

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de master en électronique

Option : Instrumentation

Sous le thème :

Méthodes de diagnostics des équipements électriques

Présenté par :

ICHALLAL Abdelghani

HADDAD Hanane

Devant le jury :

Dr. Sabi Mohamed	Président
Dr. Bouzidi Athmane	Encadreur
Dr. Imaouchene Yacine	Co-encadreur
Pr. Mokrani Karim	Examineur

Année universitaire : 2017/2018

Remerciement

Nous remercions particulièrement notre promoteur Mr Athmane BOUZIDI, pour son dévouement exceptionnel, sa précieuse directive et son suivi constant.

Nos sincères et chaleureux remerciements à Mr Yacine IMAOUCHEN, pour son aide, son appui moral, et ses qualités humaines.

Nous tenons également à remercier le président et les membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail.

Que tous les professeurs et amis ayant contribué à notre formation trouvent ici notre profonde reconnaissance.

Dédicaces

Je dédis ce modeste travail à tous ceux qui me sont chères :

- A mes parents

- A mon frère Hocine, et mes deux sœurs

- A mes amis et camarades: Krimou, Amar, Abdenour, Yanis, Hmimi, Kouceil, Robert et tout ceux qui m'ont aidé de prêt ou de loin

A/Ghani

Dédicaces

Je dédis ce modeste travail à tous ceux qui me sont chères :

- A mes parents

- A mon frère Abdenour, et ma sœur Thiziri

- A ma chère copine Lilia
- et tout ceux qui m'ont aidé de prêt ou de loin

Hanane

Sommaire

Liste de figure

Liste de tableau

Introduction générale :	1
Chapitre I : Etat de l'art du diagnostique des équipements électriques	3
I.1. Introduction :	3
I.2. Le contrôle non destructif:	3
I.2.1. Principe du CND :	3
I.2.2 Procédure du CND et schéma synoptique du CND et ses objectifs:	3
I.2.3. Techniques du CND :	5
I.2.3.1. Examen visuel :	5
I.2.3.2. Magnétoscopie (flux de fuite magnétique) :	5
I.2.3.3. Contrôle par ultrasons :	6
I.2.3.4. Thermographie infrarouge :	7
I.2.3.5. Contrôle par radiographie :	8
I.2.3.6. Emission acoustique :	8
I.2.3.7. Courant de Foucault :	9
I.2.3.8 Analyse vibratoire :	10
I.2.3.9. Analyse des courant statoriques :	11
I.6. Comparaison des méthodes du contrôle non destructif :	14
I.7. Conclusion :	15
Chapitre II : défauts et types d'anomalies	16
II.1. Introduction :	16
II.2. Défauts des machines électriques tournantes :	16
II.2.1. Défaillance au rotor :	16
II.2.1.1. Ruptures de barres :	17
II.2.1.2. Ruptures d'anneaux:	17
II.2.1.3. Excentricité statique et dynamique :	17
II.2.2. Défaillance au stator :	18

II.2.2.1. Default d'isolant dans un enroulement :	18
II.2.2.2. Court-circuit entre spires :	19
II.2.2.3. Court-circuit entre phases:	19
II.2.2.4. Court circuit phase/bâti :	20
II.2.2.5. Défaut de circuit magnétique :	20
II.2.3. Défaillance mécanique :	20
II.2.3.1. Défauts des roulements :	20
II.2.3.2. Autres défaillances mécaniques :	21
II.2.4. Défaillances d'autres origines:	21
II.2.4.1. Défauts de la charge :	21
II.3. Différents causes de défauts et leurs conséquences :	22
II.3.1. Les défauts d'origine interne :	22
II.3.2. Les défauts externes:	22
II.3.2.1. Surtension :	22
II.3.2.2. Phases déséquilibrées :	23
II.3.2.3. Démarrage trop long et/ou trop fréquent :	23
II.3.2.4. Blocage du rotor :	23
II.3.2.5. Surcharge :	23
II.4. Défaut de matériaux :	23
II.4.1. Défaut surfacique :	24
II.5. Conclusion :	24
Chapitre III : Choix des méthodes	25
III.1. Introduction :	25
III.2. CND par courant de Foucault :	25
III.2.1. Principe :	25
III.2.2. Phénomène d'induction dans l'air :	26
III.2.3. Phénomène d'induction en présence d'un conducteur métallique :	26
III.2.4. Profondeur de pénétration du courant de Foucault :	27
III.2.5. Distance capteur/cible (lift-off) :	27

III.2.6. Capteur :	27
III.2.6.1. Le type :	28
III.2.6.2. Fonction de capteur :	28
III.2.6.3. Le mode de contrôle :	29
III.2.6.4. Techniques d'excitations :	30
III.2.7. Plan impédance :	31
III.2.8. Paramètre influant sur le contrôle par courant de Foucault :	32
III.2.8.1. Paramètres liés aux matériaux à sonder :	32
III.2.8.2. Paramètres liés au montage :	32
III.2.8.3. Paramètres électriques :	32
III.3. Analyse vibratoire :	32
III.3.1. Définition d'une vibration :	32
III.3.2. Type de signaux vibratoires :	33
III.3.2.1. Vibration harmonique :	33
III.3.2.2. Vibrations périodiques :	34
III.3.2.3. Vibrations apériodiques :	34
III.3.3. Principales activités de l'analyse vibratoire :	35
III.3.3.1. La surveillance :	35
III.3.3.2. Le diagnostique :	35
III.3.4. Chaîne de mesure par analyse vibratoire :	36
III.3.4.1. Les capteurs de vibrations :	36
III.3.4.2. Analyse du signal :	39
III.4. Conclusion :	43
Chapitre IV : Application des méthodes et résultat	44
IV.1. Introduction :	44
IV.2. Application de la méthode vibratoire :	44
IV.2.1. Description de la machine asynchrone étudiée :	44
IV.2.2 Application de l'analyse vibratoire sur une machine asynchrone :	45
IV.2.3. Résultats et interprétations :	45
IV.2.3.1 Mesure vibratoire dans le cas sain :	45

IV.2.3.2. Mesure lors d'un défaut au stator :	46
IV.2.3.3. Mesure lors d'un défaut au rotor :	46
IV.2.3.4. Mesure lors d'un défaut de roulement :	47
IV.3. Application de la méthode du CND par courant de Foucault :	49
IV.3.1 Description du dispositif et matériaux contrôlés :	49
IV.3.1.1. Source d'alimentation et acquisition de données :	49
IV.3.1.2. Capteur réalisé :	49
IV.3.1.3. Matériaux contrôlés :	49
IV.3.2. Résultats et interprétations :	50
IV.4. Conclusion :	51
Conclusion générale :	52
Bibliographie :	53

Liste de Figure :

Figure I.1 : schéma synoptique du CND	4
Figure I.2 : Visualisation du défaut lors du contrôle par magnétoscopie	6
Figure I.3 : Principe de la thermographie infrarouge	7
Figure I.4 : Inspection par courant de Foucault	10
Figure I.6 : Schéma bloc de la chaîne de traitement d'acquisition de signal	13
Figure II.1 : Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : Rupture de barre	17
Figure II.2 : Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : Rupture d'anneau	17
Figure II.3 : Types d'excentricités: (a) : statique ; (b) : dynamique ; (c) : mixte	18
Figure II.4 : Exemple de surtension	23
Figure III.1: Principe de fonctionnement du contrôle par courant de Foucault	25
Figure III.2 : Phénomène d'induction dans l'air	26
Figure III.3: Capteur à double fonction	28
Figure III.4: Capteur à fonction séparé	29
Figure III.5: Sonde absolu	29
Figure III.6: sonde différentielle	30
Figure III.7: Bobine parcourue par un courant I générant un flux magnétique ϕ	31
Figure III.8: Effet du défaut sur la valeur de l'impédance de la bobine	32
Figure III.9 : Naissance d'une vibration	33

<i>Figure III.10 : Signaux vibratoires harmoniques</i>	34
<i>Figure III.11: Signaux vibratoire périodique</i>	34
<i>Figure III.12 : Signaux vibratoires apériodiques</i>	35
<i>Figure III.13 : Principales activités de l'analyse vibratoire</i>	35
<i>Figure III.14 : chaîne d'acquisition</i>	36
<i>Figure III.15 : Prosimètre monté sur un palier d'une machine tournante</i>	37
<i>Figure III.16 : Une vélocimétrie</i>	38
<i>Figure III.17 : un accéléromètre</i>	38
<i>Figure IV.1 : Machine asynchrone utilisée</i>	44
<i>Figure IV.2: Signal sain récupéré sur la machine en marche (moteur) : (a) : Signal temporel, (b) : Analyse fréquentielle</i>	45
<i>Figure IV.3 : Signal récupéré sur la machine avec court circuit au stator :(a) : Signal temporel, (b) : Analyse spectral</i>	46
<i>Figure IV.4: Signal récupéré sur la machine avec barre rotorique cassée : (a) : Signal temporel, (b) : Analyse spectral</i>	47
<i>Figure IV.5 : signal récupéré sur la machine asynchrone avec défaut de roulement : (A) : signal temporel, (B) : analyse spectrale, (C) : spectre d'enveloppe</i>	48
<i>Figure IV.6 : Analyseur d'impédance Agilent 4294A, capteur courant de Foucault et structure testée</i>	49

Liste de tableau :

<i>Tableau I.1: Principale anomalie d'une machine asynchrone</i>	13
<i>Tableau I.2 : Les procédés du contrôle non destructif : Caractéristiques</i>	15
<i>Tableau II.1 : défauts des machines électriques selon leurs origines</i>	16
<i>Tableau III.1 : Reconnaissance des principales anomalies</i>	42
<i>Tableau IV.1 : Paramètre de la machine utilisée</i>	45
<i>Tableau IV.2 : Mesure à vide, sans défaut et avec défaut sur la pièce de cuivre</i>	50
<i>Tableau IV.3 : Calcule des paramètres de variation d'impédance (ΔZ, ΔR, ΔX, φ)</i>	50

Introduction générale :

L'évolution des appareils industriels électriques et productifs ainsi que l'augmentation du taux de fabrication avec des machines de plus en plus complexes et automatisées alliées à l'arrivée massive des cartes électroniques sur des équipements a conduit à une nouvelle perception des enjeux rattachés à la fonction maintenance.

Afin d'obtenir une sécurité opérationnelle, une optimisation des coûts de maintenance et la disponibilité des équipements qui ont un impact direct sur la compétitivité des unités de productions ainsi que la conformité des produits, une pré-maintenance ou un diagnostic s'annonce nécessaire et indispensable.

La détection de défaut et les aspects du diagnostic sont une partie intégrante et requièrent la mise au point de techniques de mesures, d'acquisitions, d'analyses et d'aides à la décision.

Le succès de ces techniques passe nécessairement par une bonne connaissance des équipements ainsi que leurs comportements en présence d'un défaut. La détection des défauts au sein d'un produit est une thématique ancienne. Des techniques de contrôle non destructif telles que l'analyse des vibratoire, l'analyse par ultrason et par courant de Foucault ont fait leur preuve au sein de laboratoires de recherche pour trouver leur place dans des milieux industriels.

Les techniques utilisées sont diverses, chacune dépend du phénomène physique mit en jeu et de l'objectif visé. Actuellement, le contrôle non destructif a atteint une maturité industrielle grâce à l'évolution et à la perfection des logiciels de simulation numérique. D'autres part, cette évolution est encouragée par les différents secteurs qui se sont trouvés devant la nécessité de se doter des techniques les plus sophistiqués pour se renseigner sur l'état de santé du produit ou de l'équipement.

Notre travail est présenté sur quatre chapitres, le premier est consacré à la présentation de divers méthodes de diagnostic (état de l'art des méthodes du diagnostic) qui consiste aux généralités sur le contrôle non destructif : examen visuel, ressuage, thermographie infrarouge, courant de Foucault, analyse vibratoire et l'analyse des courants statoriques, etc, leurs avantages et inconvénients.

Dans le deuxième, nous exposons les multiples défauts et défaillances régissant les machines tournantes et leur type ainsi que les causes de ces défaillances.

Le troisième chapitre est consacré à deux méthodes (contrôle non destructif par courant de Foucault et l'analyse vibratoire), leurs principes de fonctionnement, les capteurs utilisés pour chacune des deux méthodes sont détaillés.

Enfin dans le quatrième chapitre, est réservé à la partie pratique. Nous commençons par la méthode d'analyse vibratoire et la description du matériels utilisés ainsi que les résultats de l'application de cette méthode aux machines électriques, suivi de l'interprétation des résultats obtenus pour le cas sain de la machine et lors de la présence de défaut de court circuit de spire, cassure de barre rotorique et défaut de roulement. Pour ensuite passer au contrôle par courant de Foucault utiliser pour la caractérisation de matériaux conducteurs. Le matériel utilisé et l'interprétation des résultats obtenus avec différents capteurs pour une variation de conductivité et du diamètre du défaut sont détaillés. Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I : Etat de l'art du diagnostic des équipements électriques

I.1. Introduction :

Dans plusieurs secteurs industriels (aéronautique, nucléaire), il existe un besoin croissant pour le contrôle d'intégrité des équipements et produits soumis à de fortes contraintes mécaniques, thermiques, électriques.

Une grande variété de méthodes existent et permettent de détecter ces défauts, dans ce premier chapitre nous allons aborder d'une manière générale ces méthodes de diagnostics, commençant par le contrôle non destructif et ses multiples méthodes, tout en présentant leurs avantages et leurs inconvénients.

I.2. Le contrôle non destructif:

I.2.1. Principe du CND :

Le control non destructif est un ensemble de techniques et procédés capables de fournir des informations sur l'état de santé et la conformité d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations nuisibles (endommagement) à la réutilisation des pièces ou des structures inspectées. Ces techniques servent à la mise en évidence de toutes les défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et/ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destin, [1].

Quelle que soit la technique d'inspection employée, on en distingue les étapes suivantes pour l'inspection:

- Mise en œuvre d'un processus physique énergétique.
- Modulation ou altération de ce processus par défauts.
- Détection de ces modifications par un capteur approprié.
- Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée.

I.2.2 Procédure du CND et schéma synoptique du CND et ses objectifs:

Lors d'une opération de contrôle non destructif d'un objet, le choix du procédé, de la méthode et du matériel n'est pas limité à la détection de défaut mais à une certaine procédure envisageable déterminant les objectifs tel que : la fiabilité de l'examen, reproductibilité, localisation des défauts, Identification, Caractérisation de ceux-ci, en particulier par leur taille, classement, présentation visuel, décision concernant l'affectation de l'objet , enfin archivage des résultats et des conditions d'examen. La figure I.1 représente le schéma synoptique du CND.

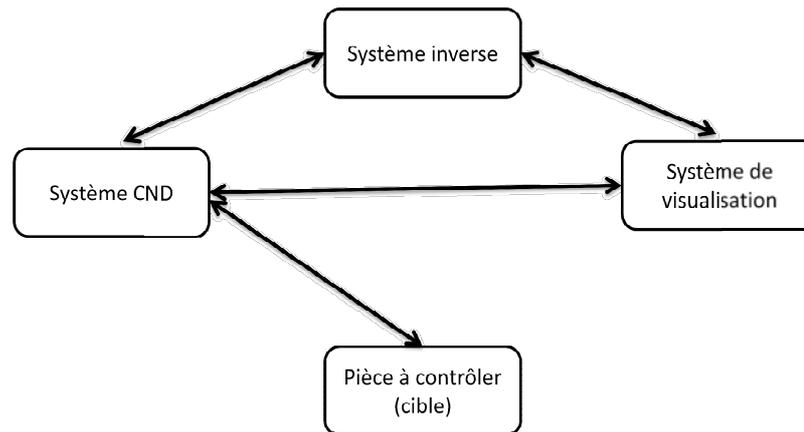


Figure I.1 : schéma synoptique du CND

Le contrôle non destructif a pour objectif, comme son nom l'indique, de contrôler l'état des pièces industrielles sans pour autant que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Deux types de contrôle peuvent correspondre à cela :

- L'estimation d'un paramètre constitutif de la pièce comme par exemple, la distance à un objet, les propriétés électromagnétiques constitutives du matériau.
- Il s'agit en général de défauts, qui peuvent être par exemple des fissures, des inclusions, des porosités, des effets de la corrosion ou de la fatigue mécanique.

Cette procédure de contrôle se produit souvent plusieurs fois au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères suivant, [2] :

a) La rapidité d'exécution :

Il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant à la fois en termes d'immobilisation physique de chaque pièce, mais aussi au niveau du coût que sont le temps de travail de la main-d'œuvre ou les frais de fonctionnement de l'usine.

b) Le coût :

Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable et qui doit être minimisé dans la mesure du possible.

c) La reproductibilité :

La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.

d) La fiabilité :

Le contrôle doit remplir son cahier de charge, et par exemple détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter, indépendamment des conditions d'inspection.

e) la sensibilité :

La sensibilité est le rapport des variations de la mesure et du mesurande. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations du mesurande sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.

f) La résolution :

La résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détecté, par exemple la dimension du plus petit défaut. Usuellement est défini le pouvoir de résolution, ici la dimension du plus petit défaut visible. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite.

I.2.3. Techniques du CND :

La diversité des pièces à inspecter, de leurs géométries, de leurs matériaux et des conditions d'inspection, interdit à une méthode de CND d'être universelle. Un certain nombre de techniques existent et chacune présentent certains avantages et inconvénients. Il n'est pas question d'établir une liste exhaustive des techniques utilisées dans le domaine du CND, mais de donner un aperçu global des techniques les plus répandues industriellement.

I.2.3.1. Examen visuel :

Le contrôle visuel est la plus ancienne procédure de contrôle, la plus simple et la plus générale. Elle nécessite un bon éclairage localisé sur les régions suspectes. Les résultats de cet examen dépendent éventuellement des compétences de l'opérateur, du bon nettoyage de l'objet à inspecter, d'une illumination adéquate de la zone d'inspection et de la qualité de l'instrument optique. Ces facteurs sont encore importants aujourd'hui mais le matériels est devenu beaucoup plus sophistiqués ce qui rend cette méthode peu utilisé de nos jours pour vérifier des résultats de test, ni de prendre place d'autre méthode du CND, [3].

✓ Avantages :

- Examen simple, rapide et moins couteux,
- Souplesse d'inspection.

✓ Inconvénients :

- Détection limitée aux défauts superficiels,
- La surface doit être propre,

I.2.3.2. Magnétoscopie (flux de fuite magnétique) :

La méthode repose sur le comportement des matériaux ferromagnétiques lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique, en pratique cela est fait à l'aide de deux méthodes consistantes à la magnétisation par courant d'injection et par électro-aimant mobile (la pièce est aimantée localement ou totalement à une valeur proche de la saturation magnétique).en

l'absence de défaut, les fuites dans l'air sont insignifiantes (la perméabilité du matériau étant beaucoup plus grande que celle de l'air), [3, 4].

La présence d'un défaut provoque une déviation des lignes de champ, celles ci proches de la surface ne trouvent plus assez de place pour circuler à l'intérieur du matériau. Elles vont alors choisir le chemin le plus simple en sortant de la pièce. Ce phénomène crée un champ magnétique appelé "champ de fuite". Il est possible de visualiser ce champ de fuite à l'aide d'un produit révélateur constitué de très fines particules d'oxyde de fer déposées à la surface de la pièce qui s'accumulent à l'endroit du défaut et cela est visualisable grâce à un éclairage adapté, voire figure I.2,[4].



Figure I.2 : Visualisation du défaut lors du contrôle par magnétoscopie

✓ Avantages :

- Simple, peu coûteux et rapide,
- Détection des défauts débouchant et sous-jacents,
- Efficace pour les défauts de surface de très petites dimensions.

✓ Inconvénients :

- Applicable seulement aux matériaux ferromagnétiques,
- Aimantation dépend de la perméabilité de la pièce examinée,
- La sensibilité de détection des défauts dépend en effet de la nature, de la direction et de l'intensité de la magnétisation de la pièce,
- Donne difficilement de bons résultats pour les défauts enfouis.

I.2.3.3. Contrôle par ultrasons :

Les ultrasons sont des ondes acoustiques ou élastiques dont la fréquence est supérieure à celle des sons audibles par l'oreille humaine et inférieure aux vibrations thermiques des atomes.

Le contrôle par ultrasons est un procédé de recherche du manque de matière dans un matériau. Il permet de localiser et de dimensionner les discontinuités (défauts) à l'aide d'ondes acoustiques. Le contrôle US consiste à observer les échos produits par un manque de matière lors de la propagation d'une vibration de très haute fréquence et de très courte durée dans le matériau, [4].

Chapitre I : Etat de l'art du diagnostic des équipements électriques

Un capteur appelé traducteur qui comporte un élément piézoélectrique apte à transformer un signal électrique en vibration mécanique et inversement est utilisé. Deux méthodes sont possibles :

- ❖ Méthode par transmission

- ❖ Méthode par réflexion

- ✓ Avantages :

- rapidité,
- Les résultats sont immédiats,
- Utilisable sur la plus part des matériaux,
- Ne nécessite pas d'avoir accès aux deux cotés de la pièce.

- ✓ Inconvénients :

- Exigence d'un produit de couplage,
- Difficulté de déceler les défauts parallèles aux ondes ultrasonore,
- l'opérateur doit suivre une formation pour interpréter l'affichage de manière précise,
- le matériel doit être étalonné de façon régulière pour chaque type de matériau.

I.2.3.4. Thermographie infrarouge :

La norme AFNOR définit la thermographie infrarouge comme une « technique permettant d'obtenir au moyen d'un appareillage approprié l'image thermique d'une scène thermique observée dans un domaine spectral de l'infrarouge » [5].

La thermographie infrarouge est utilisée dans de nombreux domaines (carte électronique, transformateur, batterie, cellule blindée (H.VIR...)), ça permet une acquisition et l'analyse de l'information par des instruments d'imageries thermiques sans contact direct avec le matériau ou installation, voire figure I.3, [4].

La détection de défaut avec la thermographie infrarouge se base sur deux types de thermographies :

- ❖ Thermographie active.

- ❖ Thermographie passive.

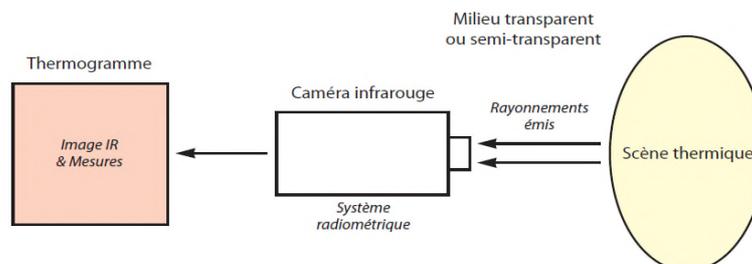


Figure I.3 : Principe de la thermographie infrarouge

- ✓ Avantages :

- Méthodes relativement rapide et sans contact,
- Les cavités sont bien détectées,
- Toute l'épaisseur de la pièce est contrôlée,
- Les résultats sont archivés à l'aide de la camera infrarouge.

✓ Inconvénients :

- Difficultés de mesure liées aux effets perturbateurs,
- Des difficultés de localisation de la profondeur des défauts, du fait que l'image obtenue donne une projection de ces derniers sur le plan de la pièce testée,
- difficultés d'identifier la nature des défauts.

I.2.3.5. Contrôle par radiographie :

La radiographie est l'une des plus vieilles méthodes du contrôle non destructif elle est basée sur l'enregistrement des rayons X après passage à travers l'objet analysé. La technique est similaire à celle utilisée dans le domaine médical, mais avec une camera plutôt qu'un film, ce qui donne plus de liberté mais nécessite une source de plus grande intensité.

C'est généralement la technique retenue lorsqu'il s'agit de mettre en évidence et de dimensionner des hétérogénéités nocives à l'intérieur des objets de toutes natures, aussi bien au stade de la fabrication qu'à celui de contrôle de maintenance. Cette technique est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurités pour l'opérateur et l'environnement, [6, 4].

✓ Avantages :

- Contrôle d'objet de forme compliquée,
- Facile à transporter,
- Apprécier la nature et la taille des défauts.

✓ Inconvénients :

- L'interprétation des images demande un niveau d'expertise de l'opérateur,
- extrêmement coûteuse et cout d'utilisation élevé.

I.2.3.6. Emission acoustique :

L'émission acoustique est un phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau soumis à une sollicitation. Autrement dit, l'émission acoustique est analogue à l'activité sismique enregistrée sur la terre, La détection et l'analyse des signaux acoustiques permettent d'obtenir des informations sur la présence de défaut, [6,4].

✓ Avantages :

- détection et localisation des défauts évolutifs,

Chapitre I : Etat de l'art du diagnostic des équipements électriques

- Analyse en temps réel (prévention de rupture),
- Examen volumique globale (100%) et rapide de la structure, quelle que soit sa taille, en un seul essai de mise sous contrainte, de plus, la détection des défauts est indépendante de leur position et de leur orientation,
- Diagnostique de la sévérité de l'endommagement,
- Examen en service évitant des arrêts coûteux,
- Application possible sur les structures calorifugées, ignifugées, enterrées, sous talus... sans dépose ni terrassement.

✓ Inconvénients :

- Effet Kayser,
- Limitée aux défauts évolutifs,
- Pas de référentiel,
- Pratiques diverses (liées au prestataire),
- Interprétation des résultats,
- Sensible aux interférences mécaniques et électriques,
- Pas de détermination de la taille ni de la géométrie des défauts,
- A compléter éventuellement par des CND.

I.2.3.7. Courant de Foucault :

Le contrôle par courant de Foucault est une méthode assez vieille et très utilisée dans l'inspection. Tout corps conducteur placé dans un champ magnétique variable dans le temps ou dans l'espace donne naissance à des courants induits à l'intérieur du corps en circuit fermé. L'excitation d'une bobine amenée à proximité d'une cible conductrice par un courant variable génère des courants induits donnant naissance à un flux magnétique opposé au flux générateur ce qui modifie l'impédance de la bobine, l'analyse de cette variation d'impédance fournira les indications exploitables pour le contrôle. Les courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et géométriques de la cible ainsi que des conditions d'excitations (paramètre électrique et géométrique de la bobine).

Un défaut sur pièce constitue donc une discontinuité électrique, perturbatrice de la circulation des courants de Foucault, engendrant ainsi une variation d'impédance décelable au niveau de la bobine d'excitation [7], la figure I.4 présente le procédé du contrôle par courant de Foucault.

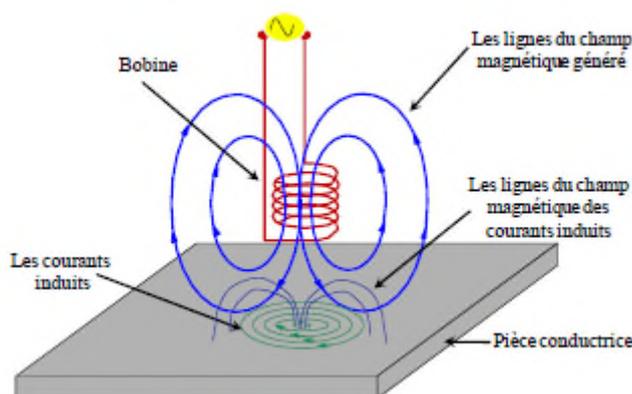


Figure I.4 : Inspection par courant de Foucault

✓ Avantages :

- Simple, peu coûteux et rapide,
- Grande sensibilité de détection de défauts (dimensionnelle, structurales.....),
- Evaluer le dimensionnement et la profondeur d'un défaut,
- Pas de conditions de sécurité ni pour l'opérateur ni pour l'environnement,
- Inspection sans contact.
- Efficacité de la technique malgré la complexité des phénomènes électromagnétiques mis en œuvre,
- Automatisation possible pour des pièces de géométrie constante (tubes, barres, rubans, et câbles).

✓ Inconvénients :

- La profondeur d'inspection dépend de la fréquence d'excitation,
- La détection du défaut se fait d'une manière locale,
- Inspection limitée aux matériaux électriquement conducteurs,
- la position du capteur par rapport au spécimen peut influencer l'efficacité de détection des défauts,
- La compétence et la formation sont exigées pour le personnel d'inspection.

I.2.3.8 Analyse vibratoire :

L'analyse des vibrations est une méthode très utilisée pour le diagnostic, elle permet une détection des défauts et leur analyse détaillée, elle donne presque une vue sur la quasi-totalité des défauts (mécanique, électrique...), le diagnostic par les vibrations consiste à l'utilisation de capteur spécifique (accéléromètre, vélocimétrie, sonde de déplacement) dans des lieux judicieux sur la machine à analyser et ces derniers nous transforment les vibrations émises par la machine en signal électrique. L'étude de ce signal permet de définir les défauts

régissant la machine. L'analyse temporelle et/ou fréquentielle permet une bonne étude du signal récupéré et nous informe sur le défaut d'une manière très précise,[8].

Comme toute méthode d'analyse, l'analyse vibratoire a des points forts et d'autres faibles, les voici :

✓ Avantages :

- Détection de défauts à un stade précoce,
- Autorise une surveillance continue,
- Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi,
- permet de surveiller l'équipement à distance (télémaintenance).

✓ Inconvénients :

- Difficulté d'interprétation du spectre,
- Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuse.

I.2.3.9. Analyse des courants statoriques :

Le moteur asynchrone devient l'élément clé dans l'industrie et est de plus en plus utilisé dans les différents secteurs. Malgré qu'il soit réputé pour être le plus robuste des machines électriques, un certain nombre de contraintes de nature très différentes peuvent restreindre sa durée de vie, en faisant apparaître des pannes.

Parmi toutes les méthodes de diagnostic utilisables, la méthode de l'analyse des courants statoriques s'est avéré être l'une des plus Intéressantes, car il est très facile d'accès et nous permet de détecter les défauts électriques et les défauts mécaniques. Cette technique est dénommée dans la littérature «Motor Current Signature Analysis»(MCSA).

La surveillance via le courant statorique nécessite une bonne connaissance des défauts et leurs signatures. Elle est utilisée pour le moment dans le contexte de machines alimentées par le réseau et pour la recherche de fréquences caractéristiques de défauts, [9], la Figure I.5 illustre cette méthode de diagnostic.

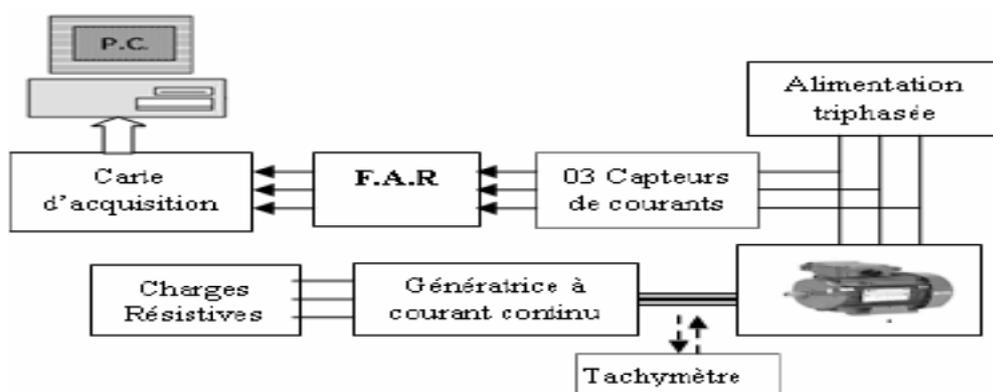


Figure I.5 : Technique de diagnostic par la méthode des courants statoriques

I.2.3.9.1. Caractéristique des signatures spectrales du courant statorique pour un entraînement sain :

Le spectre d'un courant statorique d'une machine asynchrone saine alimentée en tension et entraînant une charge est très riche en harmoniques. En effet, les fréquences présentes dans ce spectre sont principalement :

- la raie spectrale fondamentale relative à la fréquence d'alimentation,
- la fréquence moyenne d'engrènement des roues, définie par le produit de la fréquence mécanique d'une roue par son nombre de dents, [10].

I.2.3.9.2. Caractérisation des signatures spectrales des défauts :

L'analyse des signatures du courant statorique consiste à détecter les défauts par la détection de l'apparence de composantes fréquentielles révélatrices des défauts dans le spectre du courant statorique, [9]. Ils se traduisent soit par :

- Les raies spectrales qui apparaissent avec des fréquences qui sont directement liées à la vitesse de rotation de la machine, aux vitesses des champs tournants et aux paramètres physiques de la machine.
- Les raies spectrales ont une modification de leurs amplitudes, dans le spectre du courant.
- Le technicien de surveillance doit avoir une bonne connaissance des défauts et leurs signatures à partir du courant statorique.

I.2.3.9.3 Capteur de courant :

Les capteurs de courant sont des dispositifs électromagnétiques qui permettent de détecter la présence d'un éventuel courant électrique dans un conducteur. Si les capteurs détectent le passage d'un courant électrique, ceux-ci délivrent des signaux analogiques ou numériques que l'on peut utiliser ou traiter ultérieurement. Généralement, les capteurs de courant électrique mettent en application différents phénomènes physiques pour leur fonctionnement, dont les phénomènes électromagnétiques. Selon les cas, les capteurs de courant peuvent mesurer une intensité de courant allant jusqu'à plusieurs dizaines de milliers d'ampères avec une précision de plus de cinq pour cent, [11].

I.2.3.9.4. Le filtre anti-repliement :

Les capteurs des courants statoriques sont généralement placés dans un environnement pollué. En effet, les machines et les convertisseurs statiques rayonnent des champs électromagnétiques pouvant induire des interférences, créant ainsi un bruit additif à la mesure. Certaines fréquences de ce bruit, peuvent apparaître au niveau du spectre du courant lors de sa numérisation à cause d'un mauvais choix de la fréquence d'échantillonnage. Ce phénomène est appelé repliement spectral, [12], La Figure I.6 montre la chaîne d'acquisition des courants.

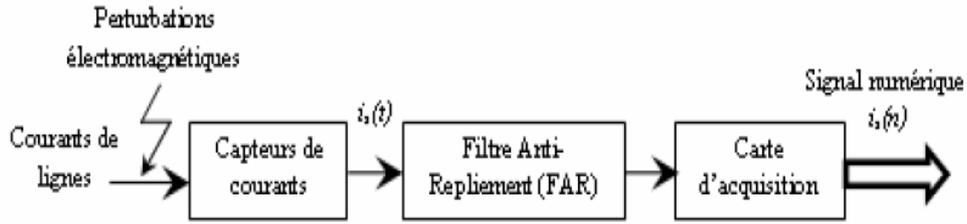


Figure I.6 : Schéma bloc de la chaîne de traitement d'acquisition de signal

I.2.3.9.5. Analyse spectrale

Il s'est avéré que la surveillance de l'amplitude des composantes de fréquence, présente dans le spectre fréquentiel du courant statorique, permet de détecter la présence d'un défaut au niveau de la machine asynchrone. Le tableau I.1 représente les principales anomalies d'une machine asynchrone.

Types de défauts	Spectre de référence	Spectre observé	Remarque
Défauts de roulement			Génération de raies spectrales de fréquence caractéristique $f_{ext(roult)} = f_s \pm kf_o$
Défauts excentricité			Fréquence caractéristique Du défaut $f_{ext} = (K(1-s) \pm 1) f_s$
Défauts statoriques			Fréquence caractéristique Du défaut $f_{cs} = f_s * (\frac{n}{p} (1-s)) \pm k$
Défauts rotoriques			Augmentation de l'amplitude des raies spectrales autour de la fréquence fondamentale

Tableau I.1: Principale anomalie d'une machine asynchrone

I.6. Comparaison des méthodes du contrôle non destructif :

Afin d'énumérer toutes les méthodes, Le tableau I.2 présente les types de procédés du CND ainsi que les méthodes de contrôle, le principe physique utilisé pour chaque méthode, les défauts détectés, le domaine d'application, le point fort et faible de chaque méthode.

Types de procédés	Méthodes de contrôle	Principes physiques	Types de défauts détectés	Domaines d'applications	Points forts	Points faibles
Optiques	Examen visuel direct ou assisté	Vision perturbation d'une réflexion	Défauts débouchant, fissure, criques, trou	Contrôle manuel de tous produits à surface accessible	Souplesse	Productivité, fiabilité
	Contrôle laser			Contrôle automatiques de bandes et tôles	Productivité	Taux élevé de fausses alarmes
	Contrôle TV	Formation d'une image	Défauts d'aspect, taches	Contrôle automatiques en fabrications des produits divers	Productivité	Défauts fins
	Interférométrie holographie	Détection de microdéformation thermique	Délaminations, décollements	Contrôle en ateliers de parois non métalliques	Contrôle des composites	Interprétation, productivité
	Thermographie infrarouge	Cartographie de perturbations thermiques	Délaminations hétérogénéité, diverses	Contrôle sur site	Cartographie	Caractérisation de défaut
Ressuage	Ressuage	Effet de capillarité	Défaut fins débouchant	Contrôles manuel de tous produits à surface accessible	Simplicité faible cout	Productivité peu quantitatif
Flux de fuite magnétique	Magnétoscopie	Accumulation de poudre	Défaut fins débouchant et sous-cutanés	Produits ferromagnétique (aciers)	Sensibilité	Réservé aux aciers Peu quantitatif
	Détection de flux de fuite	Distorsion d'un flux magnétique	Défauts fins débouchant		Sensibilité Automatisations	Fragilité des sondes
Electromagnétiques	Courants de Foucault	Perturbation d'un courant	Défauts fins débouchant	Contrôle en ligne sur chantier de tout produit métallique	Sensibilité Automatisations	Matériaux non conducteurs Interprétation
	Potentiel électrique	Perturbation d'un courant	Mesure de profondeur de défauts	Tout produit conducteur	Simplicité Faible cout	Contrôle manuel lent
	Hyperfréquence	Transmission ou réflexion radar	Hétérogénéité diverses	Matériaux peu conducteur	Contrôle sans contact	Interprétation du signal
Rayonnement ionisants	Radiographie X	Atténuation d'un flux	Défauts internes	Contrôle en atelier et sur	Cartographie Souplesse de	Protection Détection

Chapitre I : Etat de l'art du diagnostique des équipements électriques

	Radiographie			site de tout matériau	réglage	des défauts
				Contrôle en ligne	Forte épaisseurs	Profondeurs des défauts
	Radiographie en temps réel				Productivité	Résolution limitée
	Tomographie			Contrôle de structures non métalliques	Imagerie en coupe	Cout productivité
	Neutronographie					
		Diffusion Compton	Rétrodiffusion	Delaminations	Contrôle de composites	Complete la radiographie
Vibrations mécaniques	Ultrasons	Perturbation d'une onde échographique	Défauts internes Défauts débouchant	Contrôle manuel ou automatique de la majorité des matériaux	Grande sensibilité nombreuses méthodes d'auscultations	Condition d'essai Interprétation des echos.couplage
	Emission acoustiques	Emission provoquée par sollicitation mécanique	Criques fissures	Parois de gros récipients Structures diverses	Contrôle globale avec localisation des défauts	Interprétation bruits parasites
	Essais dynamique	Perturbation d'un amortissement Mesure de vitesse	Criques fissures	Contrôle de pièce moulée	Productivité	Qualitatif
Test d'étanchéité	Essais hydrostatique	Détection de bulle	Défauts débouchant dans joints ou parois zone perméable	Tube et enceintes en tout matériau	Grande étendue de flux de fuite selon la méthode	Contingences diverses selon la méthode
	Tests avec gaz traceurs (halogène, hélium)	Détection chimique				
	Détection sonore	Bruit acoustique				

Tableau I.2 : Les procédés du contrôle non destructif : Caractéristiques

I.7. Conclusion :

De nombreuses méthodes de diagnostique et de contrôle industriel sont disponibles aujourd'hui mais chacune d'elles présente des avantages et des inconvénients différents et ne donnent pas un diagnostic général des équipements et produits ce qui les rend complémentaire, cette première partie a pris part des généralités sur le contrôle non destructif et recense les méthodes du CND et leurs principes de fonctionnement d'une vue générale.

Chapitre II : défauts et types d'anomalies

II.1. Introduction :

En industrie tout instrument ou pièce ou machines utilisées sont victimes de fatigues et de dégradations ce qui rend la connaissance de ces défauts, des paramètres causant ces dégradations très importants à connaître afin d'en échapper à la perte et à la destruction du matériels et équipements. Dans ce deuxième chapitre nous allons donner un aperçu des différents défauts et anomalies régissant les machines électriques tournantes, leur classification et leur origine pour passer à une présentation des défauts sur matériaux.

II.2. Défauts des machines électriques tournantes :

Une défaillance d'une machine électrique représente tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou à long terme provoquer son endommagement. Le calendrier de maintenance, l'environnement de travail, la nature de la charge, l'installation, l'assemblage, la tolérance de fabrication et la conception sont les raisons de défaillances dans les machines tournantes.

Les défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories (Tableau II.1): interne et externe. Les défauts internes sont causés par les constituants de la machine (bobinage du stator et du rotor, circuit magnétique, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.). Les défauts externes sont provoqués par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine.

Défaillances des machines électriques	interne	Mécanique	Contacte entre le stator et le rotor
			Défauts de roulements
			Mouvement des enroulements et des tôles
		Electrique	Défaillance au niveau de l'isolation
			Rupture de barre
			Défaillance au niveau du circuit magnétique
	Externe	Mécanique	Charge oscillante
			Surcharge de la machine
			Défaut de montage
		Environnement al	Humidité
			Température
			Propreté
Electrique	Fluctuation de la tension		
	Sources de tensions déséquilibrées		
	Réseau bruité		

Tableau II.1 : défauts des machines électriques selon leurs origines

II.2.1. Défaillance au rotor :

Les défauts les plus localisés sur le rotor peuvent être définis comme suit :

II.2.1.1. Ruptures de barres :

C'est l'un des défauts les plus fréquents au rotor, il peut se situer soit au niveau de son encoche, soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine, ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées, [13], sur la figure II.1 est représentée une rupture de barre.

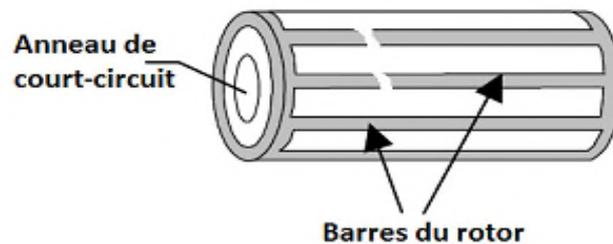


Figure II.1 : Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : Rupture de barre

II.2.1.2. Ruptures d'anneaux:

La rupture de portion d'anneau, voir Figure II.2 est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure, [13].

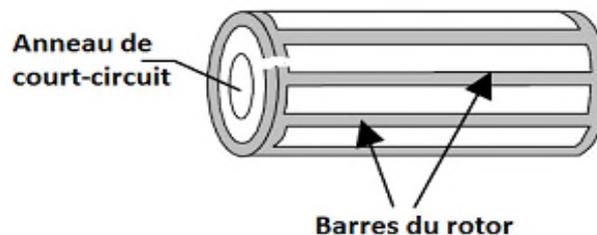


Figure II.2 : Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : Rupture d'anneau

II.2.1.3. Excentricité statique et dynamique :

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le

centre du rotor). Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (Usinage), [14].

Trois cas d'excentricité, voire Figure II.3, sont généralement distingués :

- l'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.

- l'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.

- l'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', associant les deux cas précédemment cités.

Ce défaut modifie le comportement magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibrations considérables dans les enroulements.

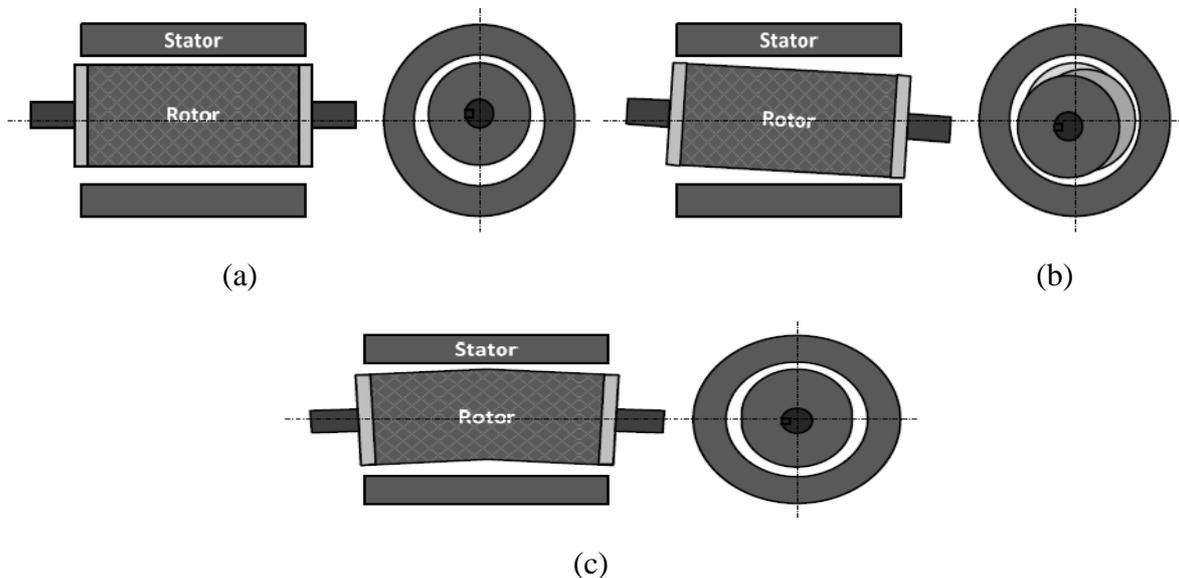


Figure II.3 : Types d'excentricités: (a) : statique ; (b) : dynamique ; (c) : mixte

II.2.2. Défaillance au stator :

II.2.2.1. Défaut d'isolant dans un enroulement :

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique.

De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné, [15]. Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- dégradation de l'isolant à la fabrication.
- tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- vibrations mécaniques.
- vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- fonctionnement dans un environnement sévère.

II.2.2.2. Court-circuit entre spires :

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelles au défaut.

II.2.2.3. Court-circuit entre phases:

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système. L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs. Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases.

II.2.2.4. Court circuit phase/bâti :

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels). En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas.

Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut, [15].

II.2.2.5. Défaut de circuit magnétique :

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc, [14, 15].

II.2.3. Défaillance mécanique :

II.2.3.1. Défauts des roulements :

Les roulements à billes jouent le rôle d'interface électromécanique entre le stator et le rotor. En outre, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor.

La plupart des défauts survenant dans les roulements des moteurs à induction ainsi que les raisons de leur vieillissement. Comme il a été présenté précédemment, ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est généralement lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, [13], ou de la bande de roulement. Ses causes possibles sont:

- l'usure due au vieillissement
- la température de fonctionnement élevée
- la perte de lubrification
- l'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement).
- le défaut de montage

Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont :

- des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
- l'ondulation de leur surface de roulement.
- l'attaque des billes.
- la corrosion due à l'eau.
- défaut de graissage, problème dû à la température.
- décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge.

Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur.

II.2.3.2. Autres défaillances mécaniques :

Au stator, il n'y a pas de pièces mobiles donc a priori pas de défaillances mécaniques. Cependant, il peut apparaître des phénomènes d'oxydation liés à l'environnement de la machine et plus précisément au taux de salinité qui influe sur l'étanchéité et les contacteurs, [15].

II.2.4. Défaillances d'autres origines:

II.2.4.1. Défauts de la charge :

Les travaux menés dans ce domaine ont surtout concerné l'influence de la dynamique de la charge sur la détection et le diagnostic d'autres défauts tels que la rupture d'une barre ou l'excentricité du rotor. Ces études ont montré que l'introduction de perturbations ou d'oscillations par la charge pouvait masquer l'apparition des défauts du moteur, [13].

Pour maîtriser l'étude des défauts de la charge, une connaissance parfaite de cet élément s'avère nécessaire. Pour ce faire, on peut procéder tout d'abord à une classification des différents types de charge les plus rencontrés:

- charge à couple constant : le couple n'est pas fonction de la vitesse (Ex : traction, convoyeur, tapis roulant,...),
- charge à couple variable : le couple varie en fonction de la vitesse (ex : pompe centrifuge, ventilateur,...),
- charge à puissance constante : tels que les broyeuses, les affûteuses, les bobineurs,...,

La charge peut donc être le siège de mauvaises conditions de fonctionnement qui aboutissent à l'apparition de défauts tels que:

- surcouples accidentels,

- à-coups de couple accidentels,
- perturbations mécaniques dues aux vibrations et phénomènes de résonance mécanique liés à la construction de la machine ou introduites par l'environnement extérieur,
- désalignement des différents arbres en jeu pour assurer l'accouplement et la rotation,
- manque de lubrifiants,
- vitesse critique de rotation,
- rupture de la charge.

Tous ces défauts de la charge vont naturellement avoir une influence dégradante sur les grandeurs mécaniques mises en jeu au niveau de l'entraînement, à savoir le couple électromagnétique et la vitesse de rotation. En outre, et selon la stratégie de commande adoptée pour le pilotage de l'entraînement, les grandeurs électriques vont être aussi plus ou moins affectées.

II.3. Différents causes de défauts et leurs conséquences :

Sur les installations électriques comportant des moteurs électriques, nous pouvons distinguer deux types de défauts, ceux d'origines internes et d'autres d'origine externes.

II.3.1. Les défauts d'origine interne :

- Court-circuit phase-terre,
- Court-circuit entre phases,
- Court-circuit entre spire,
- Sur-échauffement des bobinages,
- Rupture d'une barre dans les moteurs,
- etc.

II.3.2. Les défauts externes:

La localisation de ses sources est en dehors du moteur électrique, mais leurs conséquences peuvent entraîner des dégradations dans celui-ci.

II.3.2.1. Surtension :

Tout équipement sous tension dont la valeur crête de celle-ci sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension temporaire ou permanente. Pour la majeure partie des cas, les surtensions se traduisent par un claquage diélectrique au niveau des enroulements du moteur entraînant sa destruction. Les origines de ces surtensions sont, La figure II.4 présente une surtension temporaire :

- Atmosphérique (foudre),
- décharge électrostatique,

-Manœuvres d'appareils connectés au même réseau,

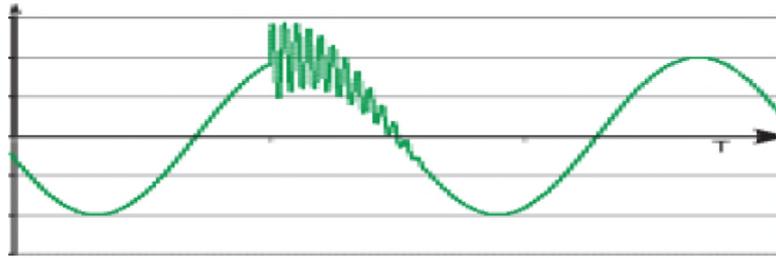


Figure II.4 : Exemple de surtension

II.3.2.2. Phases déséquilibrées :

Tout système triphasé est dit en déséquilibre lorsque les trois tensions délivrées ne sont pas égales en amplitudes et/ou ne sont pas déphasées de 120° les unes par rapport aux autres.

Ce déséquilibre peut être provoqué par l'ouverture d'une phase, par la présence de charges monophasées dans l'environnement proche du moteur, ou par la source elle-même. Pour un moteur le déséquilibre des tensions d'alimentations provoque une diminution du couple utile et l'augmentation des pertes.

II.3.2.3. Démarrage trop long et/ou trop fréquent :

La phase de démarrage d'un moteur correspond à la durée nécessaire pour atteindre sa vitesse nominale, chaque moteur ne peut supporter qu'un nombre limité de démarrages, généralement précisé par le concepteur, en plus de ça, il y a un temps de démarrage en fonction du courant de démarrage.

II.3.2.4. Blocage du rotor :

Pour une cause mécanique, le blocage du moteur se produit provoquant une surintensité égale au courant de démarrage. Il en résulte ainsi un échauffement important causé par les pertes dans le rotor qui sont maintenues à leur valeur maximale durant le blocage tout en supprimant la ventilation si elle dépend de la rotation du rotor. Les températures rotoriques peuvent devenir très importantes (350°C), [16].

II.3.2.5. Surcharge :

Une augmentation du couple résistant ou une baisse de la tension réseau ($>10\%$ de U_n) provoque la surcharge du moteur. L'augmentation du courant consommé par le moteur engendre un échauffement qui réduit sa durée de vie et peut être fatal à long terme, [16].

II.4. Défaut de matériaux :

Un défaut (défectuosité) détecté dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou

chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Cela dit, on classe les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface, les défauts internes.

II.4.1. Défaut surfacique :

Ces défauts sont accessibles à l'observateur directement, mais pas toujours visible à l'œil nue, à cet effet on peut les classer en deux types distincts :

➤ Défaut ponctuel :

La première catégorie correspond aux défauts ponctuels, se sont les plus nocifs sur le plans technologique, puisque il s'agit des criques, piqures, fissures, craquelures. Ces défauts sont généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigues. Dans les pièces métalliques l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (quelques micro mètre) et elles peuvent êtres nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixième de millimètres. Ce qui implique l'emploi pour leur détection des méthodes non destructifs sensibles, [3].

La seconde catégorie correspond aux défauts d'aspects, c'est-à-dire à des plages dans les quelles une variation de paramètre géométrique ou physique (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable.

➤ Défaut interne :

Sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur état est spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle. Dans les industries des métaux, il s'agit de criques internes, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées et soudées. Dans d'autre cas, il s'agit simplement de la présence d'un Corps étranger au sein d'une enceinte ou d'un produite emballé, [3].

II.5. Conclusion :

Tout prototype ou matériels électriques est sujet de dégradation et défaut, dans ce deuxième chapitre nous avons recensé la majorité des défauts régissant les machines tournantes, dont des défauts internes à la machine et d'autres externes. Les défauts internes sont dus à la dégradation des éléments constitutifs de la machine et les défauts externes dus à des raisons humaine ou environnemental. Dans le chapitre suivant nous parlerons de deux méthodes de diagnostics d'équipement électriques.

Chapitre III : Choix des méthodes

III.1. Introduction :

Parmi les méthodes de diagnostic, on a choisi de tester deux méthodes. La méthode de contrôle non destructif par courant de Foucault, très utilisé en industrie pour contrôler les pièces conductrices ainsi que la méthode d'analyse vibratoire qui représente aujourd'hui une des méthodes les plus utilisées dans le diagnostic de machines tournantes. Nous allons en premier commencé par le contrôle non destructif par courant de Foucault, son principe, le phénomène d'induction dans l'air et en présence de pièce, pour ensuite illustrer les différents capteurs utilisés et les moyens d'excitations utilisables et la manière dont on détecte le défaut. En deuxième lieu, nous parlerons de l'analyse vibratoire, son principe, de la chaîne de mesure par analyse vibratoire et des différents capteurs utilisés. Nous passons ensuite à l'analyse temporelle et fréquentielle et les principes utilisés par l'analyse vibratoire afin de détecter les défauts.

III.2. CND par courant de Foucault :

III.2.1. Principe :

Tous matériaux conducteurs placés dans un champ magnétique variable dans le temps développent des courants induits, ces derniers appelés courants de Foucault, créent un champ magnétique induit opposé au champ d'excitation.

Ainsi, une naissance des courants de Foucault est induite par une bobine parcourue par un courant variable créant un champ magnétique variable placée vis-à-vis d'un objet conducteur. Le flux magnétique créé par les courants induits modifie la force électromotrice de la bobine, par conséquent l'analyse de cette variation fournit les informations exploitables pour le contrôle de l'objet. Les lignes de courants induits sont donc déviées lors de la rencontre d'une fissuration, d'une inhomogénéité ou d'un changement de géométrie, ce qui entraîne un changement du champ de réaction, [17]. La figure III.1 illustre cette technique.

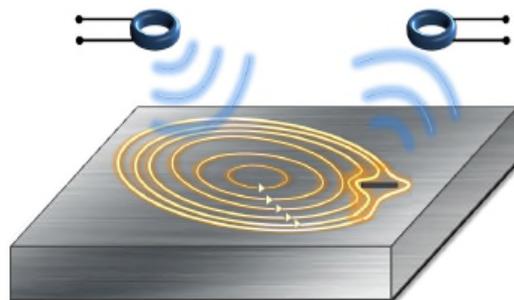


Figure III.1: Principe de fonctionnement du contrôle par courant de Foucault

Afin d'obtenir des informations sur l'objet, une mesure directe des courants de Foucault n'est pas envisageable, donc on y remédie à la mesure du champ généré, cela nécessite une analyse mathématique poussée pour corréler les caractéristiques du défaut à ceux du champ magnétique de façon à réaliser une imagerie du défaut et non pas une imagerie de champs.

III.2.2. Phénomène d'induction dans l'air :

Si une bobine de n spires, voir (figure III.2), est parcourue par un courant électrique sinusoïdale $i(t)=I_0\sin(\omega t)$ avec ω la pulsation, un champ magnétique homogène et axial $H(t)$ est créé dans la bobine dû à ce courant (la valeur est donnée par le théorème d'Ampère). Une induction magnétique $B=\mu_0H$ est générée sous l'effet de cette excitation, ou μ_0 est la perméabilité magnétique de l'air. Le courant étant sinusoïdale, une f.e.m apparaît aux bornes de la bobine et on montre cela en appliquant la loi de LENZ-Faraday, [18].

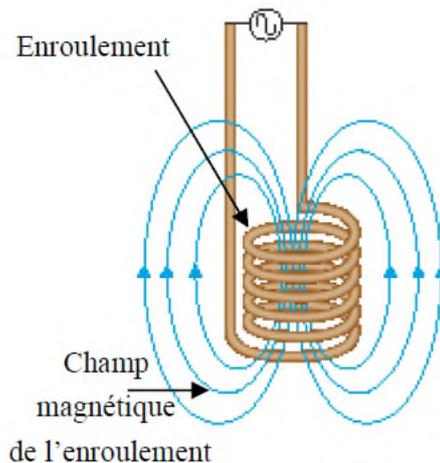


Figure III.2 : Phénomène d'induction dans l'air

III.2.3. Phénomène d'induction en présence d'un conducteur métallique :

Dans cette partie, on considère la bobine précédente au contact d'un matériau conducteur, celle-ci parcourue par un courant électrique sinusoïdale $i(t)$, crée à l'intérieur de la bobine un champ magnétique $H(t)$ homogène et axial. Un champ magnétique $B(t)=\mu_0\mu_rH(t)$ est généré au sein du matériau, avec μ_r la perméabilité magnétique relative du milieu métallique.

En appliquant le modèle simple du transformateur, primaire assuré par la bobine et le secondaire assuré par le matériau métallique, dans ces conditions, le flux magnétique capté par le conducteur variant avec le temps, crée une f.e.m au sein du matériau.

Sous l'effet de la f.e.m au sein du matériau métallique (de conductivité électrique σ), un courant induit apparaît dont la circulation est opposée au courant inducteur $i(t)$ parcourant la

bobine. Ces courants de Foucault sont des courant de conduction qui créé un champ magnétique induit opposé au champ magnétique inducteur. Dans ce cas, la bobine capte le flux résultant et présente à ses bornes une différence de potentiel.

Pour la mesure, les deux grandeur accessibles sont le courant $i(t)$ et la tension $V(t)=V_0\cos(\omega+\phi)$ traversant la bobine. Le module V_0 et la phase ϕ sont des fonctions du courant inducteur, des propriétés physiques et géométriques du matériau, de la géométrie de la bobine et de la fréquence, [18].

III.2.4. Profondeur de pénétration du courant de Foucault :

Les courants de Foucault forment des boucles qui ne circulent dans un matériau conducteur que jusqu'à une faible profondeur sous la surface, ce phénomène est appelé effet de peau. Cet effet provoque la décroissance de la densité de courant à mesure que l'on s'éloigne de la périphérie du conducteur, [19]. Dans ce cas la profondeur de pénétration est donnée par :

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (\text{III.1})$$

Avec:

f : la fréquence

δ : Pour un capteur à CF c'est environ l'épaisseur jusqu'à la quelle, à une fréquence donnée et pour un matériau donné pénétreront les CF.

μ_0 : perméabilité magnétique du vide

μ_r : perméabilité magnétique relative, σ : conductivité électrique.

σ : conductivité électrique du materiau.

III.2.5. Distance capteur/cible (lift-off) :

L'amplitude du signal d'un défaut dépend du rapport (volume défaut/volume examiné), il est donc fonction de la dimension du capteur. L'augmentation des dimensions du capteur améliorent la surface examinée par contre la sensibilité est réduite lors de l'éloignement de celui-ci de l'échantillon à contrôler, [20].

Pour une meilleure détection, les courants de Foucault doivent être perpendiculaires au défaut.

III.2.6. Capteur :

Le capteur est une bobine ou ensemble de bobine servant a générer les CF ainsi qu'a capter leurs effets, on peut les classé sous :

- ✓ Type
- ✓ Fonction
- ✓ Mode de contrôle

III.2.6.1. Le type :

- Bobine encerclante : constitué d'enroulements de mesure entourant la pièce à contrôler, utilisés pour le contrôle de produits longs (tube, barre...).
- Bobine ponctuelle : c'est une bobine utilisée pour l'examen local de la surface à contrôler, elle peut être placée sur ou près de la surface.
- Sonde : Ce type de capteur est utilisé pour l'examen de produits creux et peut se déplacer à l'intérieur de ces produits, [6].

III.2.6.2. Fonction de capteur :

Le contrôle par CF nécessite l'emploi de deux fonctions:

- L'Emission (E) d'un champ électromagnétique alternatif.
- La Réception (R) d'un champ électromagnétique alternatif.

Certains éléments peuvent réaliser simultanément ces deux fonctions (E) et (R) tandis que d'autre ne peuvent qu'en assurer qu'une, on distingue alors :

III.2.6.2.1. Les capteurs à double fonction :

La bobine d'excitation sert aussi d'élément de mesure jouant le rôle d'émettrice et de réceptrice du champ. Dans ce type de capteur, l'élément de mesure est l'impédance aux bornes de l'enroulement. Le calcul de cette impédance est basé sur le model de transformateur, l'enroulement primaire assure la double fonction, [21], comme c'est représenté sur la Figure III.3.

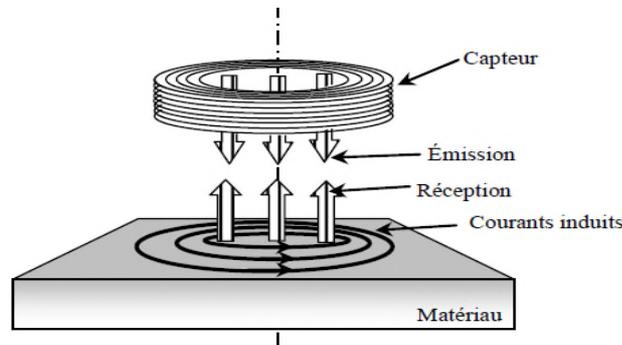


Figure III.3: Capteur à double fonction

III.2.6.2.2. Les capteurs à fonctions séparés :

Les fonctions d'excitation et de réceptions sont assurées par des éléments distincts. La grandeur mesurée est une image de la variation du flux électromagnétique. L'élément de mesure est une bobine mesurant directement la différence de potentielle induite (DDP). Dans ces conditions, on effectue une mesure ponctuelle d'un des composantes de l'induction. La Figure III.4 représente un capteur à fonction séparé, [21].

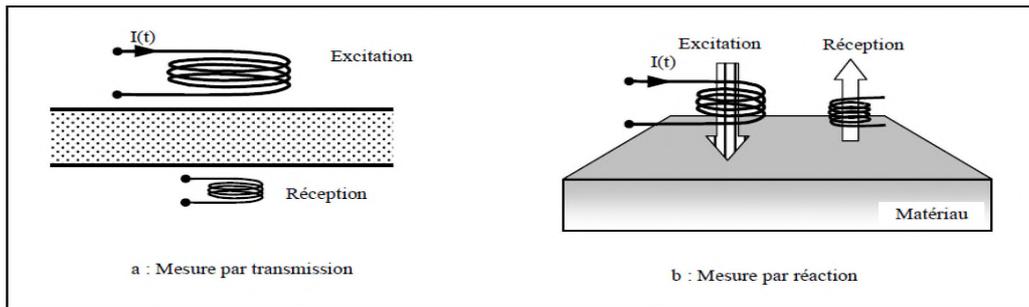


Figure III.4: Capteur à fonction séparé

III.2.6.3. Le mode de contrôle :

Les techniques classiques de métrologie s'applique aussi pour ce type de dispositif, on distingue :

III.2.6.3.1. Mesure absolu :

La mesure s'effectue en utilisant un seul capteur à double fonction créant un flux alternatif grâce au courant qui le parcourt et subit des variations d'impédance.

La bobine d'examen est une branche d'un pont d'impédance alimenté par Oscillateur, voire la Figure III.5. En absence de défaut, le pont est équilibré.

Un signal apparait dans le plan complexe dès que la sonde s'approche du défaut. L'amplitude du signal est liée au volume de la matière affectée par le défaut. De même, la phase est fonction du type du défaut et de sa profondeur, [7].

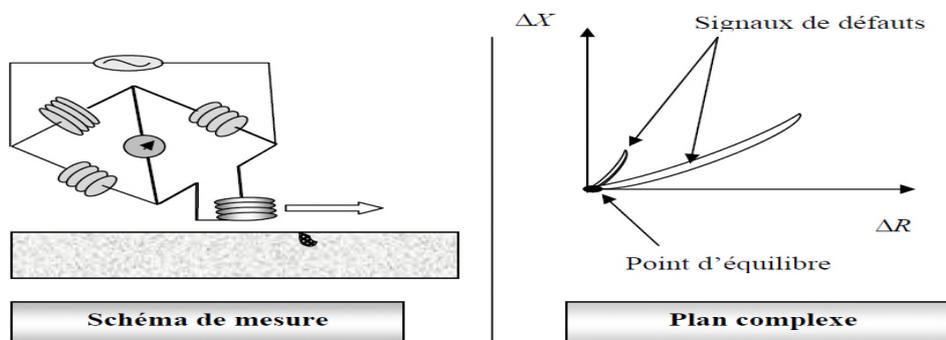


Figure III.5: Sonde absolu

III.2.6.3.2. Mesure absolu compensé :

Dans ce mode de contrôle on utilise deux capteurs absolus. Un est positionné à proximité de la surface de la pièce à contrôler, capte les grandeurs utiles et perturbatrices et l'autre placé à proximité d'une autre surface saine du même matériau, il ne capte donc que les signaux perturbateurs, une mesure comparative permet d'extraire seulement les signaux utiles, donc d'éliminer les grandeurs d'influences, [3].

III.2.6.3.3. Mesure différentielle :

Méthode utilisée pour détecter des discontinuités lors d'un déplacement du capteur le long de la pièce. Pour cela deux capteurs absolus écartés, montés en têtes bêches et parcouru par le même courant mais de signes opposés sont utilisés, [21]. Cette approche revient à effectuer une comparaison entre deux mesures réalisées conjointement sur les deux éléments comme le montre la Figure III.6.

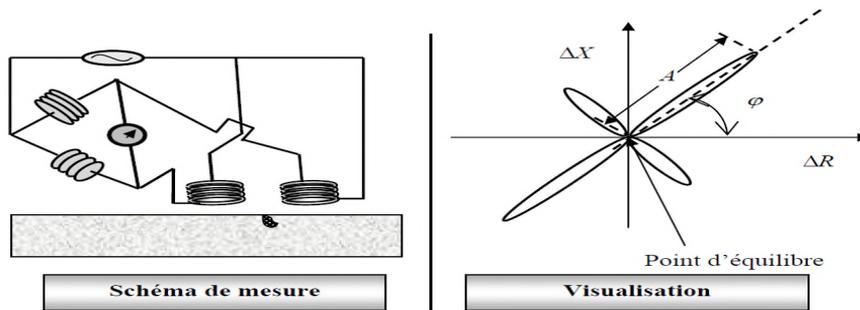


Figure III.6: sonde différentielle

III.2.6.4. Techniques d'excitations :

Tout système de CND à courant de Foucault doit être excité par une source d'alimentation à courant ou tension variable dans le temps pour produire un champ magnétique qui va traverser la cible que l'on souhaite examinée. Le champ magnétique créé est directement liée au mode d'excitation, on distingue alors trois types d'alimentation pour les capteurs à courant de Foucault :

- Signal mono fréquence
- Signal multi fréquence
- Signal pulsé : signal à durée finie

Dans le mode mono fréquence, le signal d'excitation est une onde sinusoïdale de fréquence fixe. Le choix de la valeur de la fréquence dépend de l'application visée. En effet les courants de Foucault à basse fréquence [1Hz:1kHz] conviennent pour le contrôle de produits de grande épaisseur et les matériaux ferromagnétiques. Pour les matériaux de faible ou moyenne épaisseur, on utilise les fréquences de valeurs moyennes [1kHz:1MHz]. Les fréquences supérieures à 1MHz sont peu utilisées.

L'évolution de plusieurs paramètres d'un système, tels que la conductivité, la perméabilité d'une pièce ou encore le lift-off (la position du capteur par rapport à la pièce), nécessite un nombre adéquat d'informations issues du capteur, l'excitation en mode multifréquences peut être utilisée. Ce qui permet de s'affranchir de signaux perturbateurs. La technique de mesure peut être réalisée en fréquences séquentielles ou en fréquences simultanées. En pratique, on utilise un système d'excitation en double fréquences (10kHz et

100 kHz) pour le contrôle des rails ferroviaires et à trois fréquences (100kHz, 240kHz, 500kHz) pour les tubes de vapeur. Cependant, on peut obtenir un spectre fréquentiel plus riche, en choisissant le mode d'excitation pulsée, [19].

III.2.7. Plan impédance :

Considérons une bobine caractérisée par N spires placée en régime harmonique, excitée par un courant $I_0 e^{j\omega t}$ (avec $\omega = 2\pi f$, la pulsation et f la fréquence), voire figure III.7, l'impédance de la bobine dans l'air, en Ω , peut être définie :

$$Z_{bo} = Z_0 = R_0 + jX_0 \quad (III.2)$$



Figure III.7: Bobine parcourue par un courant I générant un flux magnétique ϕ

Avec :

$X_0 = \omega L_0$, X_0 et L_0 sont respectivement la réactance (Ω), la réactance (Ω) et l'inductance (H) de la bobine dans l'air.

A proximité d'une pièce conductrice, un champ de réaction s'oppose au champ d'excitation de la bobine, ϕ_0 , modifiant ainsi l'impédance de la bobine.

Lors d'une variation supplémentaire due à la modification du champ causée par la déviation des courants de Foucault (présence de défaut), cela affecte l'impédance de la bobine en devenant :

$$Z_{bo} = Z_{piec} + Z_{def} \quad (III.3)$$

$$Z_{bo} = Z_{piec} + (\Delta R_{def} + j\Delta X_{def}) \quad (III.4)$$

La figure III.8 présente un plan impédance permettant de mettre en évidence l'effet du défaut sur l'impédance du bobinage, le point 1 sur la figure représente l'impédance du bobinage dans l'air Z_0 , le point 2 la valeur Z_{piec} sans défaut et le point 3 la valeur de Z_{piec} avec défaut, l'écart, entre le point 3 et 2 représente la signature du défaut qui est exploitée pour le détecter, [17].

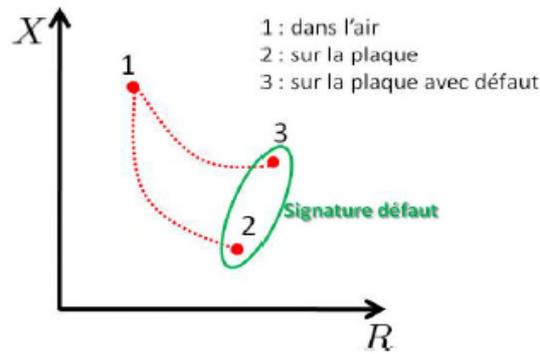


Figure III.8: Effet du défaut sur la valeur de l'impédance de la bobine

III.2.8. Paramètre influant sur le contrôle par courant de Foucault :

Les principaux paramètres à prendre en compte pour un contrôle peuvent se répartir en pratique en trois catégories :

III.2.8.1. Paramètres liés aux matériaux à sonder :

Ce sont ceux liés à la forme géométrique (diamètre), ce sont sa conductivité électrique et sa perméabilité magnétique dans il importera de prendre en compte le niveau de stabilité le long de la pièce ou d'une pièce à l'autre, toute variation locale entraînant un déplacement des points de fonctionnements moyens de la sonde, [20].

III.2.8.2. Paramètres liés au montage :

Ces paramètres gouvernent le couplage entre la bobine et le matériau : il s'agit soit du coefficient du couplage pour les bobines enceclantes, rapport entre la section de la barre et celle de la bobine, soit du lift-off, terme désignant universellement la distance entre une bobine plate et la surface de la pièce.

III.2.8.3. Paramètres électriques :

C'est essentiellement la fréquence d'excitation de la bobine, ce paramètre est choisi en fonction de paramètre précédant, à savoir l'obtention d'un effet de peau adéquat en particulier de la profondeur du défaut, et d'un point de fonctionnement sur un diagramme complexe permettant une bonne discrimination des différents paramètres perturbateur de l'impédance.

III.3. Analyse vibratoire :

III.3.1. Définition d'une vibration :

Un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement de va-et-vient autour d'une position moyenne, dite position d'équilibre. Une vibration se caractérise principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature, [22], voir (figure III.9).

Amplitude : On appelle amplitude d'une onde vibratoire la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre.

Fréquence : La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné. Lorsque la seconde est choisie comme unité de temps. La fréquence s'exprime en Hz.

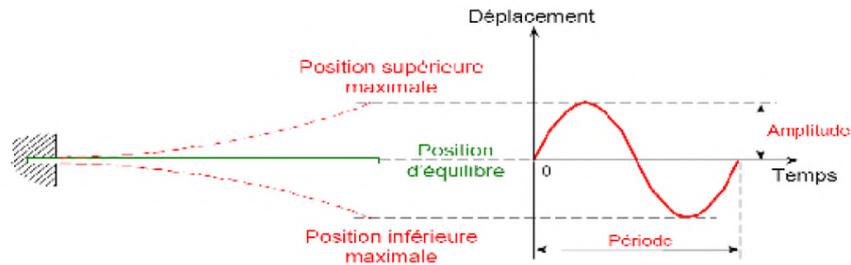


Figure III.9 : Naissance d'une vibration

Le mouvement d'une masse dite en vibration se traduit par les trois grandeurs fondamentales:

Le déplacement X : Le déplacement s'exprime en m, ou plus couramment en mm, ou en μm

$$X(t) = A \sin(\omega t) \quad (\text{III.5})$$

La vitesse V : la variation de son déplacement pour une unité de temps, la vitesse s'exprime en m/s ou mm/s.

$$V = \frac{dX}{dt} = d \frac{A \sin \omega t}{dt} = A \omega \cos(\omega t) \quad (\text{III.6})$$

L'accélération : une variation de la vitesse par unité de temps, l'accélération s'exprime en m/s^2 .

$$\gamma = \frac{dV}{dt} = \frac{d[\omega A \cos(\omega t)]}{dt} = -\omega^2 X \sin(\omega t) \quad (\text{III.7})$$

X = déplacement par rapport à la position d'équilibre.

t = temps en seconde.

A = amplitude (déplacement maximal par rapport à la position d'équilibre).

ω = pulsation ou vitesse angulaire (rad/s).

III.3.2. Type de signaux vibratoires :

III.3.2.1. Vibration harmonique :

Une vibration harmonique est une vibration dont le diagramme amplitude-temps est représenté par une sinusoïde (Figure III.10).

Le meilleur exemple d'une vibration harmonique est celle qui est générée par le balourd d'un rotor en mouvement, [23].

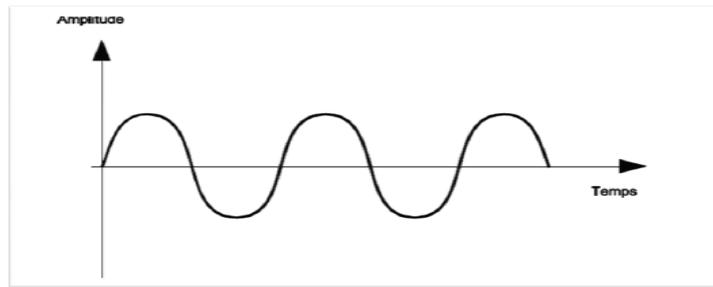


Figure III.10 : Signaux vibratoires harmoniques

$$X(t)=A\sin(\omega t+ \theta x) \quad (III.8)$$

Avec :

ω = vitesse angulaire ou pulsation du mouvement ($2\pi f$).

f = fréquence du mouvement.

θ = phase du mouvement par rapport à un repère dans le temps.

III.3.2.2. Vibrations périodiques :

Une vibration périodique est telle qu'elle se reproduit exactement après un certain temps appelé période (figure III.11).

Une telle vibration est créée par une excitation elle-même périodique. C'est le cas le plus fréquent rencontré sur les machines, [23].

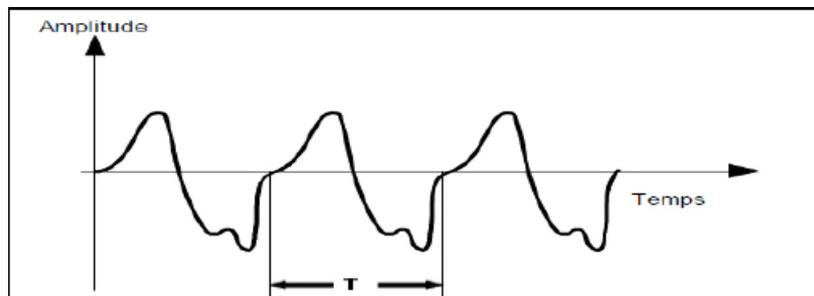


Figure III.11: Signaux vibratoire périodique

$$X(t)=\sum_{i=1}^n [X_i \sin(\omega t + \theta_i)] \quad (III.9)$$

III.3.2.3. Vibrations apériodiques :

Une vibration apériodique est telle que son comportement temporel est quelconque, c'est-à-dire que l'on n'observe jamais de reproductibilité dans le temps (figure III.12). C'est le cas des chocs que l'on enregistre sur un broyeur, [23].

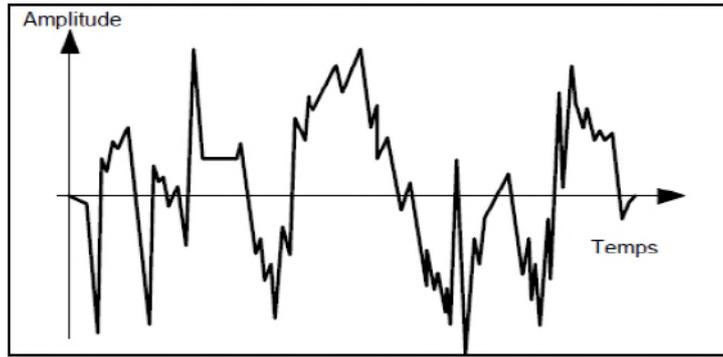


Figure III.12 : Signaux vibratoires aperiodiques

$$X(t) = \sum_{i=1}^{\infty} [X_i \sin(\omega t + \theta_i)] \quad (III.10)$$

III.3.3. Principales activités de l'analyse vibratoire :

III.3.3.1. La surveillance :

Le suivi des vibrations d'une machine et par comparaison successif des relevés obtenus permette d'avertir d'une tendance de hausse de certains indicateurs par rapport à des valeurs de références constituant la signature de la machine.

III.3.3.2. Le diagnostic :

Lors d'une détection d'une anomalie ou d'une évolution dangereuse du signal vibratoire par surveillance, un diagnostic permet dans ce cas de localiser l'élément défectueux suite aux anomalies détectées tout en mettant en œuvre des formules mathématique plus élaborées.

Avant d'entamer la procédure de diagnostic, il faut une étude permettant :

- Une bonne compréhension du fonctionnement de la machine et ses organes,
- L'établissement d'une fiche cinématique de la machine : calcul des fréquences de rotation de toutes les lignes d'arbres, des fréquences de défauts.

La Figure III.13 représente les principales activités de l'analyse vibratoire.

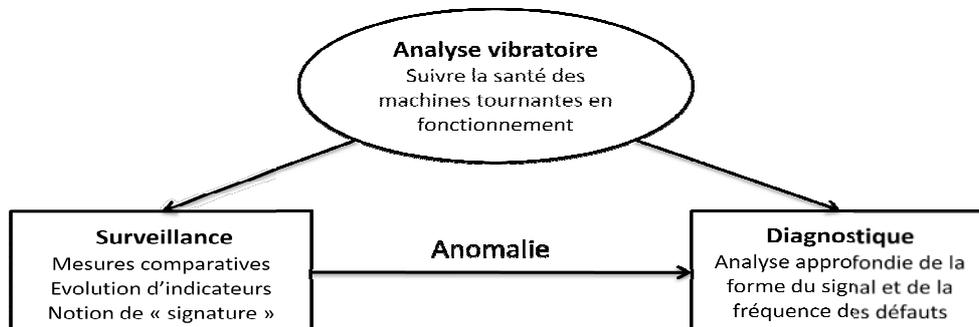


Figure III.13 : Principales activités de l'analyse vibratoire

III.3.4. Chaîne de mesure par analyse vibratoire :

Une surveillance fiable ne peut être obtenue que si d'une part le matériel de mesure est en adéquation avec les caractéristiques vibratoires fournies par les machines et si d'autre part les données le sont avec les outils de post-traitement qui doivent en faciliter le diagnostic. Il est indispensable de posséder un matériel d'analyse des vibrations qui peut être constituée des éléments suivants : en plus de la structure à étudier, des capteurs, conditionneur, pot vibrant ou marteau d'impact, analyseur et programme d'analyse modale, sont nécessaires, comme le montre la figure III.14 ci-dessous, [24] :

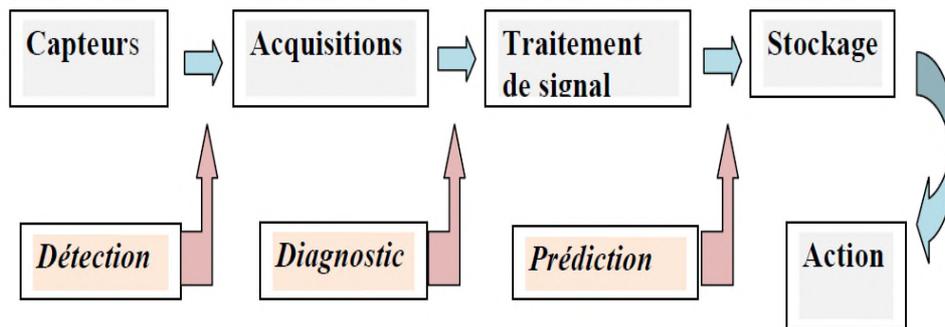


Figure III.14 : chaîne d'acquisition

III.3.4.1. Les capteurs de vibrations :

Un capteur de vibration est un transducteur capable de convertir en signal électrique le niveau de vibrations qu'il subit à un instant donné. Celui-ci se caractérise par :

a) Sensibilité :

La sensibilité des capteurs représente la proportionnalité de la sortie électrique exploitable (tension, charge, courant) par rapport aux paramètres de vibration (accélération, vitesse, déplacement), elle s'exprime en terme de : Sortie électrique/paramètre de vibration.

b) Bande passante :

Plage de fréquences à l'intérieur de laquelle l'amplitude mesurée par le capteur ne dépasse pas une marge d'erreur fixée par le constructeur.

c) Gamme dynamique :

Gamme comprise entre la plus petite et la plus grande amplitude acceptée par le capteur.

On retrouve parmi les capteurs les plus utilisés :

III.3.4.1.1. Les sondes de déplacement :

Un capteur à courant de Foucault (sonde) mesurant en permanence les déplacements des arbres de machines. Un champ magnétique est créé dans l'intervalle entre l'extrémité de la sonde et l'arbre. Le déplacement de celui-ci modifie le champ magnétique ce qui engendre

un courant proportionnel au déplacement de l'arbre. Il est monté en permanence à l'intérieur du palier, [5], (Figure III.15).

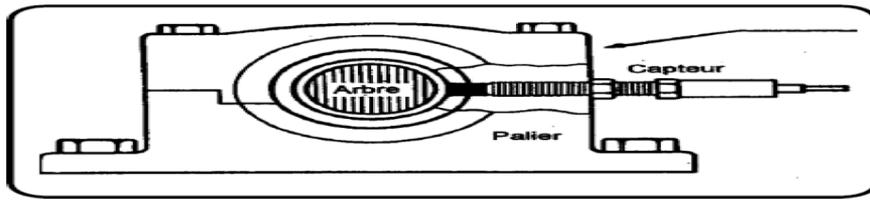


Figure III.15 : Prosimètre monté sur un palier d'une machine tournante

✓ Avantages :

- Mesure directement les mouvements d'arbre
- Même capteur pour les butées, les vibrations radiales et la vitesse
- Mesure directement le déplacement
- Pas de pièce mobile

✓ Inconvénients :

- Sensible au matériau de l'arbre
- Gamme de fréquence limitée .Pas de détection des défauts de roulements

III.3.4.1.2. Les capteurs de vitesse, ou vélocimétrie :

Ces capteurs sont constitués d'une sonde à contact dite sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée (figure III.16). Ils sont sans doute la version la plus simple d'un capteur de vibration. Une bobine électrique est placée entre les pôles d'un aimant électromagnétique .Le mouvement relative de cette bobine par rapport à l'aimant immobile induira un courant dans la bobine dans la tension est proportionnelle à la vitesse v suivant la relation :

$$E=B \cdot l \cdot v$$

B : le champ magnétique

L:longueur de l'enroulement

V : vitesse relative de la bobine par rapport à l'aimant

Le principe électrodynamique est le plus robuste et le plus facile à mettre en œuvre. Particulièrement adapté aux machines à faible vitesse de rotation .Ce genre de capteur est peu utilisé en revanche pour des fréquences inférieures à 100Hz

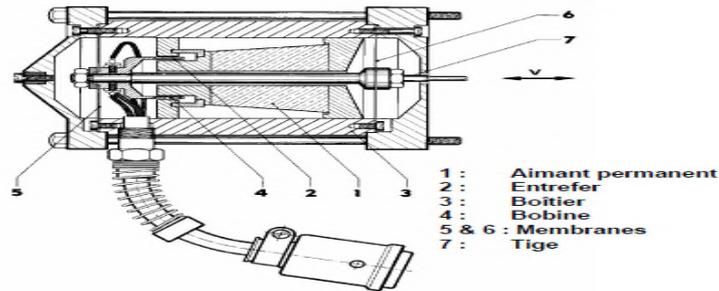


Figure III.16 : Une vélocimétrie

III.3.4.1.3. Les accéléromètres :

Considéré comme le meilleur capteur disponible à ce jour pour les mesures de vibrations absolues. Les éléments actifs de ce type de capteur sont des disques de cristal piézo-électrique. Ces disques sont pris entre deux masses. Quand elles sont soumises à un effort ou une contrainte, elles vont avoir un mouvement inverse. Ainsi, elles vont écraser l'élément piézoélectrique, qui émettra des charges électriques, proportionnelles à la force appliquée et donc à l'accélération des masses. Les accéléromètres sont placés sur des paliers à roulement [25], la figure III.17 représente un accéléromètre.

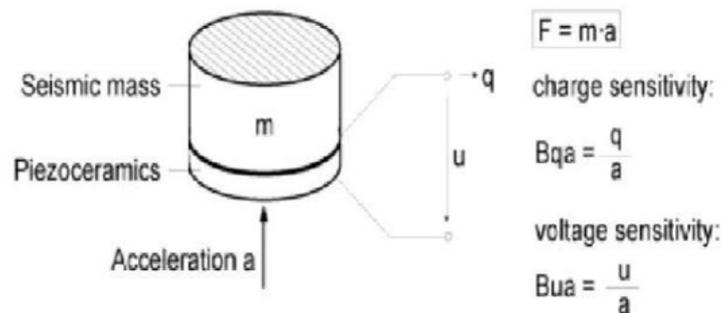


Figure III.17 : un accéléromètre

Avec :

$$Q = k * P$$

$$P = F/S$$

$$F = m * a \Rightarrow Q = K * a$$

Avec :

Q : Charge électrique générée par l'effet piézo-électrique [pC]

P : Pression exercée sur la céramique [N/m²]

F : Force exercée sur la céramique [N]

S : Surface de contact entre la masse sismique et la céramique [m²]

m : Masse sismique [kg]

a : Accélération du capteur [m/s^2]

k : Constante [$pC/N/m^2$]

K : Facteur de transmission [$pC/m/s^2$]

✓ Avantages :

- Facile à installer,
- Petit et léger,
- Supporte les hautes températures,
- Pas de pièce mobile.

✓ inconvénients :

- Nécessite une double intégration pour le déplacement,
- Nécessite une source extérieure,
- Fournit des informations limitées sur la dynamique d'arbre,
- Médiocre pour les faibles vitesses.

III.3.4.2. Analyse du signal :

Le diagnostic dans la majorité des cas est établi en interprétant les signaux vibratoires émis par les capteurs, plusieurs techniques de traitement de ces signaux se sont développées (l'analyse dans le domaine temporel et l'analyse spectrale).

III.3.4.2.1. Analyse dans le domaine temporel :

Les méthodes temporelles sont basées sur l'analyse statistique du signal recueilli. Ces méthodes utilisent des indicateurs scalaires qui permettent de suivre l'évolution d'une grandeur dérivant de la puissance ou de l'amplitude du signal mesuré. Donc la méthode temporelle se base sur la mesure de la valeur crête, valeur crête à crête, valeur RMS et le facteur crête [26].

III.3.4.2.1.1. Valeur crête :

C'est la plus grande valeur atteinte, utile dans toutes les décisions qui concernent les phénomènes de courte durée (choc), souvent utilisée pour les déplacements (0-1000 cycle par minute).

III.3.4.2.1.2. Valeur crête à crête :

C'est la différence entre la plus grande valeur du signal et sa plus petite valeur. Il s'agit d'une valeur utile pour déterminer le mouvement des composants, le déplacement qui peut être critique pour des considérations de contrainte maximale ou de jeu mécanique. En pratique on utilise cette valeur pour les mesures issues de sonde de déplacement.

III.3.4.2.1.3. La valeur RMS :

C'est l'image de l'énergie contenue dans un signal. La mesure tient compte de l'évaluation de la valeur des composantes Harmoniques .En pratique on utilise souvent la valeur efficace pour les mesures issues d'accéléromètre.

$$V_{\text{efficace}}=V_{\text{RMS}}=\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2} \quad (\text{III.11})$$

III.3.4.2.1.4. Facteur crête :

C'est le rapport valeur crête sur valeur efficace du paramètre vitesse ou accélération. Il caractérise l'apparition des premiers défauts sur les roulements [26].

$$\text{Facteur crête}=\frac{\text{valeur crête}}{\text{valeur efficace}}=\frac{\sup |x(n)|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2}} \quad (\text{III.12})$$

Le suivi de ces paramètres permet de détecter si un défaut régit la machine.

III.3.4.2.2. Analyse fréquentielle :

L'analyse spectrale des vibrations revient à transformer une forme d'onde ou signal temporel en un spectre représentant chaque fréquence de vibration et l'amplitude qui lui est associé. Au moyen d'une représentation mathématique dite transformée de Fourier rapide (TFR) :

$$X(f)=\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{III.13})$$

Ou

X(f) est la transformée de Fourier,

t est la variable de temps,

f est la fréquence.

La courbe TFR met en évidence le niveau des vibrations et identifie à quelle fréquence elle apparait. Les fréquences des vibrations sont déterminées par la cinématique de la machine et de sa vitesse, liées à la géométrie et à la vitesse de rotation de l'élément mécanique .La présence d'une anomalie se traduit par une fréquence correspondante à celle du phénomène qui la provoque.

La mesure de l'amplitude de certaines raies du spectre permet de diagnostiquer l'origine des défauts et de suivre l'évolution du défaut causé par les vibrations.

L'analyse vibratoire est la plus courante, et notamment les méthodes spectrales. Elles permettent à la fois de détecter les défauts et d'en connaître l'origine [23].

On peut classer les anomalies spectrales des machines comme suit :

- Pics apparaissant à des fréquences multiples ou sous multiples de la vitesse du rotor.
- Pics apparaissant à des vitesses indépendantes de la vitesse du rotor.

-Densité spectrale provenant de composantes aléatoires de la vibration.

Le tableau III.1 récapitule la majorité des défauts et anomalies sur une machine par analyse fréquentiel tout en indiquant la fréquence du défaut et sa direction.

Avec :

f_{rot} = fréquence de rotation,

f_e = fréquence d'engrènement, cette fréquence est aussi notée f_{eng} ,

f_p = fréquence de passage de la courroie

z = nombre de dents de l'engrenage.

Type d'anomalie	Vibration		Remarques
	Fréquence	Direction	
Tourbillon d'huile	De 0.42 à $0.48 \times f_{rot}$	Radiale	Uniquement sur paliers lisses hydrodynamique à grande vitesse
Balourd	$1 \times f_{rot}$	Radiale	Amplitude proportionnelle à la vitesse de rotation .déphasage de 90° sur 2 mesures orthogonales
Défaut de fixation	$1, 2, 3, 4 \times f_{rot}$	Radiale	Aucun déphasage sur 2 mesures orthogonales
Défaut d'alignement	$2 \times f_{rot}$	Axiale et radiale	Vibration axiale est en général plus important si le défaut d'alignement comporte un écart angulaire
Excitation électrique	$1, 2, 3, 4 \times 50\text{Hz}$	Axiale et radiale	Vibration disparaît dès coupure de l'alimentation
Vitesse critique de rotation	Fréquence critique de rotor	Radiale	Vibration apparaît en régime transitoire et s'atténue en suite
Courroie en mauvais état	$1, 2, 3, 4 \times f_p$	Radiale	
Engrenage endommagé	Fréquence d'engrènement $f_e = z \times f_{rot}$	Axiale et radiale	Bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement
Faux-rond d'un pignon	$f_e \pm f_{rot \text{ pignon}}$	Axiale et radiale	Bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement dues au faux-rond
Excitation hydrodynamique	Fréquence de passage des aubes	Axiale et radiale	
Détérioration de roulement	Hautes fréquence	Axiale et radiale	Ondes de choc dues aux écaillages. Aide possible par « détection d'enveloppe ».

Tableau III.1 : Reconnaissance des principales anomalies

III.3.4.2.3. Analyse d'enveloppe :

Certains défauts des systèmes mécaniques comme les roulements génèrent des modulations de phase(ou de fréquence) et d'amplitude. Les modulations produisent dans le spectre des bandes latérales autour des fréquences principales du système (fréquence d'engrènement et harmoniques par exemple). Le cepstre est un outil permettant d'identifier l'espacement en fréquence séparant ces bandes, et donc l'origine de l'anomalie. Cependant, une autre technique existe, permettant un diagnostic plus précoce, il s'agit de l'analyse d'enveloppe, opération de démodulation de phase consistant à isoler les fréquences modulantes [27].

L'étude du signal d'enveloppe permet d'analyser la forme du signal, notamment lorsque le défaut recherché excite un mode de résonance de la structure. Elle consiste à filtrer

le signal autour d'une fréquence de résonance identifiable sur le spectre, et à rechercher la modulation provoquée par la répétition des forces générées par le défaut recherché.

Le domaine de recherche se base sur la transformée de Hilbert (TH). La TH peut déterminer l'amplitude instantanée et la fréquence instantanée, elle est donnée par l'équation (III.14) :

$$Z(t)=x(t)+iH[x(t)]=A(t)e^{i\varphi(t)} \quad (\text{III.14})$$

$H[(t)]$ est la transformée de Hilbert de (t) , $A(t)$ est l'amplitude instantanée et $\varphi(t)$ est la phase instantanée.

III.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé en détails deux méthodes de diagnostic. La première consiste en contrôle non destructif par courant de Foucault, son principe de fonctionnement, le phénomène d'induction magnétique, les modes d'excitation ainsi que les capteurs utilisés pour cette méthode sont présentés. Le calcul d'impédance et comment détecter le défaut sur une pièce industrielle conductrice sont expliqués. La deuxième méthode est l'analyse vibratoire, son principe de fonctionnement sont détaillés. Basant sur l'analyse temporelle et fréquentielle qui sont utilisées pour la détection de défaut. Dans le chapitre qui suit nous allons passer à l'applications de ces deux méthodes et l'interprétation des résultats.

Chapitre IV : Application des méthodes et résultat

IV.1. Introduction :

Les deux méthodes vues dans le chapitre précédent. Nous allons exposer dans ce chapitre l'application. La première partie concerne l'analyse vibratoire de défaut régissant les machines asynchrones (défaut de roulement, cassure de barre rotorique et court circuit des spires au stator). La deuxième partie est consacrée sur la méthode de diagnostic par courant de Foucault utilisée pour la détection des fissures et la vérification des propriétés des pièces et composants critiques (dureté de surface, profondeur de cémentation).

IV.2. Application de la méthode vibratoire :

IV.2.1. Description de la machine asynchrone étudiée :

La machine sur la quelle les tests sont fait afin d'approuver la théorie du chapitre III, est une machine asynchrone triphasée à deux paires de pôles, d'une puissance de 3KW, alimentée directement par le réseau électrique du laboratoire (230 volts, 50Hz), dans notre cas, nous disposons d'un banc d'essais constitué principalement de la machine asynchrone de test reconstruite de façon à avoir accès au stator (court circuit spire), au rotor (barre cassée) et au roulement (roulement défaillant) , la Figure IV.1 représente la machine asynchrone avec stator et rotor séparés.



Figure IV.1 : Machine asynchrone utilisée

Les tests pratiques sont réalisés sans charge à priori ($s=0$) afin d'éviter de graves endommagements et pouvoir réutiliser la machine dans de futurs travaux.

Le Tableau IV.1 représente les caractéristiques du banc d'essai ainsi que les paramètres de la machine.

Puissance	3KW
Nombre de spires de chaque phase	392(196*2)
Nombre de paires de pôles P	2
Nombre d'encoches	36
Nombre de barres	24
Fréquence du secteur f_s	50Hz
Fréquence de rotation f_r	24,84Hz

Tableau IV.1 : Paramètre de la machine utilisée

Avec la connaissance de l'objectif de ce travail, du principe physique pour l'atteindre et de la machine à test, ou nous allons exposer dans ce qui suit le principe de l'analyse vibratoire d'une machine asynchrone et les essais expérimentaux avec discussion détaillé des résultats.

IV.2.2 Application de l'analyse vibratoire sur une machine asynchrone :

L'analyse en fréquence est devenue un outil fondamental pour le traitement des signaux vibratoires. Elle s'appuie sur la transformée de Fourier qui assure un passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. Cette représentation permet de connaître le contenu spectral d'énergie ou de puissance, présent dans un signal à une fréquence d'échantillonnage de 10 KHz et de détecter la présence d'un défaut générant (un choc périodique à une fréquence F_d) par comparaison à la représentation spectral du signal sain.

IV.2.3. Résultats et interprétations :

IV.2.3.1 Mesure vibratoire dans le cas sain :

Dans ce test, la machine asynchrone est saine et sans défaut, et le signal récupéré est traité par deux méthodes comme le montre la Figure IV.2.

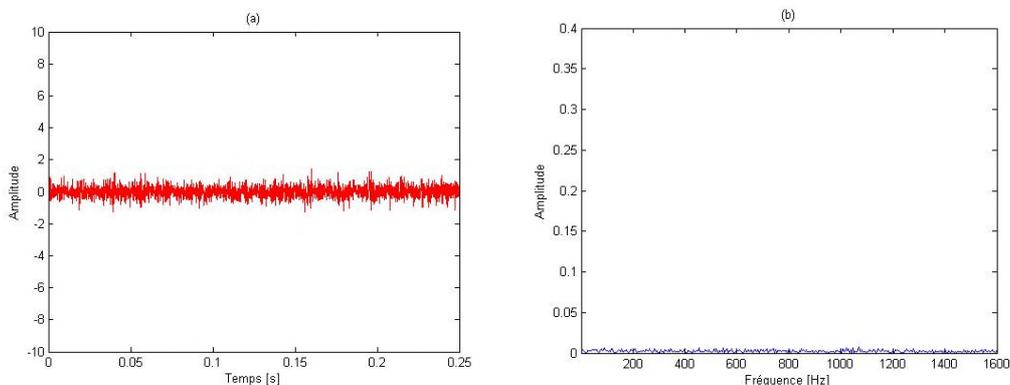


Figure IV.2: Signal sain récupéré sur la machine en marche (moteur) : (a) : Signal temporel, (b) : Analyse fréquentielle

La Figure IV.2(a) est la représentation temporelle $x_s(t)$ du signal sain et la Figure IV.2(b) sa transformée par FFT du signal sain avec une fréquence d'échantillonnage $f_c=10000\text{Hz}$, ce spectre fréquentielle confirme les résultats attendus en théorie car il ne représente aucune composante fréquentielle caractéristique d'un défaut.

IV.2.3.2. Mesure lors d'un défaut au stator :

Le signal vibratoire récupéré sur la machine asynchrone lors de la présence d'un défaut de spires en court-circuit au stator, est représenté et analysé sur la Figure IV.3.

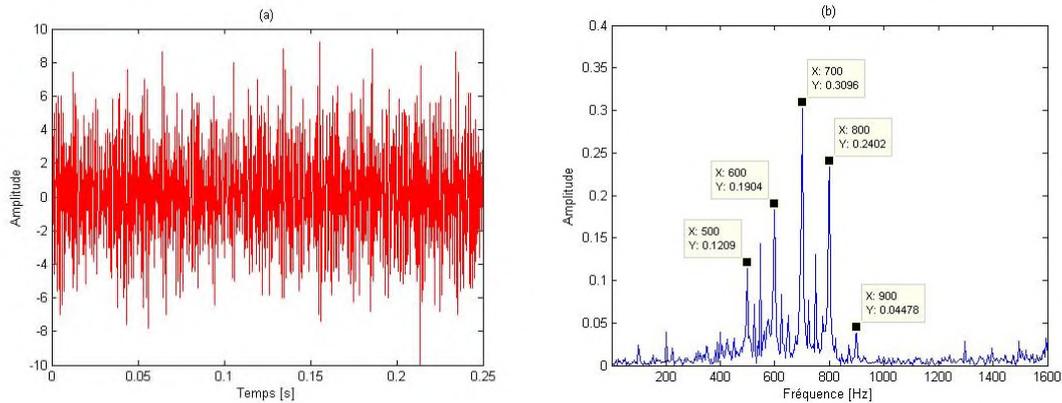


Figure IV.3 : Signal récupéré sur la machine avec court circuit au stator :(a) : Signal temporel, (b) : Analyse spectral

Sur la représentation temporelle Figure IV.3.(a) , on remarque que le signal $x_c(t)$ de court circuit est modulé par rapport au signal $x_s(t)$ de la Figure IV.2.(a). Ces amplitude sont de l'ordre de 3 à 4 fois plus grandes. L'analyse spectrale du signal Figure IV.3.(b) confirme la présence du défaut à la fréquence f_d à des pics d'amplitudes espacés de deux fois la fréquence d'alimentation f_s ($f_d= 2*f_s=100\text{Hz}$). Deux harmoniques de la fréquence de défaut ,ainsi que des bandes laterales espacées de la fréquence de défaut sont présentées dans le spectre à des fréquences (500, 600, 800, 900Hz).

IV.2.3.3. Mesure lors d'un défaut au rotor :

La Figure IV.4 représente le signal $x_b(t)$ récupéré sur la machine après avoir simulé un défaut sur la barre rotorique de la machine ainsi que son spectre fréquentiel.

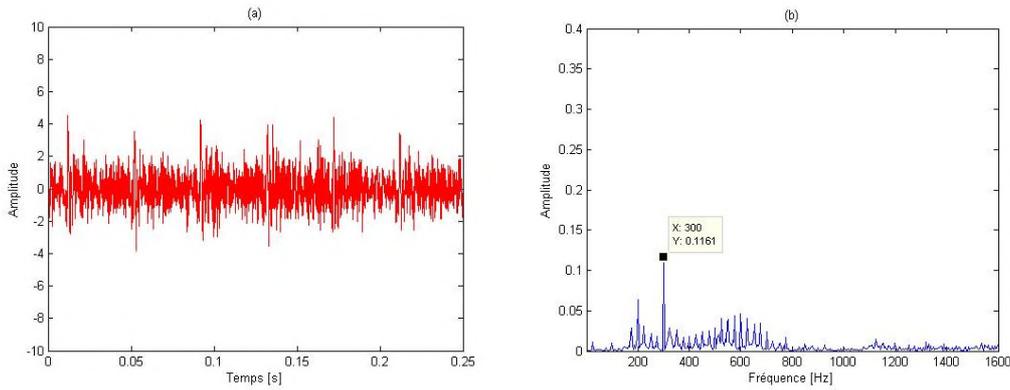


Figure IV.4: Signal récupéré sur la machine avec barre rotorique cassée : (a) : Signal temporel, (b) : Analyse spectral

La Figure IV.4.(a) représente le signal temporel $x_b(t)$ de cassure de barre rotorique, on remarque que l'amplitude de signal est de 2 à 3 fois plus grande que celle du signal temporel sain (Figure IV.2.(a)). L'analyse spectral du signal temporel $x_b(t)$ est donné sur la Figure IV.4.(b) et sur ce dernier on remarque la présence de trois harmoniques dont la fréquence du défaut $f_d=2f_s=100$ HZ avec des amplitudes importante.

IV.2.3.4. Mesure lors d'un défaut de roulement :

Dans ce test, le roulement sain dans le palier est remplacé par un roulement ayant un défaut de bague externe et la mesure est effectuée à une vitesse de rotation constante soit 15Hz. Le signal enregistré, son spectre de fréquence et le spectre d'enveloppe sont représentés respectivement sur la Figure IV.5(a), (b) et (c). Comme nous le constatons sur le spectre de fréquence Figure IV.5, les composantes fréquentielles du défaut de roulement ne sont pas identifiables, ce qui impose le spectre d'enveloppe de la Figure IV.5(c), sur ce spectre nous distinguons des harmoniques de la fréquence caractéristique du défaut de roulement à la fréquence 108,5Hz et ces harmoniques correspondent au défaut sur la bague extérieure.

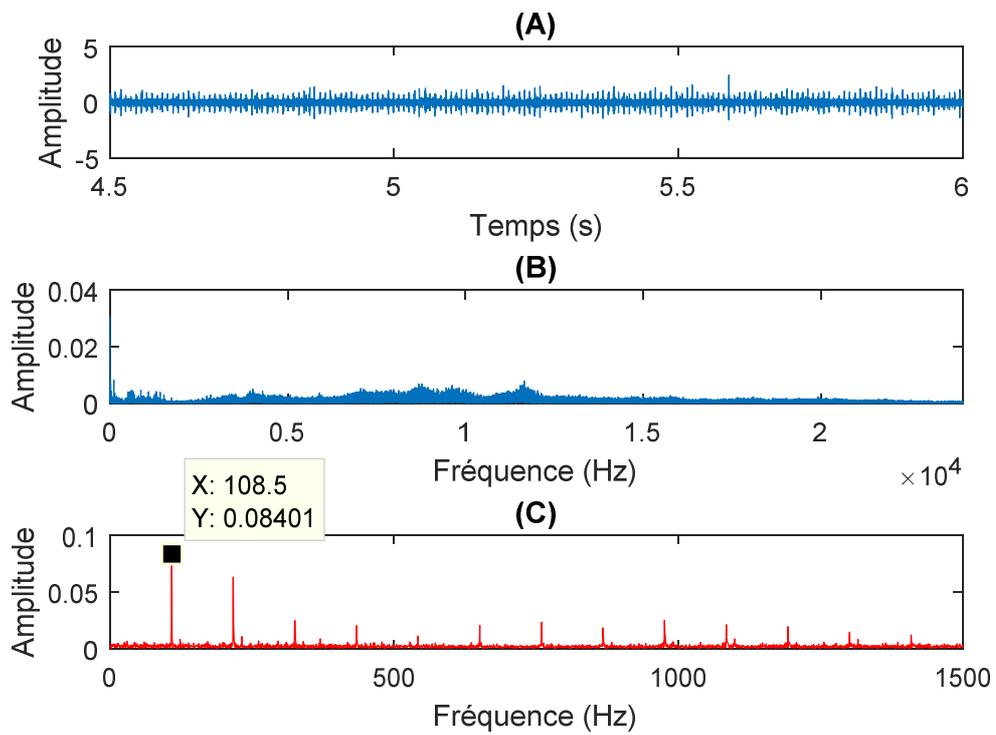


Figure IV.5 : signal récupéré sur la machine asynchrone avec défaut de roulement : (A) : signal temporel, (B) : analyse spectrale, (C) : spectre d'enveloppe

IV.3. Application de la méthode du CND par courant de Foucault :

IV.3.1 Description du dispositif et matériaux contrôlés :

Notre dispositif pour le contrôle non destructif avec courant de Foucault est constitué d'un analyseur d'impédance, le capteur, la pièce à contrôler dont la présence ou l'absence du défaut (Figure IV.6), dans ce qui suit, nous allons décrire chacun de ces matériels.



Figure IV.6 : Analyseur d'impédance Agilent 4294A, capteur courant de Foucault et structure testée

IV.3.1.1. Source d'alimentation et acquisition de données :

L'analyseur d'impédance est le Agilent 4294A qui fournit le courant d'alimentation au capteur et permet de mesurer l'impédance à ses bornes.

IV.3.1.2. Capteur réalisé :

Le type de capteur utilisé pour le contrôle de surface plane est un capteur pancake qui possède les caractéristiques suivantes:

$$\varphi_{\text{inter}} = 2\text{mm}$$

$$\varphi_{\text{exter}} = 10\text{mm}$$

Hauteur : 1.5mm

Nombre de spires $N = 120$ spires

Nombre de Couches : 2 couches

IV.3.1.3. Matériaux contrôlés :

Ces tests sont effectués sur des pièces planes sans défaut et avec défaut qui sont les suivantes :

- Pièce en cuivre d'épaisseur (2mm) et de conductivité (58Ms/m) sans défaut et une autre représentant un défaut de diamètre (3.23mm).

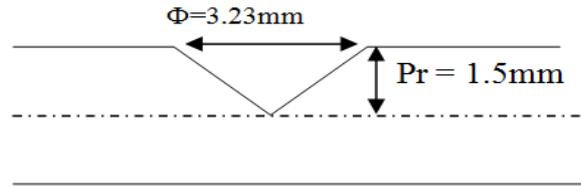


Figure IV.7 : Défaut de pièce

IV.3.2.Résultats et interprétations :

Les résultats obtenus par l'analyseur d'impédance Agilent 4294A au laboratoire IREEMA de saint Nazaire, les tests ont été effectués avec le capteur pancake pour différentes fréquences allant de (50Hz à 40 MHz) pour une pièce en cuivre avec et sans défaut.

➤ Résultats obtenus pour une pièce en cuivre sans et avec défaut :

Ce test est effectué sur une pièce en cuivre de conductivité (58Ms/m) et d'épaisseur (2mm) sans défaut, et une pièce de même caractéristique représentant un défaut de (3,23mm) pour 5 fréquences, voir Tableau IV.2.

	Cu0_50Hz		Cu_SD_50Hz		Cu_D_50Hz	
Freq	RO	XO	RSD	XSD	RD	XD
5,00E+01	1,41E+00	1,83E-02	1,41E+00	1,80E-02	1,42E+00	1,74E-02
1,00E+03	1,41E+00	3,75E-01	1,45E+00	3,62E-01	1,45E+00	3,63E-01
5,00E+04	1,60E+00	1,87E+01	2,73E+00	1,03E+01	2,62E+00	1,10E+01
1,00E+05	2,14E+00	3,74E+01	3,74E+00	1,99E+01	3,57E+00	2,15E+01
8,00E+05	3,62E+01	2,82E+02	3,15E+01	1,32E+02	3,02E+01	1,47E+02

Tableau IV.2 : Mesure à vide, sans défaut et avec défaut sur la pièce de cuivre

Après le calcul des paramètres d'impédance, on a obtenu les résultats présentés sur le tableau IV.3.

fréquence(Hz)	z0	Zsd	Zd	delta z	delta X	delta R	phi
5,00E+01	1,4088964	1,41381763	1,41606143	0,0022438	-5,61E-04	2,25E-03	0,01231789
1,00E+03	1,46041906	1,49753213	1,49246511	-0,00506701	4,50E-06	-5,22E-03	0,24534261
5,00E+04	18,7845142	10,6383471	11,3468332	0,7084861	7,56E-01	-1,04E-01	1,33765134
1,00E+05	37,4446359	20,2840433	21,8017285	1,51768521	1,57E+00	-1,72E-01	1,36799101
8,00E+05	284,29454	135,822898	149,715562	13,8926634	1,45E+01	-1,37E+00	1,36799101

Tableau IV.3 : Calcul des paramètres de variation d'impédance (ΔZ , ΔR , ΔX , ϕ)

Dans le tableau IV.3, on constate pour chaque fréquence une variation de tous les paramètres d'impédance du capteur ΔZ , ΔR , ΔX , ϕ , par exemple pour la fréquence 50Hz, la valeur l'impédance sans défaut ($Z_{sd}=1,41381763$) est différente de celle avec défaut ($Z_d=$

1,41606143) et c'est la même remarque pour le ΔR , ΔX et φ de plus cette variation est plus grande pour des fréquences plus élevées.

L'apparition d'une variation d'impédance nous donne alors une information sur l'état de la pièce, dans notre cas la présence du défaut est donc détectable par variation d'impédance.

IV.4. Conclusion :

Dans ce IV chapitre, nous avons interprété les résultats obtenus pour les deux méthodes de diagnostiques, la première est l'analyse vibratoire d'une machine asynchrone dont la quelle on a réussi à détecter le défaut (fréquence et amplitude) par analyse fréquentielle pour défaut de court circuit de spire au stator et défaut de cassure de barre au rotor, et par analyse d'enveloppe le défaut de roulement. La deuxième est le contrôle de pièce par courant de Foucault qui nous amenait à l'utilisation des hautes fréquences pour une détection de présence de défaut proche du capteur, le défaut est décelable par une variation d'impédance mesuré sur le capteur.

Conclusion générale :

L'objectif de ce travail est d'abord d'étudier les méthodes de diagnostics d'une manière générale. Ensuite d'étudier en détails la détection de défaut en utilisant deux méthodes, l'analyse vibratoire le contrôle non destructif par courant de Foucault

Dans un premier temps, nous avons donné une brève présentation des méthodes usuelles du contrôle non destructif ainsi que leurs avantages et inconvénients, pour entamer l'objectif de notre travail nous avons énuméré les différents défauts qui peuvent endommager un équipement. Ensuite, nous avons présenté d'une manière détaillée les deux méthodes de diagnostic, l'analyse vibratoire et le contrôle non destructif par courant de Foucault.

L'Analyse vibratoire est une méthode qui permet de détecter des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Elle est basée sur l'analyse de la réponse fréquentielle. Nous avons simulé des défauts sur une machine asynchrone et à l'aide de l'analyse spectrale et d'enveloppe, on a pu déterminer la fréquence caractéristique de défaut pour un court circuit au stator, une cassure de barre au rotor et un défaut de roulement.

Le contrôle non destructif par courant de Foucault est l'un des contrôles les plus fiables à mettre en œuvre. La seule restriction qu'il impose est qu'il ne s'applique qu'aux matériaux conducteurs, dans notre travail nous avons pu constater la présence du défaut grâce à la variation d'impédance ΔZ .

Les défauts doivent faire l'objet d'une attention particulière. Leur détection permet de prévenir la destruction des équipements en fonctionnement et d'augmenter la fiabilité des produits industriels. Différents secteurs industriels imposent le diagnostic des défauts pour éviter les pannes ayant pour conséquence des arrêts de production induisant des pertes économiques.

Bibliographie :

- [1] : Ala-Edinne L., Etude et modélisation de capteurs en cnd par courant de Foucault :application à la détection des fissures, thèse de MAGISTER ,Université de Biskra,2011.
- [2] : Ravat C.,Conception de multicapteurs à courant de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif, thèse de doctorat, Université Paris-Sud,2008.
- [3] : Zemouri N., Etude et réalisation d'un système multiplicateurs destinés au diagnostic des matériaux conducteurs, Mémoire Magister, Université de Tizi-ouzou, 2016.
- [4] : El Ghoul I.N., Réalisation d'un banc d'essais pour l'inversion des signaux en contrôle non destructif par courant de Foucault, thèse de doctorat, Université de Biskra,
- [5] : Bensana T ., Diagnostic des défaillances basé sur l'analyse vibratoire d'une turbine à vapeur, Memoire MAGISTER, Université de Annaba, 2008.
- [6] : Bouali F., Utilisation d'une méthode semi-analytique pour l'étude du contrôle non destructif en régime pulsé, Mémoire de MAGISTER, Université de Tizi-ouzou, 2010.
- [7] : Zaidi H.,Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courant de Foucault :application aux capteurs souples, thèse de doctorat, Université Paris-Sud,2012.
- [8] : Mouloud A., Recherche de signatures robustes des défauts dans une machine tournante à travers l'analyse de signaux vibratoires, thèse de doctorat, Université de Setif,2015.
- [9] : Allal A., Grandeurs non invasives pour le diagnostic des machines asynchrones, Mémoire MAGISTER, Université de Setif, 2010.
- [10] : Rahmoune C., Analyse et traitement du courant statorique pour la détection des défauts dans les systèmes électromécaniques, Mémoire MAGISTER, Université de Boumerdes ,2011.
- [11] : Boudinar A. H. et Benouzza N. et Bendiabdellah A., diagnostic des défauts de roulements d'un moteur asynchrone, Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., 60, 1, p. 39–48, Bucarest, 2015.
- [12] : <http://www.hellopro.fr/capteur-de-courant-2009890-fr-1-feuille.html>.
- [13] : Vaseghi B.,Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre-
spires-Modélisation-Réduction du courant de défaut, thèse doctorat, université Nancy, 2009
- [14] Ceban A., Méthode globale de diagnostique des machines électriques, thèse doctorat, université de Lille de nord de France, 2012.
- [15] :Bouguerne A., Diagnostique automatique des défauts des moteurs asynchrones, Mémoire MAGISTER, université Constatine, 2009.

- [16] : Bichari M., Système de diagnostic des défaillances des machines électriques, Mémoire MAGISTER, Université de Batna, 2012.
- [17] : Chiara Z., Contrôle non destructif par courant de Foucault de milieux ferromagnétiques : de l'expérience au modèle d'interaction, thèse de doctorat, Université de Paris-Sud, 2012.
- [18] : Slimane W., Conception d'un système Multi-capteur à courant de Foucault pour le contrôle non destructif(CND), thèse de Magister, Université de Batna, 2008.
- [19] : Zerguini S., Elaboration de modèles électromagnétiques caractérisant le contrôle non destructif par courant de Foucault, thèse de doctorat, Université de Constantine,
- [20] : Benhadda N., Modélisation et étude pour la réalisation d'un capteur à courant de Foucault en mode différentiel pour le contrôle non destructif(CND),thèse de doctorat, Université de Batna,2015.
- [21] : Bouzidi A., Etude du contrôle non destructif par courant de Foucault pulsés en utilisant les circuits électromagnétiques couplés, thèse doctorat, université de bejaia, 2013.
- [22] : Thollon F.,conception et optimisation de capteurs à courant de Foucault pour la détection de défauts profonds dans des matériaux amagnétiques, thèse de doctorat, Ecole doctorale de Lyon,1995.
- [23] : Ghemari Z., Modélisation et simulation d'un capteur de vibration (Accéléromètre), Memoire MAGISTER, Université de Annaba , 2006.
- [24] : Hachemi M ., Application de l'ODS à l'analyse des problèmes de vibration des machines tournantes, Mémoire MASTER, Université de Tlemcen, 2012.
- [25] : Djebili O., Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement, Thèse de doctorat, Université de Reims , 2013.
- [26] : Landoulsi F., Cours de techniques de surveillance, institue supérieur des études technologiques de Nabeul, Tunisie, 2011.
- [27] : Oulmane A ., Surveillance et diagnostic des défauts des machines tournantes dans le domaine temps-fréquences utilisant les réseaux de neurones et la logique floue, Thèse de doctorat, Université de Montréal, 2014.
- [28] : Imaouchen Y.,Mesure et analyse vibrations des machines électriques tournantes, thèse de doctorat, université de Bejaia,2015.