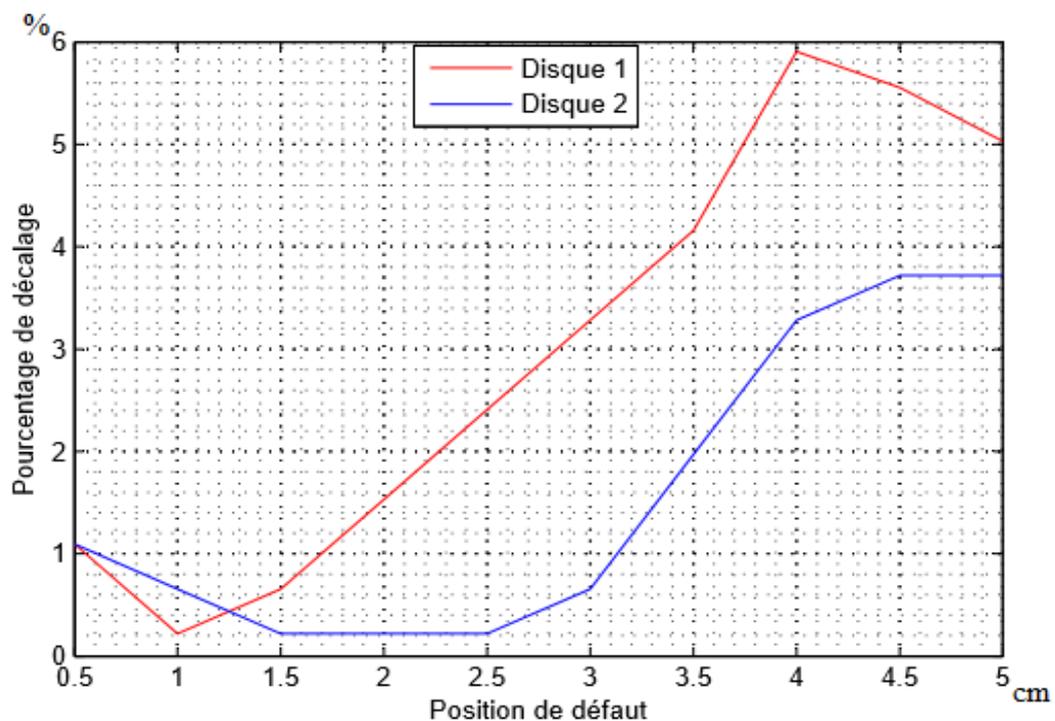


Figure III.15: Décalage de la 1ère résonance en fonction du déplacement du disque.

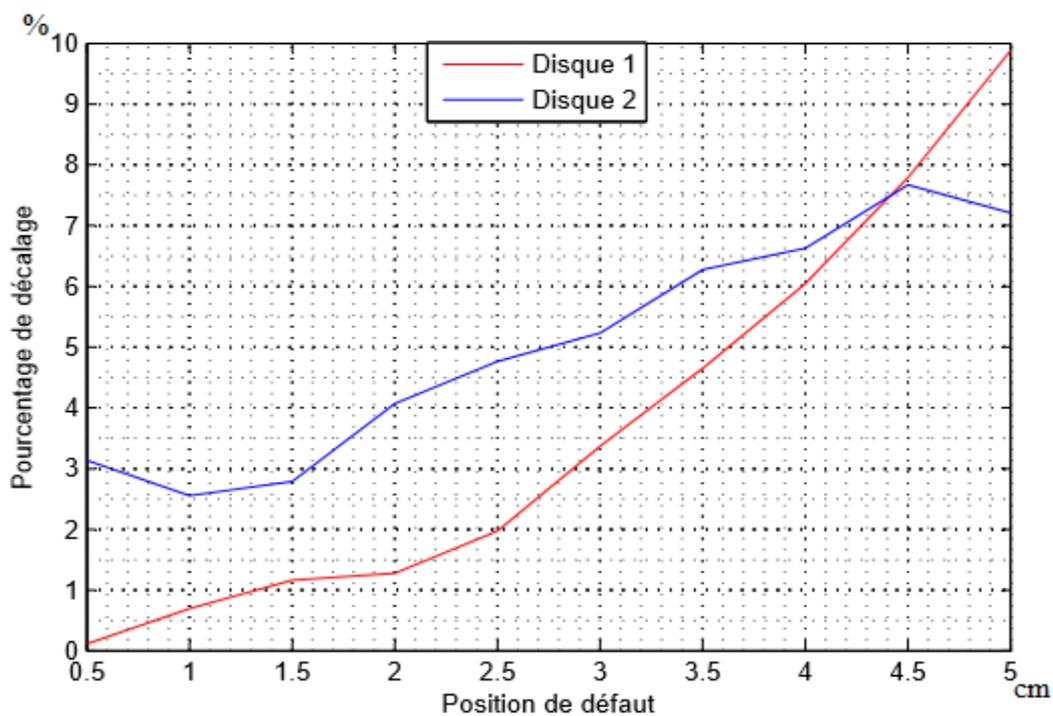
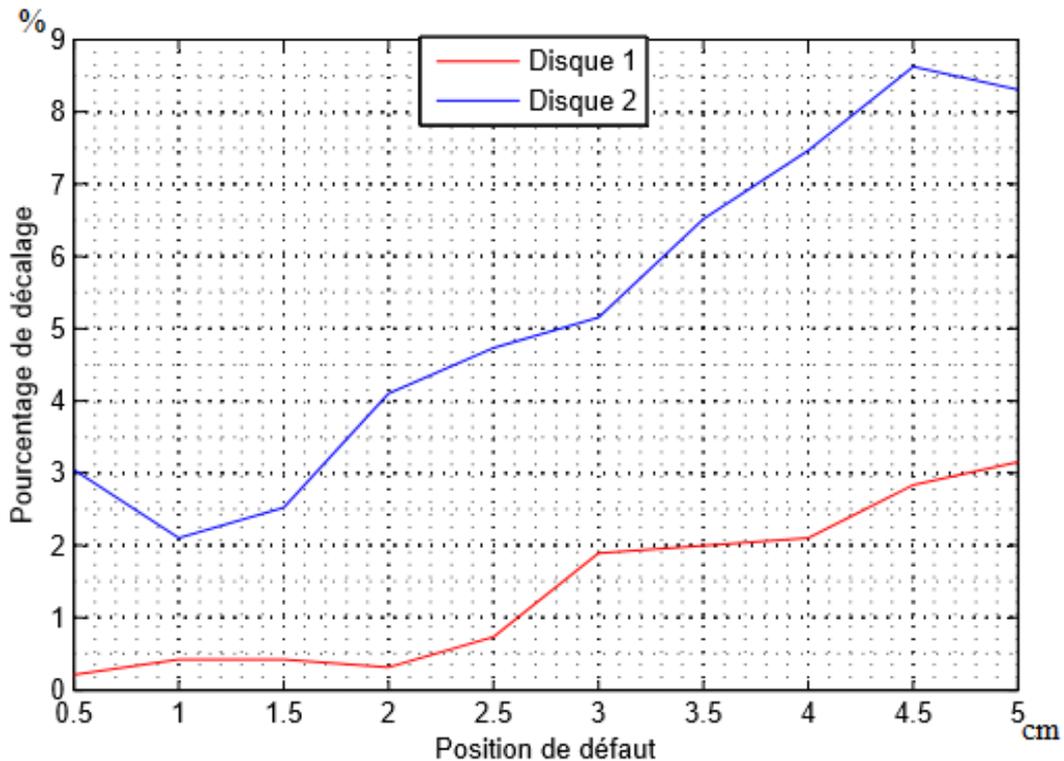


Figure III.16: Décalage de la 2ème résonance en fonction du déplacement du disque.



**Figure III.17:** Décalage de la 3<sup>ème</sup> résonance en fonction du déplacement du disque.

### III.5.1. Discussion des résultats

La figure (III.15) représente le décalage de la fréquence du premier point de résonance par rapport à la première fréquence de référence (enroulement sain), comme il apparaît sur cette figure, le décalage de la première résonance augmente avec l'augmentation de la distance de décalage. On a remarqué également qu'à faible valeur de déplacement 0 cm à 1.5cm le décalage de fréquence décroît.

Les décalages enregistrés lors des défauts sur le premier disque sont plus importants que ceux enregistrés dans le cas des défauts sur le deuxième disque. Ce paramètre peut être un moyen de détecter le disque concerné par le déplacement radial.

Dans les figures (III.16) et (III.17) correspondant aux pourcentages de décalage fréquentiel en fonction du déplacement relatif des disques du bobinage, on a constaté dans les deux cas présentés que le décalage fréquentiel augmente avec l'augmentation du déplacement et il est plus accru dans le cas de défaut présent sur le disque 2 contrairement au cas du décalage de la première résonance. Cette constatation peut être aussi un moyen de localiser les défauts.

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté un enroulement composé de 6 disques de 30 spires chacun. On a réalisé un test de mesure de balayage de fréquence sur une bande de 20hz-50Mhz sur un enroulement sain puis on a refait le test en décalant le premier disque puis le deuxième disque sur l'axe radial de l'enroulement pour localiser le défaut.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

Notre travail fait partie d'un axe de recherche relatif au diagnostic non destructif des transformateurs de puissance.

Le diagnostic a été réalisé en utilisant l'analyse de la réponse fréquentielle de l'enroulement, une méthode très utilisée par les exploitants des ouvrages électriques tels que : GRTE, sociétés de distribution de l'électricité SDA, SDE, SDC, SDO, afin d'assurer une bonne maintenance et une sûreté de fonctionnement des transformateurs qui sont une partie importante dans les réseaux électriques.

Les tests sont réalisés au laboratoire LM2D de l'université de Bouira sur un bobinage réel conçu dans le cadre de notre étude de diagnostic de défauts liés au déplacement radial de l'enroulement.

D'après les résultats obtenus au cours de notre étude nous avons retenu les points suivants :

- Toute déformation géométrique (physique) de l'enroulement est traduite par une modification de sa réponse fréquentielle, de ce fait  $Z(f)$  peut constituer un outil de diagnostic.
- Les défauts de déplacement radial des disques constituant l'enroulement, se traduisent par des modifications de l'impédance en fonction de la fréquence dans la gamme 200KHz-2MHz.
- Les réponses en fréquence de l'impédance, lors des défauts liés au déplacement radial présentent des décalages de leurs fréquences de résonances (1<sup>er</sup> pic) vers la droite (la majorité) comparément à celle enregistrée lors d'un essai sur le bobinage sain.
- Les réponses obtenues dans le cas de décalage radial de l'enroulement peuvent facilement être un outil de localisation de la partie touchée par la défaillance étudiée.

Comme perspectives pour ce travail, on propose :

- Etude des déformations axiales dans le but de les différencier des déformations radiales étudiées.
- Etude par une modélisation par éléments finis du problème posé afin d'établir un modèle complet permettant de simuler plusieurs défauts.

## Référence bibliographique

---

- [1] : BOURGEOIS.A, « Etude du phénomène d'électrification par écoulement sur les cartons des transformateurs de puissance », Institut national polytechnique de Grenoble, Février 2007.
- [2] : M. KOSTENKO et L. PIOTROVSKI; Machines électriques, Tome I, éditions : MIR. Moscou 1976.
- [3] : Document SONELGAZ « Ecole technique de Blida les transformateurs de puissance ».
- [4] : spécifications technique ( transformateur de puissance - distribution électrique).
- [5] : T. Nakata , N. Takahashi et Y. Kawase « magnetic performance of step-lap joints in distribution transformer cores » IEEE Transactions On Magnetics, Vol. Mag-18, No. 6, November 1982.
- [6] : REKIK BADRI, «Etude et modélisation des défauts des transformateurs de puissance », Mémoire de magister, département d'électrotechnique, Université de Annaba. Année 2008.
- [7] : KAHLOUCHE Faouzi, «Fabrication et Caractérisation de Micro Transformateurs Planaires à Couches Magnétiques »; Ecole doctorale Science, Ingénierie, Santé de L'université Jean Monnet De Saint-Étienne, Présentée et soutenue publiquement le 10/06/2014.
- [8] : Madjid MEZIANI, « Contribution à la modélisation analytico-numérique des transformateurs de puissance», Mémoire de magister, département d'électrotechnique, Université de Tizi Ouzou. desembre 2011.
- [9] : Anthony Lefevre «Contribution a la Modélisation Electrique Electromagnétique et Thermique des Transformateurs ». L'université de Nantes France 2006.
- [10] : Pauwels international service « formation générale sur les transformateurs de puissance GRTE» octobre 2008.
- [11] : A.Demane et A.Alili, «Amélioration de la protection d'un transformateur de puissance», Mémoire de master académique, département d'électrotechnique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila.

## Référence bibliographique

---

- [12] : N.Mufidzada et T. Otmane-chrif , «Etude de l’Influence du Noyau sur les Surtensions Impulsionnelles dans les Enroulements du Transformateur», page1-23, 2009.
- [13] : Souhila Abdoun, «Etude de l’Influence du Noyau sur les Surtensions Impulsionnelles dans les Enroulements du Transformateur», Mémoire de magister, département d’électrotechnique, Université de Tizi Ouzou.
- [14] : Samuel Eke, « Stratégie d’évaluation de l’état des transformateurs : esquisse de solutions pour la gestion intégrée des transformateurs vieillissants ». Université de Lyon, 2018.
- [15] : Jean Sanchez, «Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance», Université de Grenoble, 2011.
- [16] : Les enroulements, (<http://www.tsv-transfo.com/fr/decouvrir-le-transformateur/les-enroulements/>).
- [17] : Saliha Boudraa, « Analyse des gaz dissous les huiles des transformateurs en utilisant les techniques de l’intelligence artificielle », Mémoire de magister, département d’électrotechnique, université de Batna,2005.
- [18] : Amidou B, « Impacts de la qualité du système d’isolation sur la condition et l’efficacité des transformateurs de puissance». Thèse, Université du Québec à Chicoutimi, 2015.
- [19] : Mohamed BELMILOUD « Appel d’offre sur les travaux d’analyses physico-chimiques des fluides diélectriques contenus dans les transformateurs de puissance». Guide de maintenance du transformateur et équipements associés, année 13/03/2013.
- [20] : Bousselham Ben lafkih, « le refroidissement des transformateurs et l’étude des harmoniques » Département maintenance industrielle, Université Mohamed Ben Abdellah, Ecole supérieure de technologie fés.

## Référence bibliographique

---

- [21] : Abdelkebir Amir et Saadi Nassim «Application de la Logique Floue pour le diagnostic des Transformateurs de puissance par Analyse des gaz dissous » mémoire de Master, département de génie Electrique, Université M'hamed bougara de Boumerdes.
- [22]: B.Gustavsen, A. Semlyen. « Application of vector fitting to state equation representation of transformers for simulation of electromagnetic transients ». IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998.
- [23] : OMICRON electronics « FRAnalyzer Manuel d'utilisation »Référence -VESD0662  
Version du manuel : FRA.FR.1, 2006.
- [24] : OMICRON electronics «Tests de diagnostic et surveillance des transformateurs de puissance».
- [25] : Metalbi Fethi et Bouhallab Hadj, «Diagnostic et localisation des défauts dans les enroulements du transformateur». Mémoire de master, département d'électrotechnique, université de Saad Dahlab de BLIDA.
- [26] : T.Noda, H. Nakamoto et S.Yokoyama, «Accurate Modeling of Core-Type Distribution Transformers for Electromagnetic Transient Studies», IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, October 2002.
- [27] : Mohamed ZELLAGUI.« protection transformateur de puissance», Groupe sonelgaz, institut de formation de l'électrisé et de gaz (IFEG), centre de formation Ain M'lila.
- [28] : SAHNOUNE CHAUCHE Moustafa «Application des méthodes intelligentes pour le contrôle non destructif des enroulements du transformateur», Thèse de Doctorat, Département Génie électrique, Université Dr. Yahia Farès de Médéa.
- [29]: <https://www.omicronenergy.com/fr/produits/franeo-800/>. « La nouvelle génération de diagnostic fiable du circuit magnétique et des enroulements des transformateurs». novembre,2019

## Référence bibliographique

---

[30] : Didier Nilly. « Le diagnostic d'état des transformateurs de puissance». Electromagnétisme. 2017. ffdumas-01871106f.

[31] : ABDALLAH Chanane. «Diagnostic des défauts dans les enroulements de transformateur».Thèse de Doctorat, département génie électrique, Université Yahia Fares de MEDEA.

[32] : Hamza Houassine. « Etude des surtensions dans les blocs alternateur-transformateurs des centrales électriques », Thèse de Doctorat, Département Génie électrique, Université de TiziOuzou 2010.

[33] : Kratbi SeyfEddine et Hamadi Zakaria. «Analyse des défaillances dans les enroulements d'un transformateur triphasé, basée sur l'analyse de l'impedance du transformateur », Université Yahia Fares de MEDEA.

[34] : MEZARI Naouel, « Diagnostic des transformateurs de puissances », Mémoire de magister, département d'électrotechnique, Université de Tizi Ouzou. Juillet 2011.

## ملخص

تطرقنا في بحثنا هذا الى دراسة تشخيصية لوشبعة محول الطاقة الكهربائي المتكونة من 6 اقراص كل قرص يحتوي على 30 لفة عند الانتهاء من انجاز الوشبعة والتأكد من صحة ادائها بدأنا بدراسة تشخيصية لجملة الاعطاب الميكانيكية المتوقعة حيث قمنا بسحب القرص (الأول ثم الثاني) عن البقية. وباستعمال تقنية تحليل استجابة الترددات ثم قمنا بدراسة ومقارنة وتحليل النتائج بعد ذلك، حيث حصلنا على قاعدة بيانات يمكن استعمالها فيما بعد في تحديد موقع العطل والكشف عنه.

**كلمات مفتاحية:** الاعطاب الميكانيكية، وشبعة محول الطاقة ، تحليل استجابة الترددات، تشخيص.

## Abstract

In our research, we achieved a diagnostic test to a winding of electric power transformer, this last is composed of 06 disks and each disk contains 30 copper oils after we had insured that it works well, we started our diagnostic assessment to find out set of predicted mechanic faults where we pulled the copper disk (the first then the second) from the rest. Through using frequency response analysis (FRA), then we analyzed and compared the results of our study, then we got data base which can be used after that in the determinations of faults sit and discovering it.

**Keywords:** winding of power transformer, FRA, diagnostic, mechanic faults.

## Résumé

Dans notre travail, nous avons fait une étude de diagnostic de l'enroulement du transformateur de puissance, composé de 6 disques, chaque disque contient 30 spires. Au moment d'achèvement de la bobine et pour vérifier l'exactitude de ses performances, nous avons lancé une étude de diagnostique de la défaillance mécanique qui peuvent atteindre notre transformateur où nous avons tiré le disque (le premier puis le deuxième) du reste à l'aide de la méthode d'analyse de la réponse en fréquence (FRA), puis en comparant les résultats de ces analyses avec l'état sain des enroulements avant d'introduire les contraintes mécaniques, nous avons obtenu une base de données qui pourrait ensuite être utilisée pour localiser et détecter le défaut.

**Mots clés :** l'enroulement d'un transformateur, FRA, diagnostic, défaillance mécanique.