

M/531.647

Université du 8 mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire du fin d'étude

Présenté par : AMARA MADI Zakaria

Master

Option : Maintenance Industrielle

***Détection des défauts dans un moteur
asynchrone par l'analyse vibratoire et par
thermographie***

Sous la Direction de :

Pr. OUELAA N

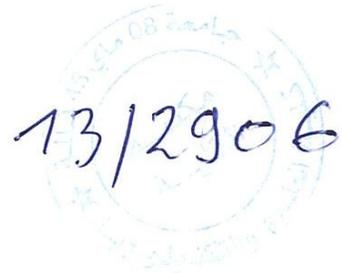
Dr. MOUSSAOUI A

Année universitaire 2012/2013

Résumé

Les opérations de maintenance indispensables au bon fonctionnement des machines tournantes (moteur asynchrone), sont généralement basées sur des techniques d'analyses du comportement qui peuvent caractériser les états normaux et anormaux d'une machine. En effet les défauts les plus dangereux sont générés à partir des éléments tournants (rotors, disques, roulements, engrenages, accouplements, courroies, cassure de barres rotoriques...), nous avons utilisé dans ce travail deux techniques de détection des défauts qui peuvent se produire dans les moteurs asynchrones, ces techniques sont l'analyse vibratoire et la thermographie infrarouge.

Mots clés : Détection des défauts/moteur asynchrone/défaut de roulement/cassure de barre rotorique/analyse vibratoire/thermographie.



Résumé	
Table des matières	
Principaux symboles	
Introduction générale	

Chapitre I

I. 1. Introduction.....	6
I. 2. Synthèses bibliographique.....	6

Chapitre II

II. 1. Introduction.....	14
II. 2. Caractéristiques du moteur.....	15
II. 3. Schéma cinématique du banc d'essais.....	15
II. 4. Banc d'essai et matériels des mesures.....	16
II. 5. Calcul cinématique.....	17
II. 6. Analyse des résultats.....	19
6. 1. Moteur sain.....	19
6. 2. Moteur avec trois barres cassées.....	21
6. 3. Fréquences d'encoche.....	26
II. 7. Conclusion.....	27

Chapitre III

III. 1. Introduction.....	28
III. 2. Caractéristiques de roulement.....	28
III. 3. Calcul numérique	29
III. 4. Interprétations des résultats.....	30
4. 1. Cas sans défaut.....	30
4. 2. Cas d'un petit défaut.....	30
4. 3. Cas d'un moyen défaut.....	33
4. 4. Cas d'un grand défaut.....	36
IV. 5. Conclusion.....	38

Chapitre IV

IV. 1. Introduction	39
IV. 2. Notions de température.....	39
IV. 3. La caméra infrarouge.....	39
3. 1. Principe	40
3. 2. Fonctionnement	40
IV. 4. Le rapport d'analyse	40

IV. 5. Contraintes d'utilisation.....	40
IV. 6. Avantages.....	41
IV. 7. Applications de la thermographie infrarouge.....	41
7. 1. Contribution de la thermographie.....	41
7. 2. Type d'Applications	41
7. 2.1. Matériaux et mécanique du solide.....	41
7. 2.2. Electrotechnique et électronique.....	41
7. 2.3. Industrie automobile et des transports.....	42
7. 2.4. Industrie du verre.....	42
7. 2.5. Papier, textile et plastique.....	42
7. 2.6. Médical et pharmaceutique.....	42
7. 2.7. Maintenance et prévention.....	43
7. 2.8. Maintenance électrique.....	43
7. 2.9. Maintenance mécanique.....	43
7. 2.10. Pétrochimie.....	43
IV. 8. Matériel utilisé.....	44
8. 1. Caméra infrarouge RAYCAM CA 1884.....	44
8. 2. Accessoires	45
IV.9. Partie expérimentale	46
9. 1. Moteur	46
9. 2. Palier.....	49
IV. 10. Conclusion.....	52
Conclusion générale	53
Référence bibliographique.....	54

Principaux symboles

g : glissement

p : nombre de pair de pôle

F_B : fréquence de défaut de la barre rotorique

F_A : fréquence d'alimentation

F_S : fréquence de rotation théorique

F_R : fréquence de rotation

F_{enc} : fréquence d'encoche

F_{BE} : fréquence du défaut de la bague extérieur

F_{BI} : fréquence du défaut de la bague intérieur

F_B : fréquence du défaut de l'élément roulant

F_C : fréquence du défaut de la cage

D_m : diamètre moyen

d : diamètre d'élément roulant

Introduction générale

A l'heure actuelle, de plus en plus d'industriels se tournent vers des techniques d'analyse tels la thermographie infrarouge et l'analyse vibratoire afin d'obtenir une disponibilité accrue de leurs machines, ils contrôlent l'état réel de leurs équipements (machines tournantes) afin d'éviter des arrêts non planifiés dus aux pannes.

Dans notre travail on va détecter le défaut des barres rotoriques et de roulement avec deux techniques qui sont l'analyse vibratoire et la thermographie infrarouge, notre travail est décomposé en quatre chapitres.

Le premier chapitre consiste à faire une recherche bibliographique sur la détection des défauts du moteur asynchrone.

Le deuxième chapitre consiste à détecter les défauts des cassures de trois barres rotoriques d'un moteur asynchrone par la mesure du niveau vibratoire.

Le troisième chapitre est dédié à la détection du défaut de la bague extérieure d'un roulement, pour détecter ce défaut, nous avons utilisés plusieurs méthodes qui sont la méthode de l'enveloppe, l'analyse spectralc et la transformée en ondelettes.

Le dernier chapitre consiste à la détection des défauts précédents par la technique de la thermographie infrarouge.

Chapitre I

Recherche bibliographique

I. 1. Introduction

Les moteurs asynchrones tiennent une place importante dans les équipements industriels. De plus, ce dispositif a une place critique dans l'industrie. Cette criticité génère des contraintes croissantes en termes de sûreté de fonctionnement et de taux de disponibilité, nécessitant une surveillance accrue et donc le développement d'outils de diagnostic de plus en plus performants.

Les contraintes en terme de fiabilité, de disponibilité et de sûreté de fonctionnement des moteurs asynchrones imposent aux industriels, qu'ils soient constructeurs ou utilisateurs, de mettre en place une stratégie de maintenance.

De nos jours, une maintenance efficace demande un système de surveillance sophistiqué permettant de prendre les décisions correctes au bon moment, en évitant les pannes et donc les arrêts de production non planifiés. C'est pour cette raison que l'industrie a de plus en plus besoin de méthodes et d'outils de plus en plus performants pour diagnostiquer et évaluer l'état de santé des moteurs asynchrones. Le but final étant d'optimiser la maintenance et donc le budget des investissements. De nos jours plusieurs méthodes de diagnostic efficace ont atteint le stade industriel, pourtant le diagnostic demeure encore un domaine où de nombreuses avancées restent encore à réaliser.

I. 2. Synthèses bibliographique

A. Aboubou et al [1]. Cet article présente une nouvelle approche pouvant être utilisée pour le diagnostic de barre(s) cassée(s) au rotor(s) dans les moteurs asynchrones de grandes puissances. La tension présente entre le neutre de la source d'alimentation et le neutre du moteur asynchrone lorsque celui-ci est connecté en étoile est analysée dans le domaine spectral en utilisant le périodogramme moyenné. Différents défauts de la cage rotorique (1 barre partiellement cassée et 1 barre cassée) ont été étudiés sous différents niveaux de charge.

Les résultats montrent que l'analyse de la tension entre le neutre de la source d'alimentation et le neutre de la machine asynchrone donne des informations efficaces sur l'état du moteur asynchrone et le spectre de puissance du courant statorique donne des informations moins pertinentes que le spectre de puissance de la tension.

A. Mellakhi et al [2]. Dans cet article, ils ont développé une technique maintenant répandue qui est l'analyse spectrale de la signature du courant statorique du moteur asynchrone à cage d'écureuil en vue de la détection d'un défaut au rotor, cassure de barres, en tenant compte des harmoniques d'espace. Le modèle de la machine utilisée est l'approche des multi circuits électriques couplés magnétiquement.

Les résultats montrent que l'analyse spectrale du courant statorique nous a permis d'identifier les signatures fréquentielles causées par la rupture des barres de la cage rotorique. 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 cage rotorique de la machine par la présence des harmoniques de fréquences. L'analyse de l'amplitude des harmoniques d'espace dans le spectre du courant statorique donne des informations supplémentaires non négligeables pour le diagnostic des défauts rotoriques.

B. Trajin [3]. Cet article traite le problème de la détection de défauts de roulements dans les entraînements à base de machine asynchrone par analyse des courants de phase statoriques. D'une part, il démontre que les défauts de roulements entraînent des oscillations du couple de charge à des fréquences caractéristiques du roulement. D'autre part, un modèle de courant statorique montre qu'en présence d'oscillations du couple de charge, il existe des modulations de phase sur ces courants. Ces modulations de phase se manifestent dans le domaine fréquentiel par l'apparition de composantes latérales sur le spectre du courant qui sont utilisées pour la détection des défauts de roulements. Pour mettre en place un schéma de détection efficace, il est impératif d'étudier les lois de variations des amplitudes de ces composantes en fonction de la fréquence de modulation considérée. La fonction de transfert électromécanique de l'entraînement qui relie l'amplitude de ces composantes latérales à la fréquence des oscillations de couple. Elle fait apparaître l'existence d'une résonance permettant d'amplifier les effets des oscillations de couple sur les courants statoriques et permet ainsi d'améliorer la qualité de la détection des défauts. Un indicateur de détection de défauts de roulements est donc présenté puis testé sur des roulements artificiellement dégradés. Finalement, l'indicateur est validé sur des roulements usés provenant du service après-vente d'un fabricant de machines.

M. Sahraoui et al [4]. Cet article présente trois méthodes dédiées à la détection des cassures de barres dans un moteur asynchrone triphasé à cage. Ces méthodes sont basées sur l'analyse spectrale (par FFT) des signaux du couple, de la vitesse et du courant statorique afin de déterminer leurs composition fréquentielle, et donc de retrouver les raies associées au défaut. Ils ont présenté un modèle multi-enroulement décrivant le comportement du moteur en présence de cassure de barres.

Les résultats montrés que la détection des défauts est plus aisée sur le courant statorique que sur la vitesse ou sur le couple. Cette constatation s'explique en partie par le fait que le courant statorique est plus accessible et mesurable extérieurement au moteur et en plus, l'harmonique de ce courant est plus sensible à la sévérité du défaut que celle du couple ou de la vitesse.

A. F. Khatir et al [5]. Cet article parle des défauts les plus étudiés, la rupture d'un barreau d'une machine asynchrone à cage fait sans doute partie des plus courants. Pour cela, il fallut s'orienter vers des modèles plus sophistiqués de type circuits multi enroulements pour une description adaptée aux défauts, que ce soit pour une simulation plus réaliste ou pour une utilisation dans la méthode de détection et localisation des défaillances.

Les résultats de cette étude montrent que les amplitudes des harmoniques associées au défaut, augmentent avec le nombre de barres cassées, la charge est un paramètre important à prendre en considération. En effet, le diagnostic des défauts devient plus délicat lorsque la charge est proche de zéro.

M. Benouzza et al [6]. Cet article présente une étude basée sur l'application de l'approche des vecteurs de Park à la détection des défauts des barres dans les moteurs d'induction triphasés. Afin de simuler le comportement du moteur avec défaut, un modèle mathématique est utilisé, dans lequel la cage est considérée comme étant un circuit maillé. Les résultats de simulation et expérimentaux obtenus montrent l'intérêt et l'efficacité de la technique proposée pour la détection des fractures des barres dans le moteur à cage d'écureuil. Cela est possible même dans le cas de cassure d'une seule barre rotorique.

F. Tafinine et al [7]. Dans cet article, ils ont développé une technique de diagnostic actuellement très répandue «l'analyse de la signature du courant statorique (MCSA) », ayant pour rôle de cerner l'apparition d'éventuelle raies caractérisant les défauts. Ce diagnostic sera établi sur la base d'une comparaison entre les mesures effectuées et un signal de référence (sain). Ils mettent l'accent sur la détection et la caractérisation d'un défaut au niveau des roulements à billes par l'analyse spectrale classique et ils présentent ensuite une des méthodes de classification appelée *Support Vector Machine* (SVM) dite aussi Séparateur à Vaste Marge pour la classification de ces défauts dans le but de la maintenance préventive en temps réel.

Les résultats montrés que la surveillance du courant statorique est un moyen promoteur qui permet d'obtenir des informations sur l'état de la machine asynchrone. La présence d'un défaut affecte le spectre du courant statorique soit en faisant apparaître des nouvelles raies spectrales, soit en modifiant l'amplitude des raies déjà présentés en fonctionnement normal.

C. Theys et al [8]. Dans cet article, ils montrent que la surveillance du courant statorique des machines à induction est une technique très classique pour obtenir des informations sur l'état de santé du moteur. En effet, la présence d'un défaut est caractérisée dans le spectre du courant statorique par l'apparition ou la modification de certaines raies. Une approche Bayésienne est proposée pour estimer les paramètres modifiés par l'éventuel défaut en tenant compte de l'a priori construit à partir des conditions de l'expérience. L'estimation est réalisée à partir d'échantillons de la densité de probabilité à posteriori des paramètres, générés par un algorithme de Monte Carlo par chaîne de Markov (MCMC).

Un schéma original Bayésien utilisant l'algorithme de Metropolis-Hastings pour estimer les paramètres des moteurs à induction a été proposé. L'introduction de densités à priori et d'un paramètre de régularisation permet d'améliorer l'estimation lorsque les valeurs du glissement sont proches de zéro.

A. Idir et al [9]. Cet article parle sur la détection de défaut au niveau du rotor de la machine à induction par le suivi des résistances rotoriques d'un modèle triphasé. Un

outil de détection des défauts rotoriques basé sur un observateur de Kalman étendu qui est utilisé pour tracer les paramètres précédents.

Le travail présenté dans cet article consiste à surveiller la machine asynchrone lorsqu'un défaut rotorique apparaît. Pour cela, ils ont développé l'outil de diagnostic basé sur l'observation de paramètres significatifs des défauts que peut subir une machine asynchrone. Un observateur de Kalman étendu a permis le suivi des résistances des trois phases rotoriques. Donc, ils peuvent servir comme une alarme indicatrice de défaut.

P. Granjon et al [10]. Cet article présente une nouvelle méthode de surveillance des actionneurs par l'analyse de leurs courants d'alimentation. La méthode proposée repose sur un modèle théorique de signature des défauts mécaniques dans les courants. Les traitements prennent également en compte la nature multi composante (triphasee) des grandeurs électriques à analyser. Les excellentes performances obtenues par cette approche sont illustrées à l'aide de données expérimentales. Les deux contributions majeures de ce travail de recherche sont les suivantes :

- le développement d'un modèle théorique qualitatif des signatures des défauts mécaniques de type excentricités rotoriques et variations de couple dans les courants d'alimentation de la machine,
- la prise en compte de la nature triphasée et donc multi-composante des grandeurs électriques, à la fois dans le modèle précédent et dans le traitement proposé à l'aide de la notion de vecteur d'espace.

Les résultats obtenus montrent que le fait de prendre en compte les trois courants de phase par l'intermédiaire du vecteur d'espace courant plutôt qu'un seul courant de phase présente plusieurs avantages importants :

- le vecteur d'espace fusionne les trois grandeurs de phase en une grandeur mono-composante contenant toute l'information portée par le système triphasé original.
- le vecteur d'espace contraint les composantes de fréquence positive (resp. négatives) à rester uniquement dans le domaine des fréquences positives (resp. négatives), et élimine donc la redondance d'information présente dans les DSP des courants de phase qui sont paires.

Toutefois, cet article n'a pas montré la validité pratique de cette approche que dans le cas d'un désalignement mécanique. Il reste donc à valider cette démarche pour d'autres types de défauts mécaniques.

A. Djebala et al [11]. Ils proposent dans cet article une méthodologie pour l'optimisation de l'utilisation des indicateurs scalaires dans le cadre de la surveillance vibratoire des machines tournantes, pouvant détecter d'éventuels défauts induisant des forces impulsives, notamment ceux des roulements et des engrenages. En effet ces indicateurs sont un outil favori des praticiens, offrant un verdict rapide sur l'état de fonctionnement des éléments ce qui permet une intervention précoce sans avoir recourt

à une post-analyse. En pratique, différents paramètres font en sorte que la fiabilité de ces indicateurs est limitée. L'objectif de ce travail est avant tout un choix optimal d'un indicateur sensible aux défauts induisant des chocs ainsi que l'optimisation des différents paramètres intervenants rendant ainsi aux indicateurs scalaires toute leur fiabilité de détection.

A partir d'un modèle théorique ils ont montré qu'un mauvais choix de certains paramètres peut réduire considérablement la sensibilité du kurtosis, ou un bon choix permet par contre de lui rendre toute sa fiabilité.

Les résultats expérimentaux, obtenus à partir de signaux d'accélération mesurés sur des roulements endommagés, valident les fondements théoriques. Une vitesse de rotation faible, une bande de fréquence large et un filtrage passe-bande aux hautes fréquences semble la combinaison idéale pour avoir un kurtosis maximal et par suite permettre la détection la plus précoce possible.

R. Hubert [12]. Le moteur asynchrone triphasé est maintenant largement utilisé dans des applications nécessitant une vitesse variable. Il peut faire appel à des commandes de type scalaire ou vectoriel. Ces machines ont la réputation d'être robustes, d'être adaptées à des applications de forte puissance. Cependant, malgré les qualités évoquées, il n'est pas rare que ces moteurs présentent quelques défaillances émanant d'un vieillissement prématuré. Aussi, il analyse quelques défauts les plus couramment rencontrés et les effets engendrés par ceux-ci.

Dans ce papier, il a fait état des différents défauts interférant sur le contenu spectral du courant absorbé par le moteur asynchrone. Ces défauts peuvent être d'origine mécanique ou électrique. Il a mis l'accent sur les fréquences induites car la technique la plus répandue de nos jours est basée sur l'analyse spectrale du courant statorique (MCSA : Motor Current Signature Analysis). Néanmoins, il faut être vigilant pour ne pas commettre d'erreur dans la conclusion. Elle est d'autant plus délicate qu'elle repose sur l'analyse et l'interprétation de la présence de fréquences et de l'évolution de l'amplitude de celles-ci.

M. Boumahdi et al [13]. Cet article est consacré à l'étude de l'apport des arbres de décision dans la détection de défauts de roulements. La méthodologie proposée est basée sur l'extraction des règles de décision dans un processus de détection de défauts de roulements à partir de la valeur de plusieurs indicateurs tels que le Kurtosis, le facteur de crête ou la valeur efficace. Ces valeurs sont issues de l'analyse statistique des signaux vibratoires obtenus expérimentalement à l'aide d'accéléromètres piézo-électriques.

Dans cette étude, l'algorithme de classification C4.5 a été proposé pour représenter les indicateurs de détection et d'identification des défauts de roulement graphiquement sous forme d'un arbre. Les valeurs de taux de classification et de Kappa statistique, indiquent que les arbres obtenus ont modélisé parfaitement l'état de roulement. De plus, ces arbres ont permis de définir des seuils pour le de Kurtosis et le RMS. La combinaison des indicateurs de détection et d'identification ainsi que la combinaison de l'état de défaut et le niveau de sévérité ils ont permis d'obtenir des arbres de

décision de petites tailles. Finalement, ils ont noté qu'il faut introduire les défauts de cage et de billes pour une modélisation complète de l'état de roulement.

M. Djouada et al [14]. Dans cette étude, ils proposent une comparaison des performances de la classification des défauts dans les machines tournantes à l'utilisation d'un couplage des réseaux de neurones artificiels (RNA) et les algorithmes génétiques. Les signaux vibratoires ont été traités pour extraire deux types d'indicateurs qui sont utilisés comme entrée au classificateur pour l'identification de quatre classes des défauts et la classe de fonctionnement sain (sans défaut). Les performances de la classification ont été examinées avant et après sélection des indicateurs par les algorithmes génétiques.

L'algorithme de sélection d'indicateurs utilisé permet de choisir un sous-ensemble optimal d'indicateurs d'un ensemble de caractéristiques obtenues par l'estimation de deux types d'indicateurs. Il s'agit d'une représentation parcimonieuse mais informative de 2 indicateurs sur les 20 initiaux du processus. L'algorithme génétique a permis de diminuer le nombre d'indicateurs nécessaire à une bonne classification. L'utilisation des techniques d'optimisation et de la classification par un réseau de neurone artificiel à côté du traitement du signal améliorer la surveillance des machines en détectant l'évolution d'un défaut dans le temps.

B. Badri et al [15]. Cet article présente une étude du comportement vibratoire des rotors tournants à hautes vitesses et supportés par des roulements. Un simulateur numérique de l'ensemble rotor-roulements, basé sur un modèle tridimensionnel à 20 degrés de liberté, permet de générer les réponses vibratoires des montées et descentes en vitesse, calculées au niveau des palliers contenant des roulements atteints de défauts localisés. La représentation de cette variation de vitesse est réalisée en temps-fréquence par la méthode de transformée de Fourier rapide (FFT). La particularité de ce simulateur est qu'il tient compte des effets gyroscopiques et de Coriolis qu'induisent les hautes vitesses de rotation du rotor flexible. La dérive des fréquences naturelles en régime transitoire en découlant est ainsi prise en compte. L'application de ce simulateur permet de déterminer les nouvelles vitesses critiques provoquées par les fréquences de défaut de roulements qui coïncident avec les fréquences naturelles du rotor qui varient aussi en fonction de la vitesse de rotation du rotor.

Les résultats montrent qu'en la présence de l'effet gyroscopique, le système étudié présente des zones d'instabilités qui varient avec la fréquence de rotation, contrairement au système initial (sans effet gyroscopique) qui ne présente qu'une seule résonance mesurée à l'arrêt. Les défauts de roulements vont alors créer de nouvelles fréquences critiques.

C. Pachaud [16]. L'analyse vibratoire ne permet pas de couvrir l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter une machine tournante notamment ceux induisant des fluctuations instantanées de couple ou de vitesse de rotation. Les techniques de traitement du signal à mettre en œuvre reposent essentiellement sur l'extraction des fonctions de modulation d'amplitude et de fréquence de la composante principale du

courant et sur l'analyse de Fourier de ces dernières. Cette extraction exige le respect de règles très strictes. Cet article expose l'intérêt et les modalités de mise en œuvre de cette technique d'investigation à partir de plusieurs applications industrielles.

Les principales difficultés de mise en œuvre dans l'industrie de cette technique d'investigation à des fins de surveillance et de diagnostics sont principalement dues :

-d'une part, à l'absence sur le marché de produits dédiés à une utilisation conviviale de cette technique et de normes ou de critères d'évaluation et à la place tout à fait insuffisante réservée dans les programmes de l'enseignement technique à ces techniques d'investigation,

-d'autre part, sur le plan organisationnel, au cloisonnement dans la plupart des unités de production des services de Maintenance mécanique, électrique et instrumentation/régulation.

A. Djebala et al [17]. Dans cet article, ils proposent l'analyse en ondelettes discrète en tant qu'outil efficace permettant une détection aussi claire en temporel qu'en fréquentiel. La méthode a été adaptée à cette fin à partir d'une simulation numérique sur un modèle mathématique. Les résultats montrent la capacité de l'AMRO à détecter des défauts de différentes tailles et natures et dans plusieurs configurations, y compris dans le milieu industriel. La validation expérimentale, réalisée bien évidemment sur des roulements défectueux, montre l'aptitude de cette méthode à détecter les défauts dans différentes configurations. Le traitement d'un nombre assez important de signaux mesurés sur un banc d'essais de laboratoire et sur des machines tournantes de production confirme parfaitement son efficacité.

S. Bachir et al [18]. Dans cet article, les auteurs proposent une nouvelle méthode d'estimation de la vitesse de la machine asynchrone à cage d'écureuil basée sur l'utilisation d'un Filtre de Kalman. La vitesse estimée est utilisée dans le diagnostic des courts circuits de spires au stator et de rupture de barres au rotor par identification paramétrique. La méthode globale de détection et de localisation des défauts stator/rotor est basée sur l'estimation des paramètres du modèle de défaut exprimé dans le repère de concordia et la reconstruction de la vitesse en utilisant uniquement les signaux électriques. Cette procédure de diagnostic a été validé partir d'essais expérimentaux.

V. Lenaerts [19]. Les méthodes de détection de défauts de roulement, basées sur l'analyse vibratoire, vont dans le sens de ces économies : elles permettent d'éviter des arrêts de production non programmés par une gestion en temps réel de l'état de la machine. Ainsi, différentes méthodes de détection (telles que la méthode de l'enveloppe ou la décomposition en valeurs singulières) permettent de prédire ces pannes. Cet article a pour objet de déterminer dans quelle mesure ces méthodes peuvent prévoir l'apparition du défaut précédant la panne ainsi que de comparer ces méthodes entre elles.

Les résultats montrent que la méthode de l'enveloppe permis de diagnostiquer aisément le défaut de piste interne. Cette méthode est robuste par rapport au bruit. La

transformée en ondelettes permet de résoudre le problème de « non stationnarité » et de « non périodicité » en représentant le signal dans le plan temps-fréquence. Celle-ci est donc très utile lorsque les signaux sont non stationnaires.

A. Mazioud et al [20]. Dans cet article, ils font une étude sur la détection et le diagnostic de défaut d'écaillage apparaissant sur un palier à roulement à billes. L'idée est de montrer la corrélation qui existe entre la température extérieure du palier et le niveau vibratoire généré par l'apparition croissante du défaut. Cette étude s'appuie d'une part sur une modélisation du comportement vibratoire du palier et d'autre part sur une modélisation thermique du transfert de chaleur entre les éléments roulants et la frontière extérieure du palier.

Ils ont mené une étude expérimentale sur un banc d'essai qui permet de faire apparaître de façon progressive le défaut d'écaillage de la bague externe d'un roulement à billes. Sur ce banc d'essai, ils mesurent simultanément la vibration mécanique en direction radiale (au moyen d'un accéléromètre piézoélectrique) et la température de la surface externe du palier (au moyen d'une caméra infrarouge). Ils montrent alors la corrélation qui existe entre ces deux informations.

Les résultats obtenus dans cette première étape sont encourageants quant aux objectifs qui étaient fixés. En effet d'une part le défaut vibratoire engendré au sein du roulement conduit à un échauffement de surface parfaitement quantifiable; d'autre part, la modélisation numérique met en évidence la corrélation entre défaut vibratoire et production de chaleur mais permet aussi de quantifier les flux mis en jeu.

Chapitre II

Diagnostic des cassures des barres dans un moteur asynchrone par l'analyse vibratoire

II. 1. Introduction

La machine asynchrone occupe maintenant une grande place dans les applications industrielles. On la rencontre dans les endroits les plus divers, dans des applications militaires, dans la propulsion électrique de véhicule, de tramways, de trains à grande vitesse voire même de bateaux. Le moteur doit supporter tant bien que mal ces ondes de tension et ces charges. De ce fait, on assiste à un vieillissement prématuré du moteur asynchrone. Il devient donc plus vulnérable et donc, plus sujet à être défaillant. Par conséquent, il nous faut nécessairement faire du diagnostic, de la surveillance, de la prévention afin d'améliorer la fiabilité d'un système dans son ensemble. Une variété importante de défauts peut se produire au rotor des machines asynchrones. Nous pouvons citer des défauts de type barres rotorique, défaut statorique ou bien encore des défauts d'excentricité statique et/ou dynamique entre le rotor et le stator de la machine. En fait, si ces défauts ne sont pas détectés, ils peuvent mener à des échecs potentiellement catastrophiques. Les conséquences d'un rotor défectueux peuvent être diverses. Nous pouvons citer comme exemples : un accroissement des vibrations du moteur, des performances au démarrage amoindries, des fluctuations sur le couple de charge ou encore une augmentation de la température au point de cassure et dans les bobinages statoriques.

La rupture d'une barre rotorique peut être induite par plusieurs facteurs, citons par exemple :

- Une augmentation de la température due à une surcharge de la machine,
- Des efforts magnétiques provoqués par les forces électromagnétiques, le bruit électromagnétique et les vibrations,
- Un effort résiduel dû aux problèmes de fabrication,
- Un effort dynamique résultant des couples d'axe, des forces centrifuges et des efforts de répétition,
- Des efforts environnementaux provoqués par la contamination et l'abrasion du matériel rotorique dues aux produits chimiques ou à l'humidité.

Tous ces problèmes impliquent un intérêt énorme pour leur analyse et diagnostic. Il y a diverses techniques proposées ces dernières années pour détecter un défaut au rotor des machines asynchrones. Une des approches bien connues pour la détection des barres cassées rotorique est basé sur la surveillance des courants de ligne pour détecter la présence de bandes latérales autour de la fréquence d'alimentation. D'autres méthodes existent pour la détection de barres cassées. Il est possible de détecter ce type de défauts grâce à l'analyse des harmoniques de couple, du flux externe.

II. 2. Caractéristiques du moteur

La machine asynchrone à cage d'écureuil utilisée pour les différents essais expérimentaux est une machine de 1.5 KW, accouplée à une charge (frein électromagnétique). Nous présentons respectivement le rotor sain et le rotor ayant trois barres cassées. Le perçage des barres rotoriques a été réalisé sur le rotor ce qui donne l'aspect réel d'une barre cassée.

Type	Mot 3 N 890-150-0964-0041
Tension	380 V
Puissance	1500 W
Nombre de paires de pôles	2
Nombre de barres du rotor	28
Vitesse de moteur	1500 (1420) tr/min
Fréquence d'alimentation (F_a)	50 HZ
Glissement	0.053HZ
Type de palier	Roulement
Type de roulement palier 1	SKF 6004 C3
- diamètre extérieur du roulement	42 mm
- diamètre intérieur du roulement	20 mm
- diamètre d'élément roulant	6.35 mm
- nombre d'élément roulant	9
- nombre de rangées	1
Type de roulement palier 2	SKF 6205 C3
- diamètre extérieur du roulement	52 mm
- diamètre intérieur du roulement	25 mm
- diamètre d'élément roulant	7.94 mm
- nombre d'élément roulant	9
- nombre de rangées	1

Tableau 2. 1: Caractéristique du moteur

II. 3. Schéma cinématique du banc d'essais

On montre sur la figure (2.1), le schéma cinématique du banc d'essai.

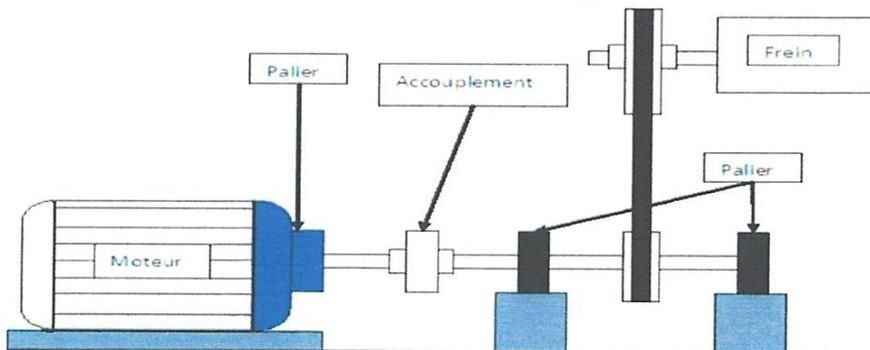


Figure 2. 1: Schéma cinématique du banc d'essai

II. 4. Banc d'essai et matériels des mesures

Le banc simuler divers types des défauts tels que : défauts des barres rotorique, défauts statorique, défauts d'excentricité, défauts de roulements, désalignements, balourd. Ce banc d'essais est d'une conception très simple permettant le montage et le démontage rapide du rotor.



Figure 2. 2: Banc d'essais

- **Moteur asynchrone à cage**
- **Accouplement élastique**
- **Le Pulse** : est un analyseur qui permet de mesurer les vibrations en direct, type d'analyseur Bruel&kjaer «3610-A-042»



Figure 2. 3: Photo du Pulse

- **Pc et logiciel** : Permet d'enregistrer les mesures et de traiter les données.
- **Les accéléromètres** : on a utilisée deux accéléromètres pour la mesure, un accéléromètre triaxial piézo-électrique de type «4524-B-001» et l'autre

industriel de type «4513-B-001», dont la fixation se fait par goujon ou par la cire d'abeilles sur les paliers de roulements.



Figure 2. 4: Accéléromètre triaxial



Figure 2. 5: Accéléromètre industriel

II. 5. Calcul cinématique

Les fréquences des défauts de barres cassées dépendent principalement des caractéristiques géométriques du moteur asynchrone et leurs vitesses de rotations, la fréquence du défaut de la barre rotorique cassée est donnée par l'expression suivante :

$$F_B = F_R \pm 2 * g * F_S$$

Avec F_R la fréquence de rotation réelle du moteur et F_S la fréquence de rotation théorique.

➤ Cas de $F_A = 24$ Hz

La fréquence de rotation théorique F_S du moteur est égale au rapport de la fréquence d'alimentation du courant F_A et le nombre de pair de pôle p .

$$F_S = \frac{F_A}{p} = \frac{24}{2} = 12 \text{ Hz}$$

Le glissement du moteur et la défroncer entre la fréquence d'alimentation et la fréquence de rotation:

$$g = \frac{F_S - F_R}{F_S} = \frac{12 - 11.844}{12} = 0.013$$

La fréquence de défaut de la barre rotorique :

$$F_B = 11.844 \pm 2 * 0.013 * 12 = 11.844 \pm 0.312 \text{ Hz}$$

La fréquence d'encoches :

$$F_{\text{enc}} = q_1 * R * F_R \pm q_2 * 2 * F_S \quad \text{Avec } q_1 = 1, 2, 3 \dots \text{ Et } q_2 = 0, 1, 2 \dots$$

$$F_{\text{enc}1} = 1 * 28 * 11.844 \pm 0 * 2 * 12 = 331.632 \text{ Hz}$$

$$F_{\text{enc}2} = 1 * 28 * 11.88 \pm 1 * 2 * 12 = 331.632 \pm 24 \text{ Hz}$$

Défaut barre cassée	$F_B = F_R \pm 2 * g * F_A$	11.844 ± 0.312 Hz	
Fréquences d'encoches	$F_{\text{enc}} = q_1 * R * F_R \pm q_2 * 2 * F_A$	331.632 Hz	
Défaut magnétique stationnaire	$F_R \pm \left(\frac{1}{F_R}\right)$	11.844 ± 0.084 Hz	
Balourd	$1 * F_R$	11.844 Hz	
Défaut de fixation	$1 *, 2 *, 3 * F_R$	11.844, 23.688, 35.532 Hz	
Jeu mécanique	$1 *, 2 * F_R$	11.844, 23.688 Hz	
Défaut désalignement	$2 * F_R$	23.688 Hz	
Electromagnétique	$1 *, 2 *, 3 * F_A$	24, 48, 72 Hz	
Défaillance du roulement		P ₁ (Hz)	P ₂ (Hz)
- Bague externe	$F_{BE} = \frac{z}{2} \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \alpha\right) * F_R$	42.377	42.446
- Bague interne	$F_{BI} = \frac{z}{2} \left(1 + \frac{d}{D_m} \cos \alpha\right) * F_R$	64.214	64.148
- Eléments roulants	$F_B = \frac{z}{2} * \frac{D_m}{d} \left(1 - \left(\frac{d}{D_m} \cos \alpha\right)^2\right) * F_R$	27.697	27.881
- Cage	$F_C = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \alpha\right) * F_R$	4.707	4.716

Tableau 2. 2: fréquences des déferent défauts pour la vitesse $F_S = 12 \text{ Hz}$

➤ Cas de $F_A = 36 \text{ Hz}$

Même chose:

$$F_S = \frac{F_A}{p} = \frac{36}{2} = 18 \text{ Hz}$$

Le glissement du moteur

$$g = \frac{F_S - F_R}{F_S} = \frac{18 - 17.891}{18} = 0.006$$

La fréquence de défaut de la barre rotorique :

$$F_B = 17.891 \pm 2 * 0.006 * 18 = 17.891 \pm 0.216 \text{ Hz}$$

La fréquence d'encoches :

$$F_{enc} = q_1 * R * F_R \pm q_2 * 2 * F_S \quad \text{Avec } q_1 = 1,2,3 \dots \text{ Et } q_2 = 0,1,2 \dots$$

$$F_{enc1} = 1 * 28 * 17.891 \pm 0 * 2 * 18 = 500.948 \text{ Hz}$$

$$F_{enc2} = 1 * 28 * 17.891 \pm 1 * 2 * 18 = 500.948 \pm 36 \text{ Hz}$$

Défaut barre cassée	$F_B = F_R \pm 2 * g * F_A$	17.891 ± 0.216 Hz	
Fréquences d'encoches	$F_{enc} = q_1 * R * F_R \pm q_2 * 2 * F_A$	500.948 Hz	
Défaut magnétique stationnaire	$F_R \pm \left(\frac{1}{F_R}\right)$	17.891 ± 0.055 Hz	
Balourd	$1 * F_R$	17.891 Hz	
Défaut de fixation	$1 *, 2 *, 3 * F_R$	17.891, 35.782, 53.673 Hz	
Jeu mécanique	$1 *, 2 * F_R$	17.891, 35.782 Hz	
Défaut désalignement	$2 * F_R$	35.782 Hz	
Electromagnétique	$1 *, 2 *, 3 * F_A$	36, 72, 108 Hz	
Défaillance du roulement		P ₁ (Hz)	P ₂ (Hz)
- Bague externe	$F_{BE} = \frac{z}{2} \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \alpha\right) * F_R$	64.013	64.117
- Bague interne	$F_{BI} = \frac{z}{2} \left(1 + \frac{d}{D_m} \cos \alpha\right) * F_R$	96.999	96.899
- Eléments roulants	$F_B = \frac{z}{2} * \frac{D_m}{d} \left(1 - \left(\frac{d}{D_m} \cos \alpha\right)^2\right) * F_R$	41.838	42.117
- Cage	$F_C = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \alpha\right) * F_R$	7.111	7.124

Tableau 2. 3: fréquences des différents défauts pour la vitesse F_S= 18 Hz

II. 6. Analyse des résultats

6. 1. Moteur sain

On a mesuré la vibration sur un moteur sain 'sans défaut' dans la bande de fréquence [0 -1600 Hz], on a fait des mesures pour une fréquence de rotation théorique F_S=12 Hz.



Figure 2. 6: Rotor sans défaut

Les figures (2.7, 2.8) présentes le signal et le spectre d'un moteur sain dans la direction radiale.

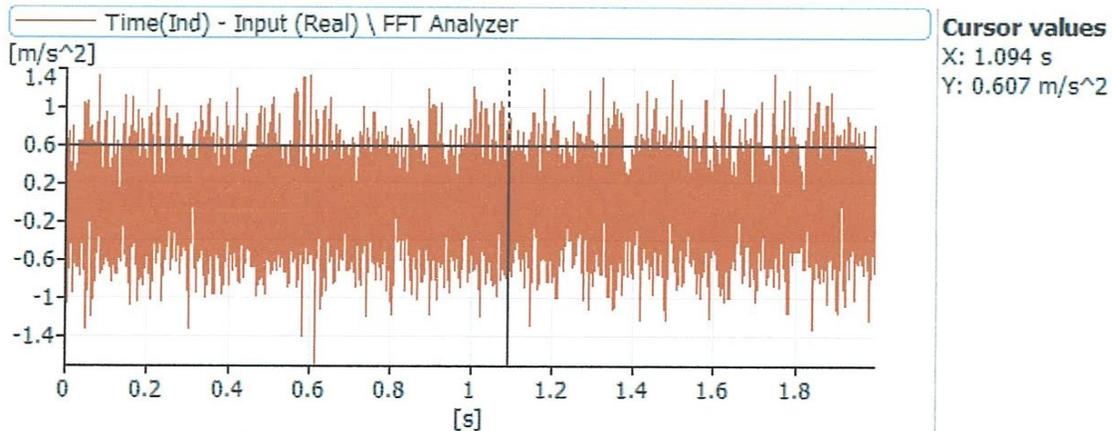


Figure 2. 7: Signal de vibration mesuré pour $F_s=12$ Hz dans la direction Radiale

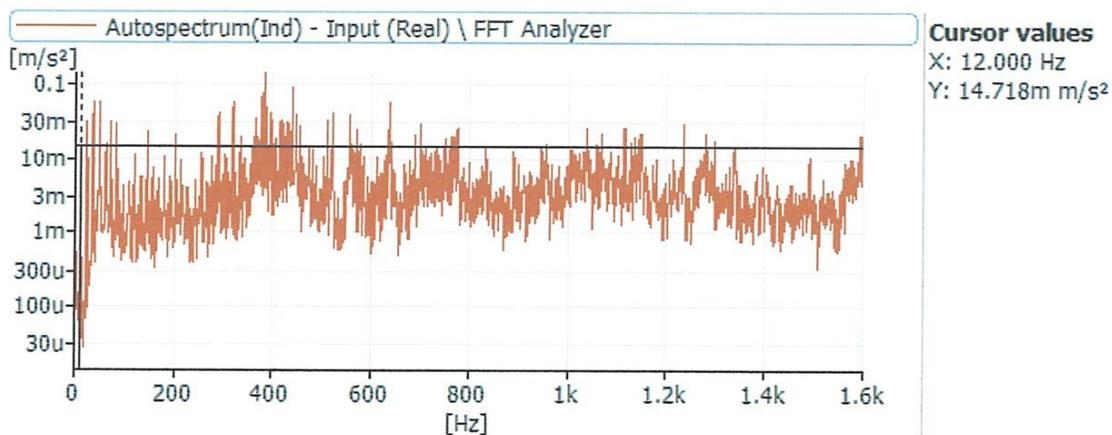


Figure 2. 8: Spectre de vibration mesuré pour $F_s=12$ Hz dans la direction Radiale

La figure (2.9) présente le zoom du spectre dans la figure (2.8), le zoom montre un léger désalignement, les amplitudes des harmoniques 2, 3 et 4 sont plus grandes que l'amplitude de la fréquence de rotation, mais il n'y a pas de présence du défaut de rotor.

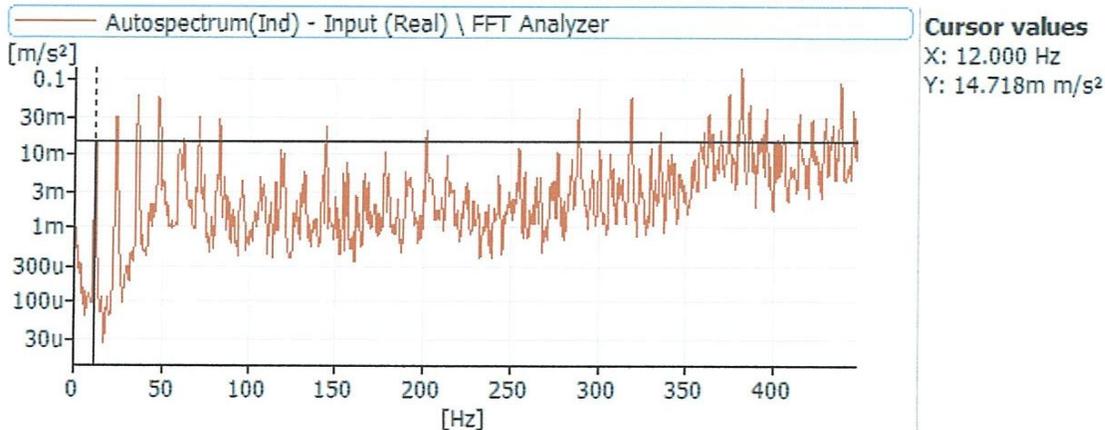


Figure 2. 9: Zoom du spectre de vibration mesuré pour $F_s=12$ Hz dans la direction Radiale

6. 2. Moteur avec trois barres cassées

On refait les mesures pour deux fréquences de rotation théorique $F_s=12$ et 18 Hz, mais cette fois ci avec un rotor défectueux '**trois barres cassées**'.

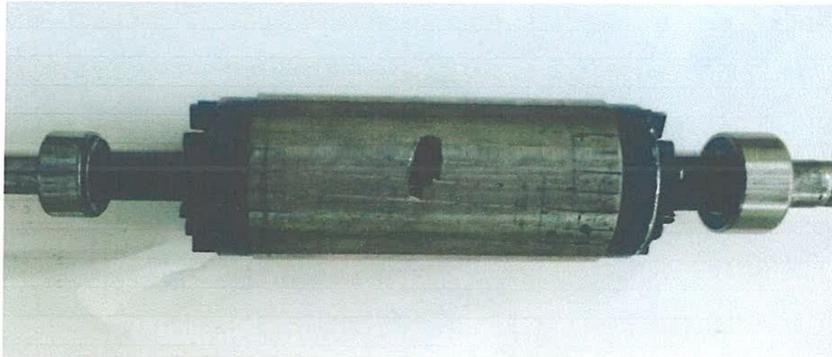


Figure 2. 10: Rotor défectueux

Les figures (2.11, 2.12) présentes un signal et un spectre d'un moteur défectueux dans la direction axiale et de vitesse $F_s=12$ Hz et $F_{max}=50$ Hz, le signal montre une apparition des impacts qui n'apparaît pas dans le signal précédent, et dans le spectre malgré le désalignement mais il y a des modulations de la fréquence de rotation et ses harmoniques.

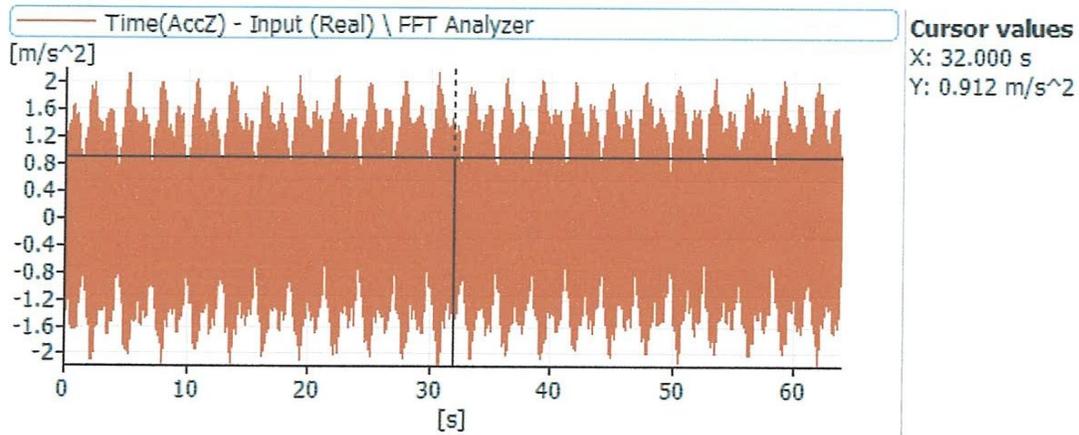


Figure 2.11: Signal de vibration mesuré pour $F_s=12$ Hz dans la direction Axiale

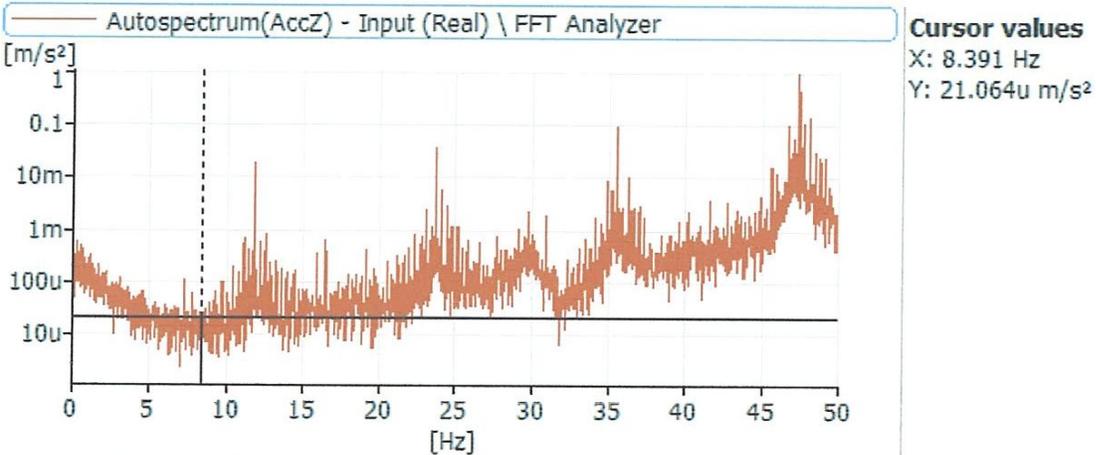


Figure 2.12: Spectre de vibration mesuré pour $F_s=12$ Hz dans la direction Axiale

La figure (2.13) présente un zoom du spectre de la figure (2.12), le zoom montre clairement les modulations ($\pm 2gF_s$) de la fréquence de rotation, ce qui confirme la présence d'un défaut dans la barre rotorique.

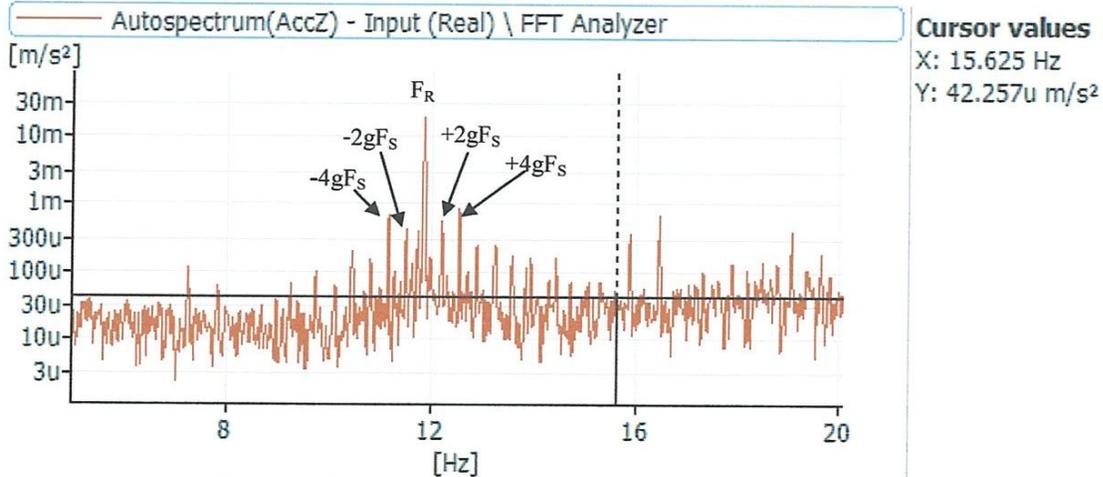


Figure 2.13: Zoom du spectre de vibration mesuré pour $F_s=12$ Hz direction Axial

Les figures (2.14, 2.15, 2.16) présente le signal, le spectre et un zoom du spectre pour une direction radiale et de même la fréquence de rotation, de la même façon on a montré que la fréquence de rotation et ses harmoniques sont modulés avec une fréquence de défaut.

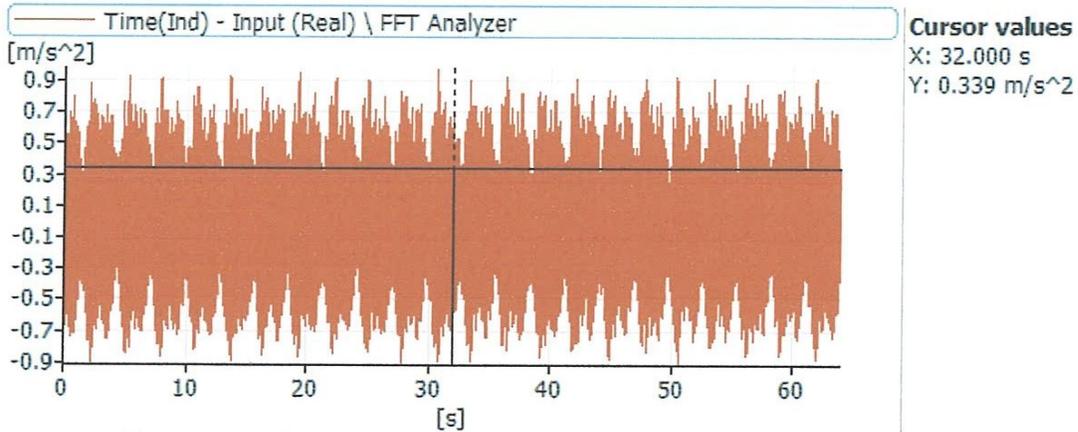


Figure 2. 14: Signal de vibration mesuré pour $F_s=12$ Hz dans la direction radiale

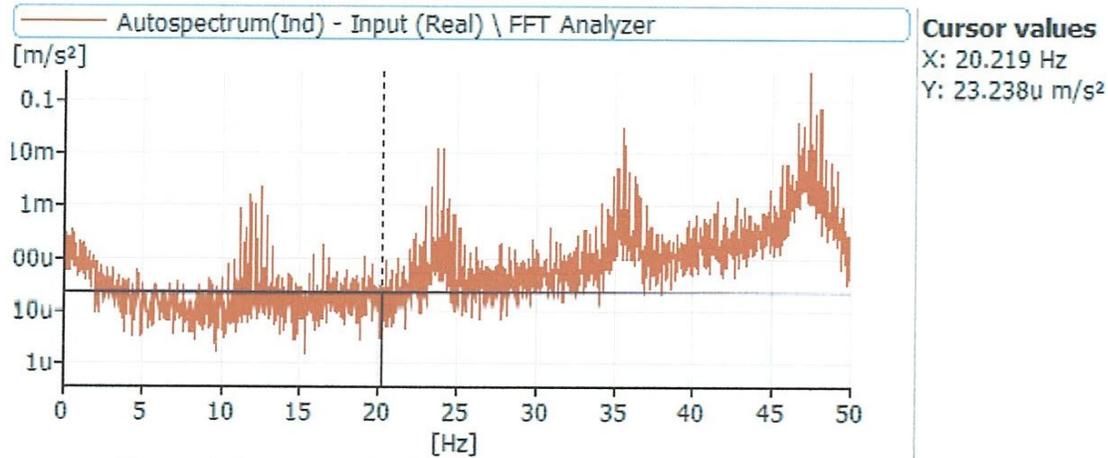


Figure 2. 15: Spectre de vibration mesuré pour $F_s=12$ Hz dans la direction radiale

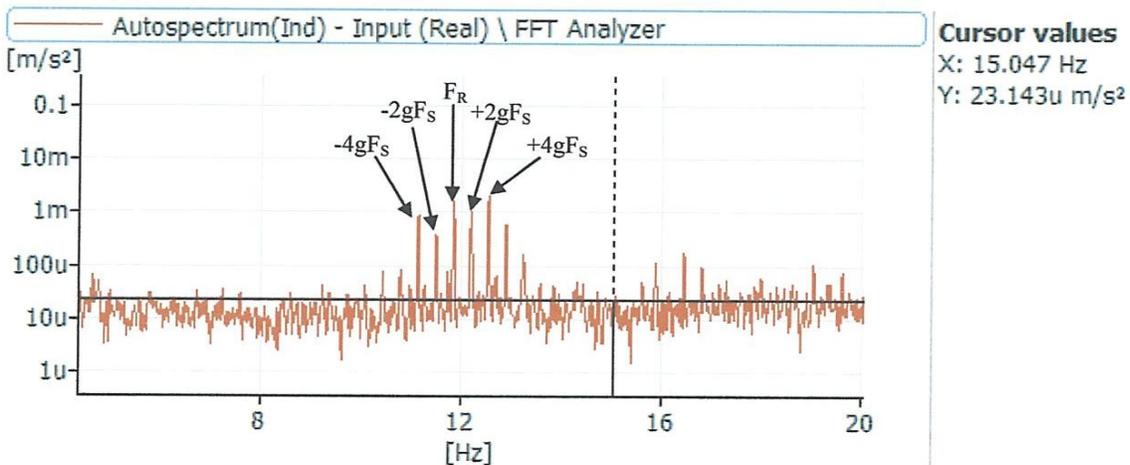


Figure 2. 16: Zoom du spectre de vibration mesuré pour $F_s=12$ Hz dans la direction radiale

On a refait la mesure pour une autre fréquence de rotation théorique $F_s = 18$ Hz et de même bande de fréquence et dans une direction axiale, même chose que les résultats précédent, le défaut apparaît facilement dans le zoom (figure 2.19).

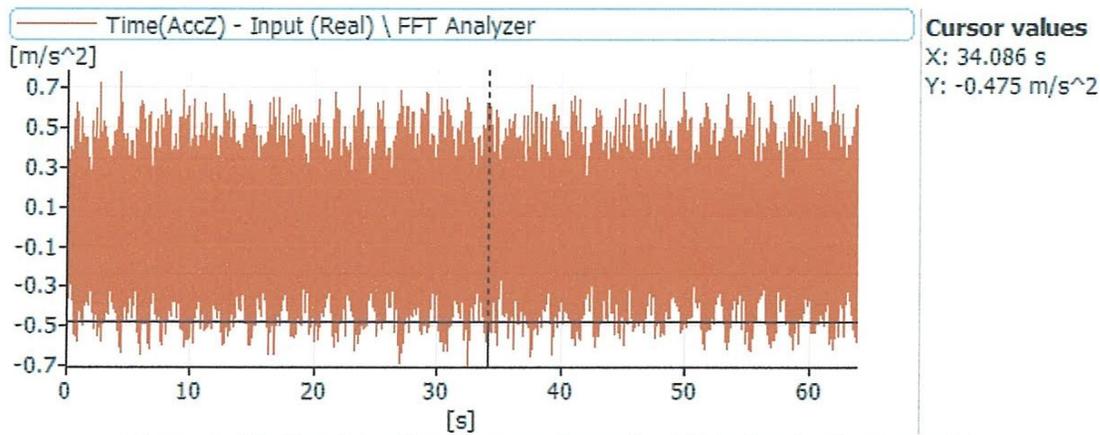


Figure 2. 17: Signal de vibration mesuré pour $F_s = 18$ Hz dans la direction axiale

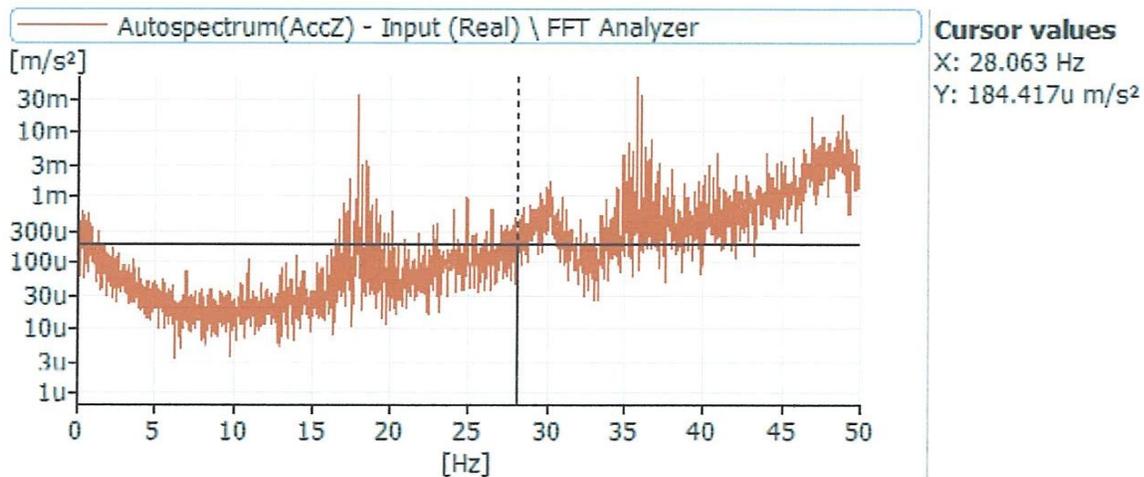


Figure 2. 18: Spectre de vibration mesuré pour $F_s = 18$ Hz dans la direction axiale

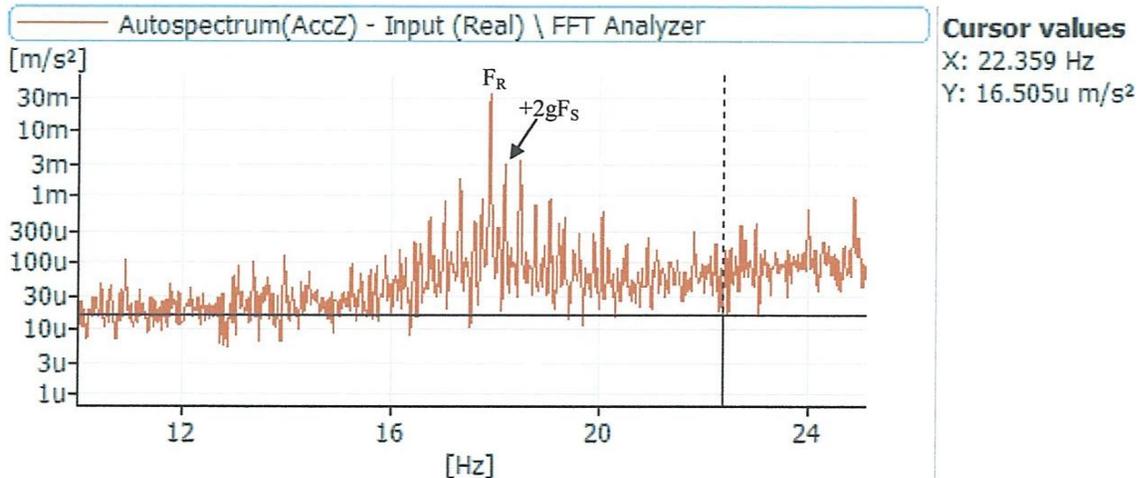


Figure 2. 19: Zoom du spectre de vibration mesuré pour $F_s = 18$ Hz dans la direction axiale

Même chose pour les figures (2.20, 2.21, 2.22).

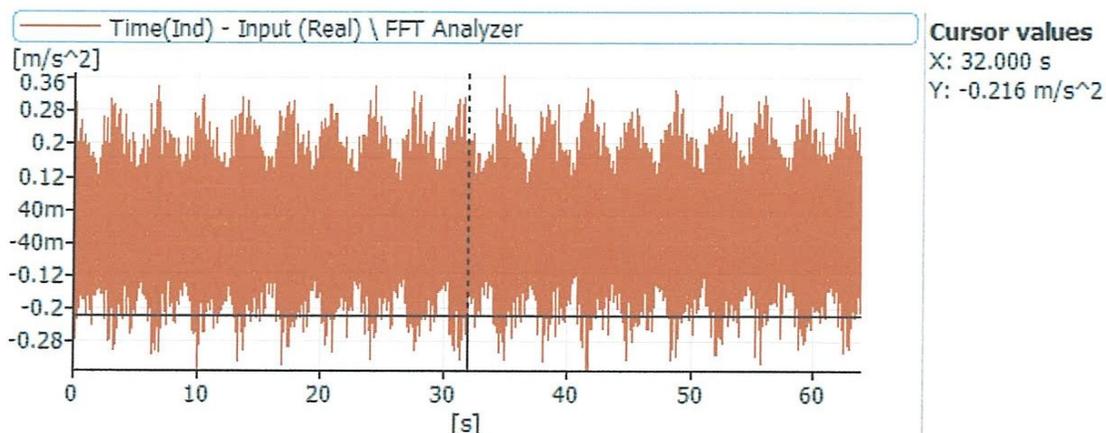


Figure 2. 20: Signal de vibration mesuré pour $F_s=18$ Hz dans la direction radiale

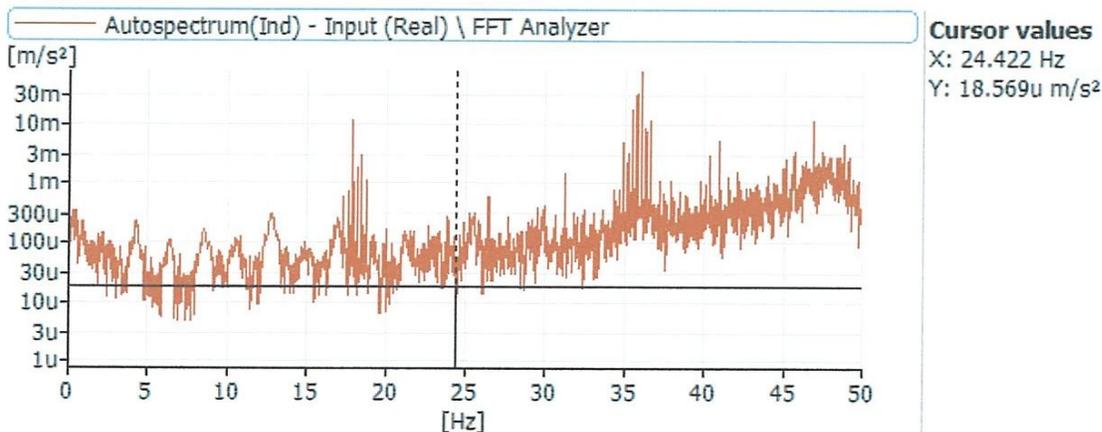


Figure 2. 21: Spectre de vibration mesuré pour $F_s=18$ Hz dans la direction radiale

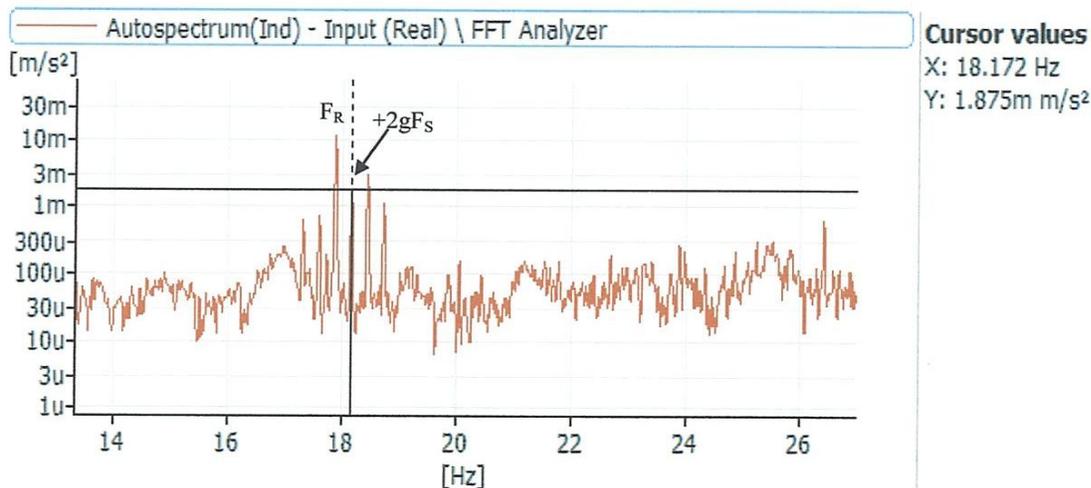


Figure 2. 22: Zoom du spectre de vibration mesuré pour $F_s=18$ Hz dans la direction radiale

6.3. Fréquences d'encoche

Sur les figures 2.23 et 2.24, on présente le spectre mesuré pour une vitesse $F_s=12$ Hz et $F_{max}=12800$ Hz dans la direction radiale et son zoom respectivement. Sur le zoom apparaît clairement la 36^{ème} harmonique de la fréquence d'encoche modulée par deux fois la vitesse de rotation théorique ($\pm 2 * F_s$).

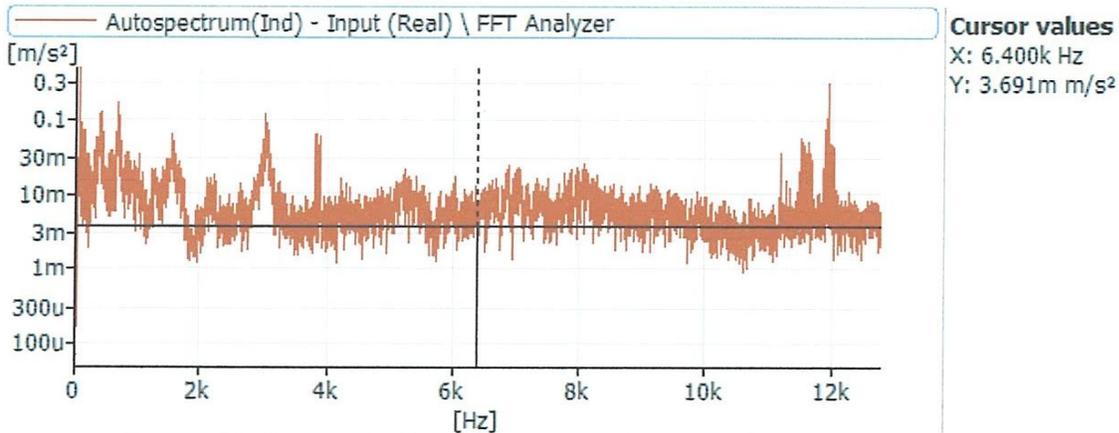


Figure 2. 23: Spectre de vibration mesuré pour $F_s=12$ Hz dans la direction radiale

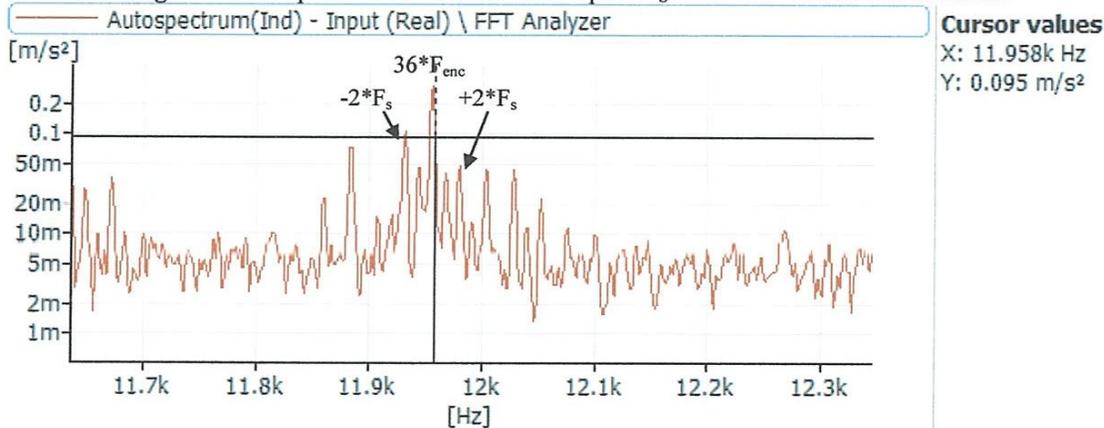
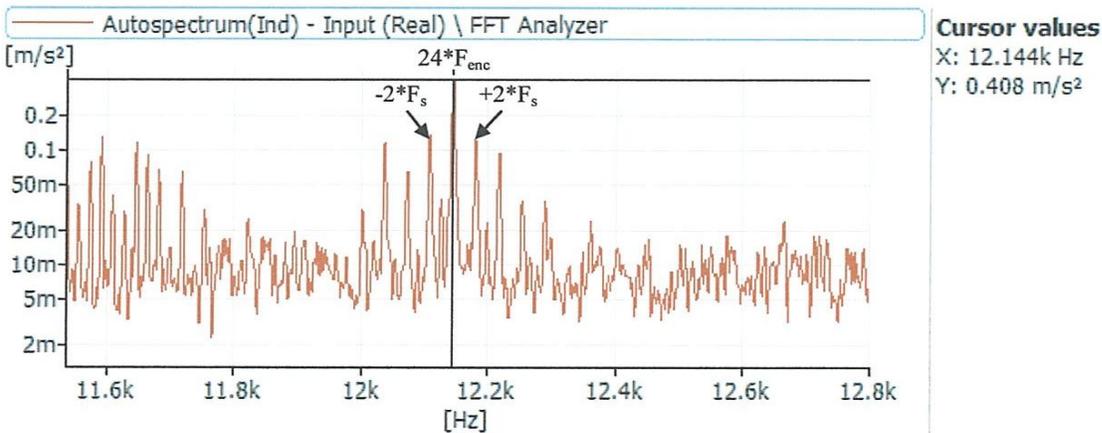
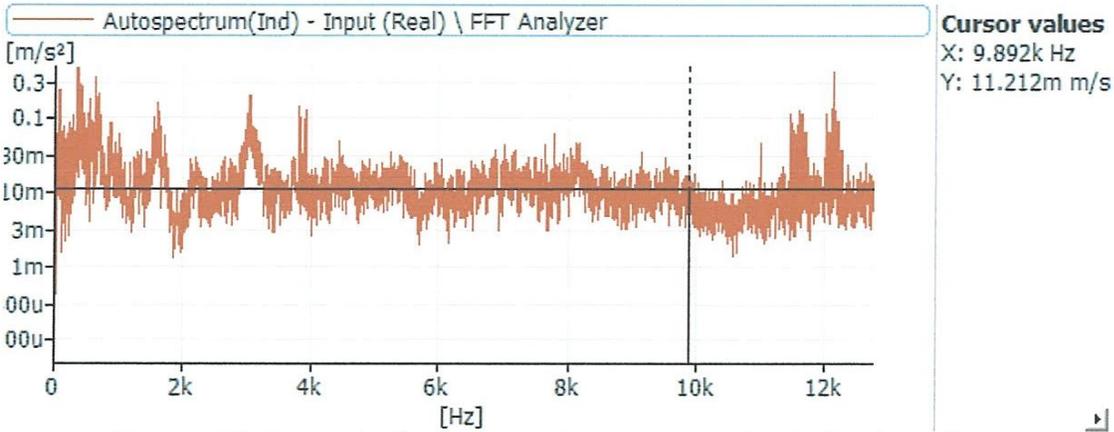


Figure 2. 24: Zoom du spectre de vibration mesuré pour $F_s=12$ Hz dans la direction radiale

De la même façon, on présente sur les figures (2.25, 2.26) le spectre et son zoom pour la vitesse $F_s=18$ Hz. On constate clairement que la 24^{ème} harmonique de la fréquence d'encoche est modulée par deux fois la vitesse théorique ($\pm 2 * F_s$).



II. 7. Conclusion

L'analyse spectrale nous a permis d'identifier les signatures fréquentielles causées par la rupture des barres rotorique. Elle permet de détecter la présence d'un défaut au niveau de la cage rotorique du moteur par une modulation des harmoniques de fréquence de rotation par la fréquence du défaut ($F_R \pm 2gF_S$).

Chapitre III

Diagnostic des défauts de roulement dans un moteur asynchrone par l'analyse vibratoire

III. 1. Introduction

Le roulement est un organe qui fait partie des éléments les plus sensibles des machines tournantes. La majorité des dégradations des roulements, hormis les erreurs de fabrication et la qualité des matériaux employés, sont liées à un montage incorrect, à une lubrification inadaptée, aux charges statiques et dynamiques et à cause de la sévérité du milieu ambiant. Pour assurer la sûreté de fonctionnement des machines (fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité), il est indispensable de mettre en place une maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire qui joue un rôle important dans le suivi de l'état de santé des machines tournantes en fonctionnement.

Pour le suivi de l'état des roulements, les outils utilisés peuvent être classés en deux catégories. Des outils propres à la surveillance (valeur efficace de l'accélération ou RMS, facteur de crête, Kurtosis) qui permettent, lorsque ces valeurs dépassent le seuil d'alerte, de détecter la présence d'une anomalie. Des outils propres au diagnostic (FFT, Spectre d'enveloppe, Cepstre) qui permettent d'identifier la signature vibratoire de chaque défaut ou composant de la machine en connaissant les fréquences caractéristiques des défauts.

III. 2. Caractéristiques de roulement

Le roulement utilisé dans notre expérimental est UC 204. Le roulement insert de palier auto-aligneur avec bague élargie des 2 côtés avec 2 joints 2 flasques et serrage par vis cuvette. Le tableau suivant affiche les caractéristiques de ce type de roulement.

<p>Caractéristiques principales</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Diam intérieur 20 mm - Diam extérieur 47 mm - Largeur BI 31 mm - Largeur BE 16 mm - Largeur totale 31 mm - Poids 0.17 kg - Température mini conseillée -40 ° C - Température maxi conseillée 110 ° C - Cage Acier
<p>Fréquences caractéristiques (Hz) à 60 tr/min pour bague intérieure</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Fréquence cage 0.382 - Fréquence corps roulants 2.018

tournante	<ul style="list-style-type: none"> - Fréquence bague extérieur 3.063 - Fréquence bague intérieur 4.936
------------------	--

Tableau 3.1: Caractéristique de roulement

III. 3. Calcul numérique

Les tableaux ses dessous affichent les fréquences des défauts de roulement pour les deux vitesses de rotation 12 Hz et 18 Hz.

➤ **Pour $F_R= 12$ Hz**

Défaillance du roulement		P (Hz)
- Bague externe	$F_{BE} = \frac{z}{2} \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \alpha \right) * F_R$	36.756
- Bague interne	$F_{BI} = \frac{z}{2} \left(1 + \frac{d}{D_m} \cos \alpha \right) * F_R$	59.232
- Eléments roulants	$F_B = \frac{z}{2} * \frac{D_m}{d} \left(1 - \left(\frac{d}{D_m} \cos \alpha \right)^2 \right) * F_R$	24.216
- Cage	$F_C = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \alpha \right) * F_R$	4.584

Tableau 3. 2: Fréquences des défauts pour $F_R= 12$ Hz

➤ **Pour $F_R= 18$ Hz**

Défaillance du roulement		P (Hz)
- Bague externe	$F_{BE} = \frac{z}{2} \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \alpha \right) * F_R$	55.134
- Bague interne	$F_{BI} = \frac{z}{2} \left(1 + \frac{d}{D_m} \cos \alpha \right) * F_R$	88.848
- Eléments roulants	$F_B = \frac{z}{2} * \frac{D_m}{d} \left(1 - \left(\frac{d}{D_m} \cos \alpha \right)^2 \right) * F_R$	36.324
- Cage	$F_C = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \alpha \right) * F_R$	6.876

Tableau 3. 2: Fréquences des défauts pour $F_R= 18$ Hz

III. 4. Interprétations des résultats

4. 1. Cas sans défaut

La figure 1 représente les résultats obtenus dans le cas sans défaut. Le roulement tourne à 12 Hz et les signaux sont mesurés dans la bande de fréquence [0-12800 Hz], chaque signal contient 16384 points. Le signal mesuré ne met en évidence aucune forme particulière, notamment des impulsions dues à un éventuel défaut. Le spectre correspondant ne montre aucune composante fréquentielle particulière à l'exception de la fréquence de rotation et ses harmoniques et d'autres pics correspondant probablement à des résonances du système, chose confirmée par le zoom effectué dans la bande [0-700 Hz]. Le cepstre et le spectre d'enveloppe ne donnent aucune information sur la présence d'un défaut puisqu'ils mettent en évidence seulement la fréquence de rotation et ses harmoniques.

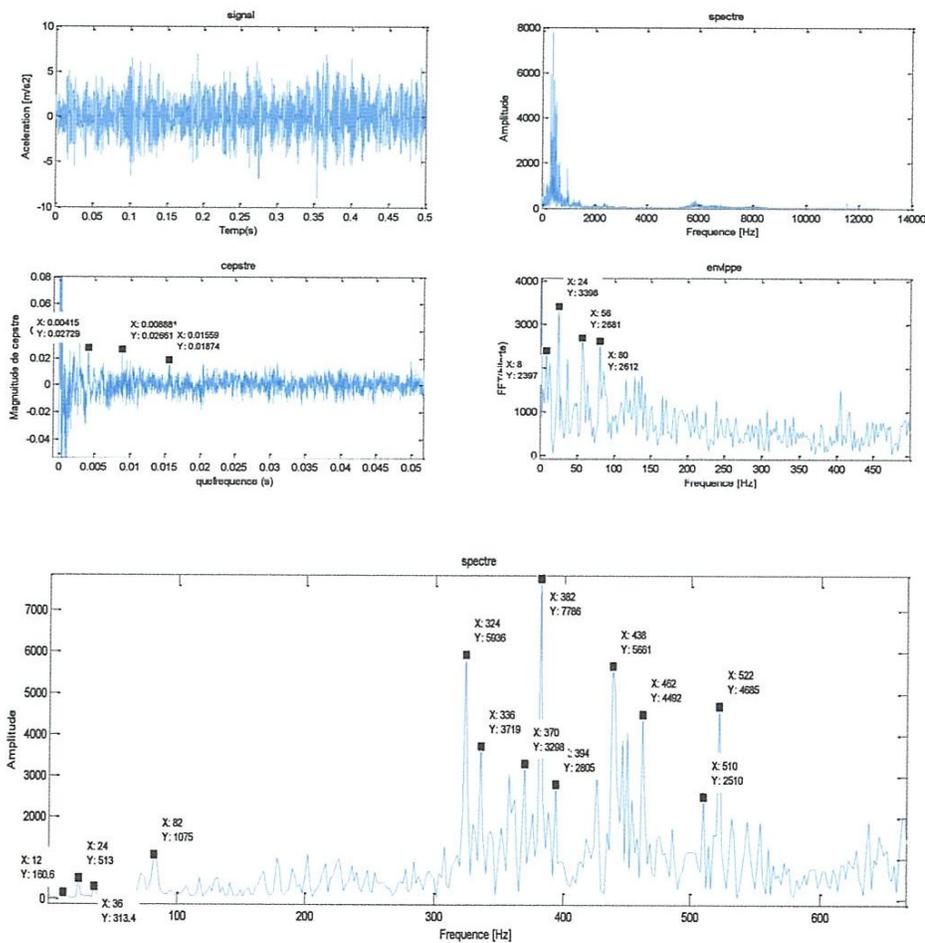
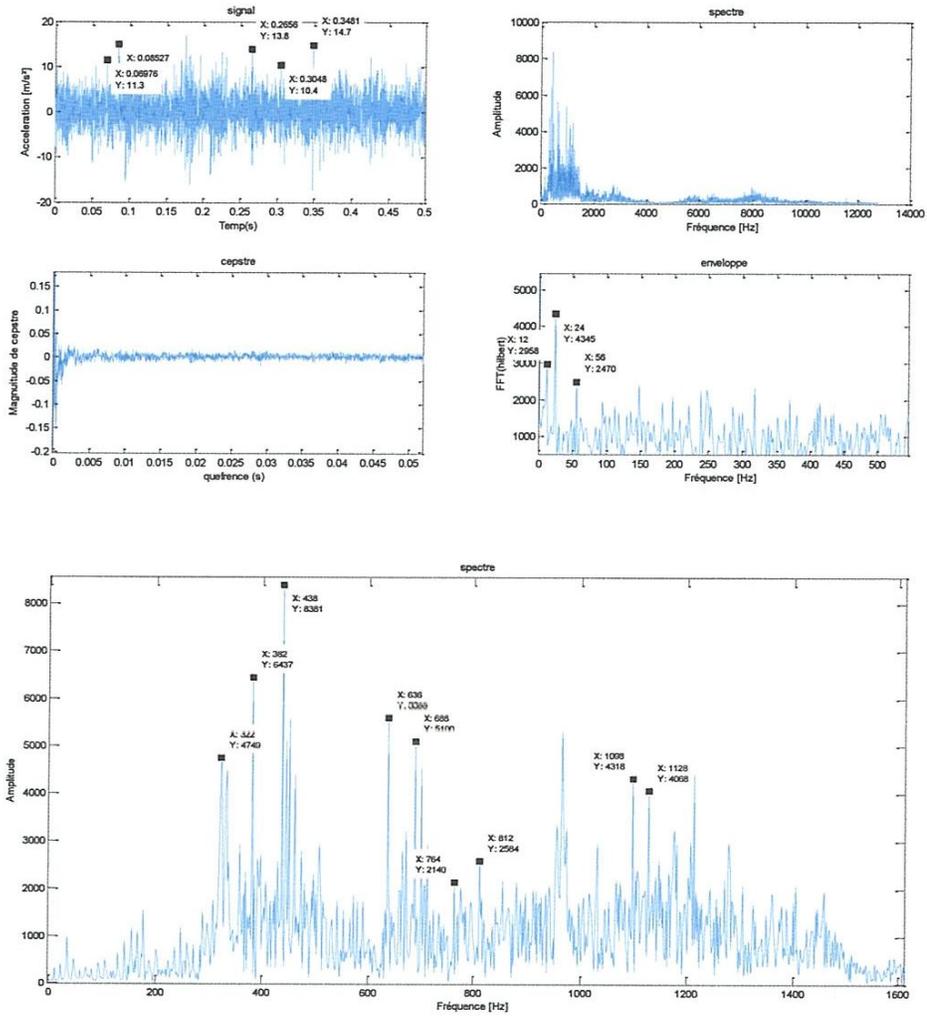


Figure 3. 1: Résultats obtenus dans le cas sans défaut (12 Hz)

4. 2. Cas d'un petit défaut

Dans ce cas un petit défaut a été créé sur la bague extérieure du roulement. La figure 2 représente les résultats obtenus pour une vitesse de rotation de 12 Hz et avec les mêmes paramètres d'échantillonnage que dans le cas sans défaut. Les amplitudes

du signal mesuré ont augmenté par rapport au cas sans défaut, mais la forme générale du signal ne montre pas des chocs. Le spectre, son zoom, le cepstre et le spectre d'enveloppe ne permettent pas de localiser le défaut créé. Le spectre d'enveloppe issu de l'analyse en ondelettes du signal mesuré, met en évidence la fréquence de rotation et plusieurs de ses harmoniques, dont le nombre important fait penser à l'existence d'un choc, mais la fréquence de ce choc reste indétectable.



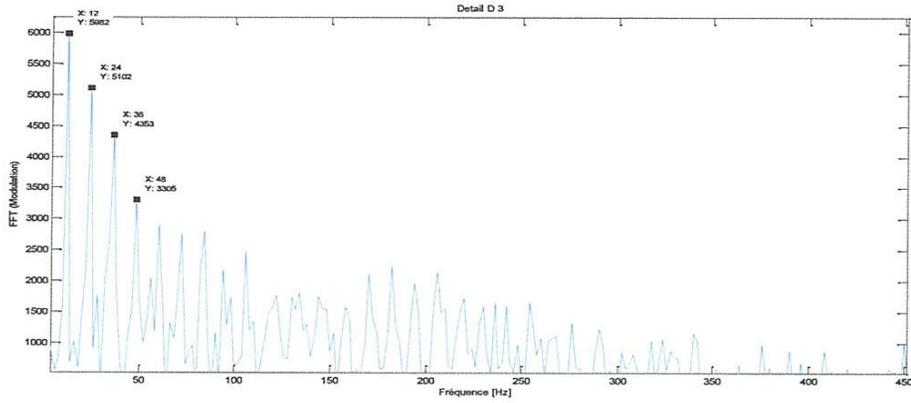
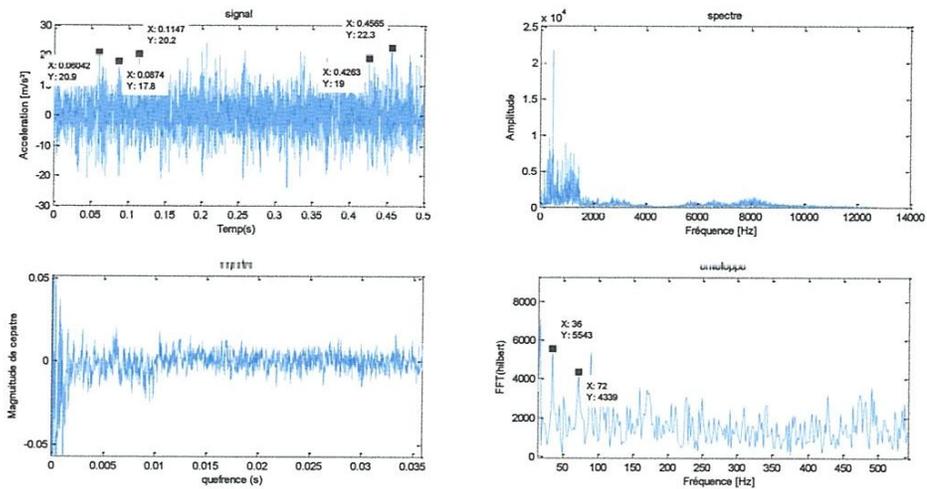


Figure 3. 2: Résultats obtenus dans le cas petit défaut (12 Hz)

Les mêmes remarques d'auparavant sont valables pour le cas où le roulement tourne à 18 Hz. La fréquence du défaut n'est pas détectable et rien de particulier n'est à signaler sauf le nombre important d'harmoniques de la vitesse de rotation qui fait toujours penser à l'existence d'un choc (figure 3).



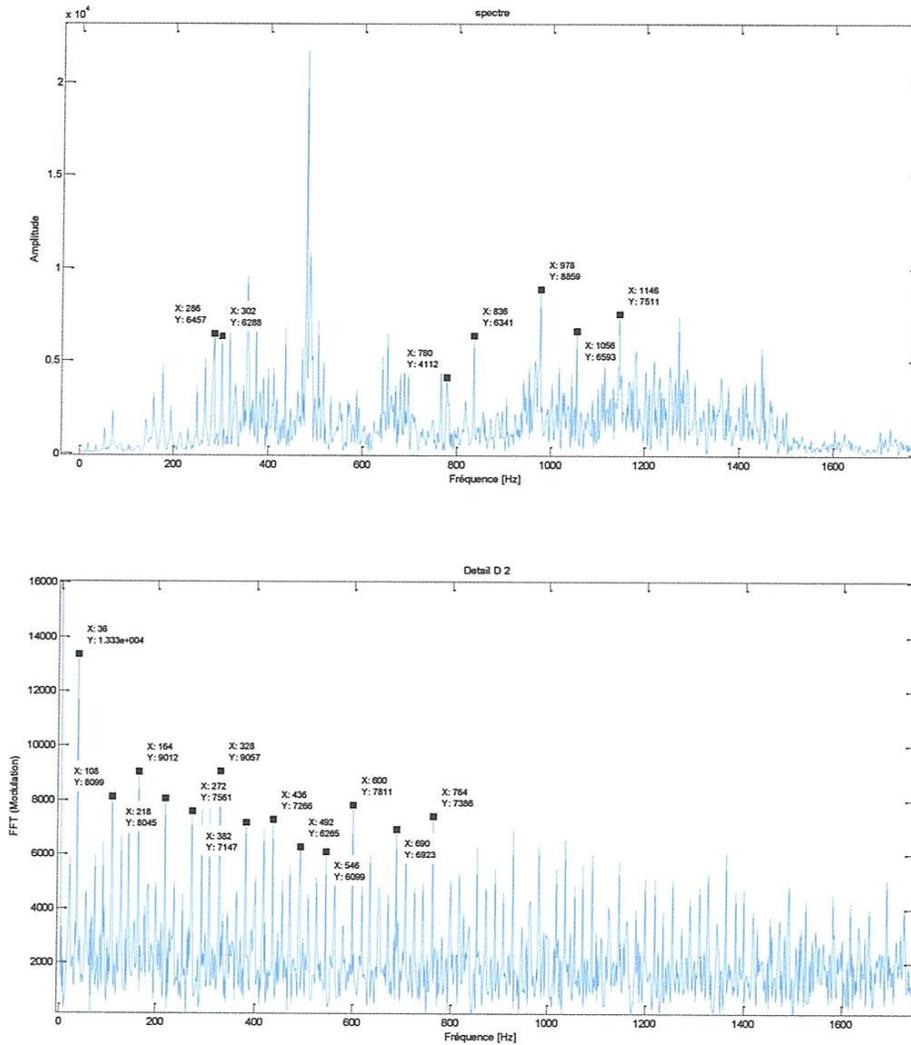


Figure 3. 3: Résultats obtenus dans le cas petit défaut (18 Hz)

4. 3. Cas d'un moyen défaut

Dans ce cas un moyen défaut a été créé sur le même roulement (le petit défaut a été un peu aggravé) (figures 4 et 5). Le résultat principal, et ceci pour les deux vitesses de rotation considérées, est que les amplitudes des signaux et des spectres ont augmenté par rapport au cas du petit défaut, mais la fréquence caractéristique du défaut reste toujours indétectable. Les spectres d'enveloppe issus de l'analyse par ondelettes montrent, dans chaque vitesse, la fréquence de rotation et un nombre important d'harmoniques qui, comme dans le cas du petit défaut, fait penser à l'existence d'un défaut de choc.

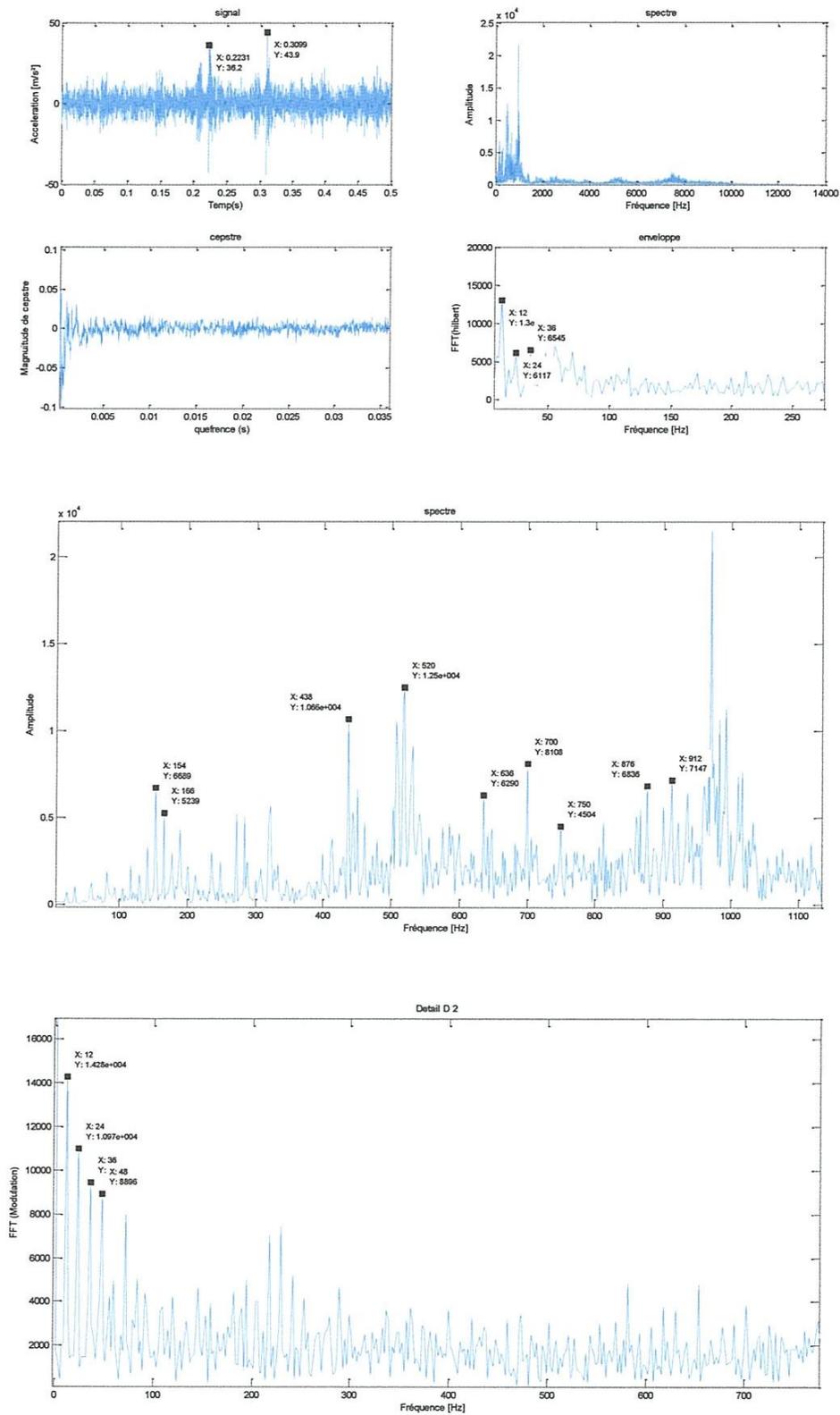


Figure 3. 4: Résultats obtenus dans le cas moyen défaut (12 Hz)

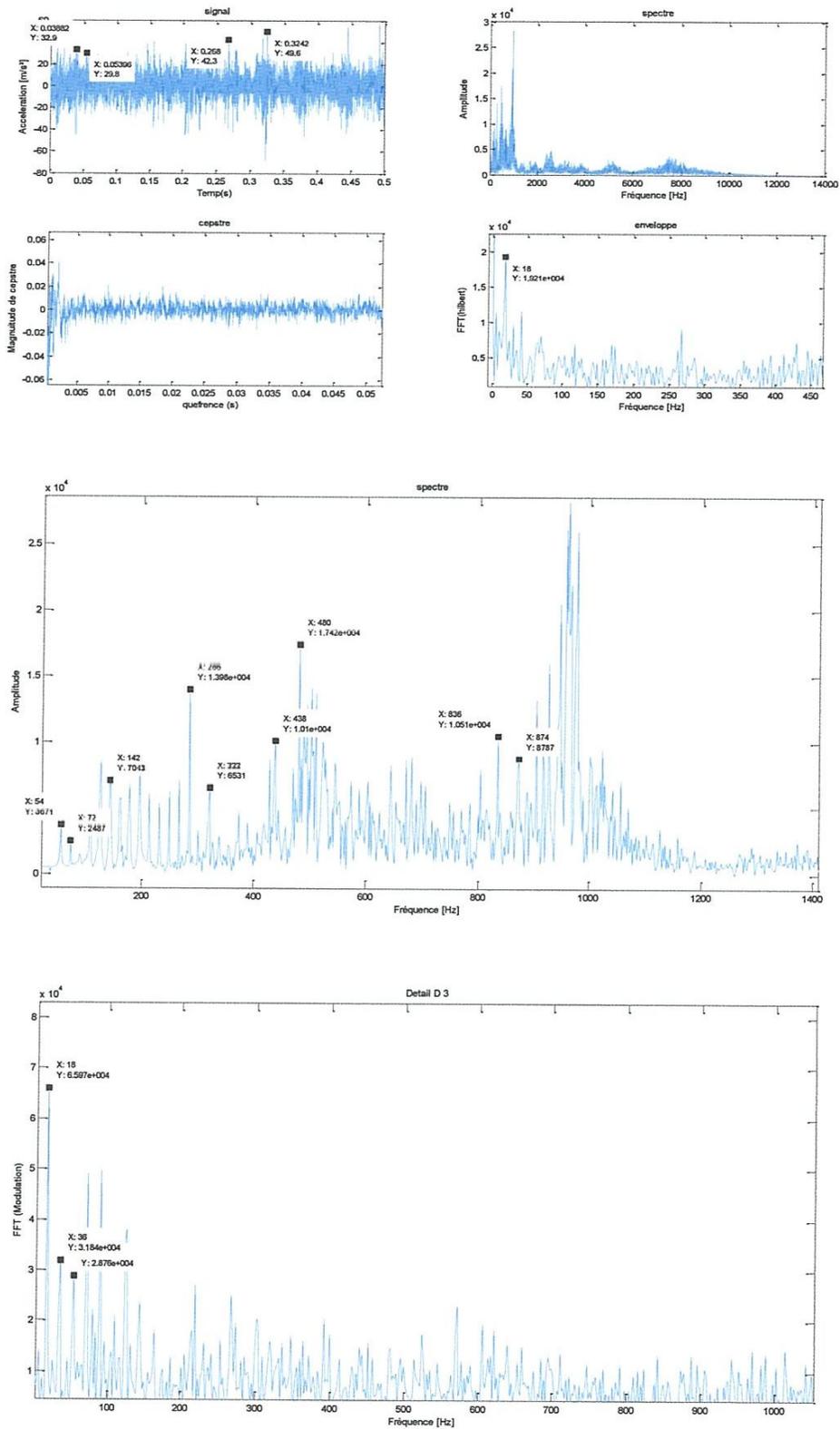
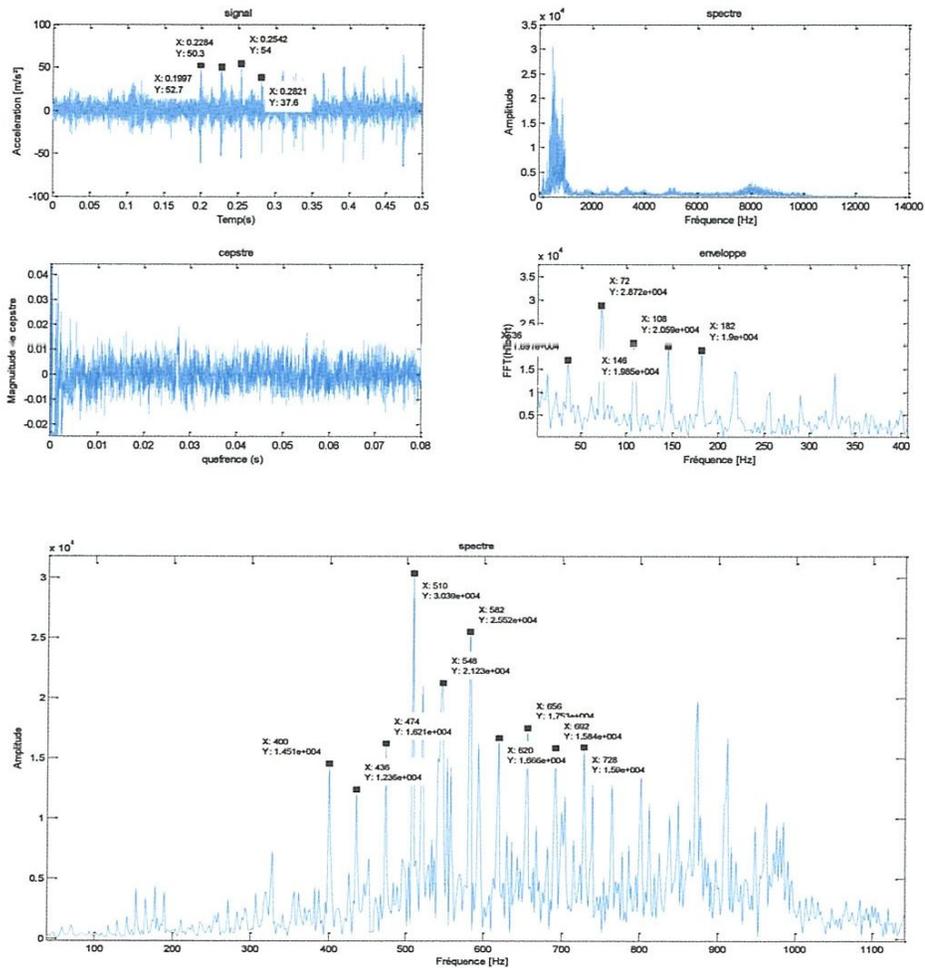


Figure 3.5: Résultats obtenus dans le cas moyen défaut (18 Hz)

4. 4. Cas d'un grand défaut

Dans ce dernier cas le défaut a été plus aggravé que dans le cas précédent formant ainsi un grand défaut. La figure 6 montre les résultats obtenus pour une vitesse de rotation de 12 Hz. Contrairement aux cas du petit et du moyen défaut, le signal mesuré montre des chocs clairs dont la période correspond parfaitement à la fréquence caractéristique du défaut créé (soit 36 Hz). Le zoom spectral confirme parfaitement ce résultat puisqu'il met en évidence des modulations espacées de la fréquence du défaut. Le spectre d'enveloppe et celui obtenus par l'analyse en ondelettes, mettent tous les deux la fréquence caractéristique du défaut et plusieurs de ses harmoniques, ce qui ne laisse aucun doute sur l'existence d'un défaut sur la bague extérieure du roulement.



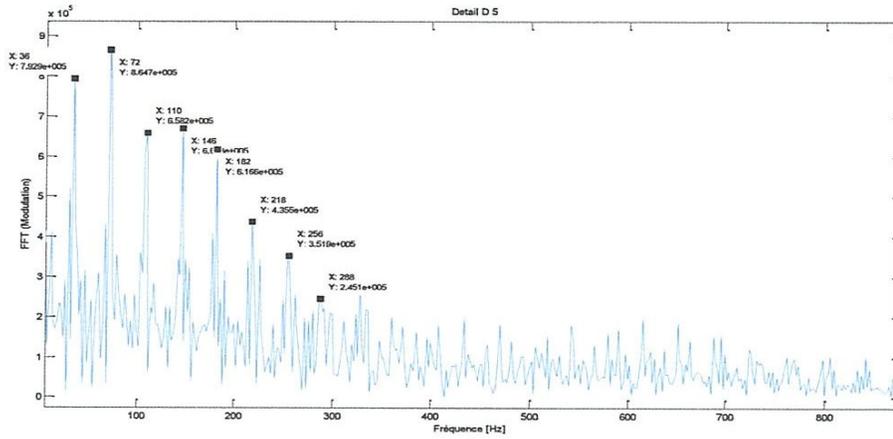
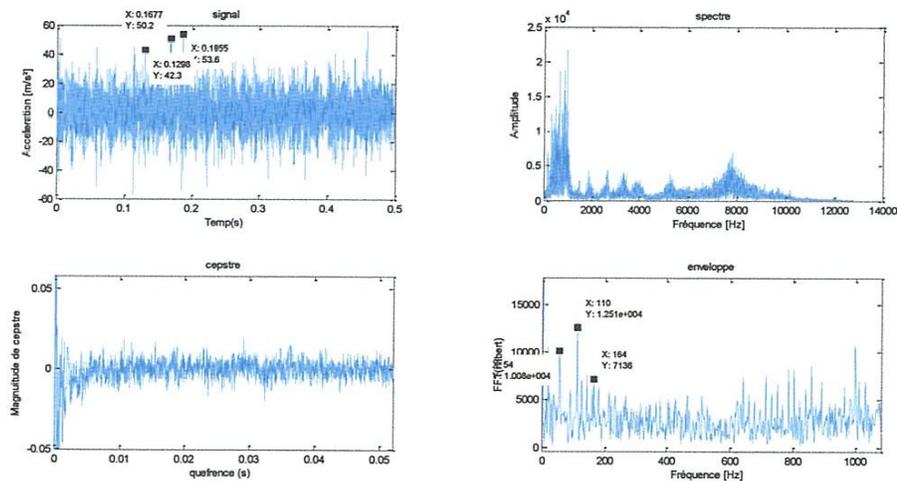


Figure 3. 6: Résultats obtenus dans le cas grand défaut (12 Hz)

Pour le cas où le roulement tourne à 18 Hz, les mêmes conclusions d'auparavant sont à signaler (figure 7). Le signal montre des chocs dont la période correspond à la fréquence du défaut, soit 54 Hz. Le zoom spectral montre également des modulations dont les bandes sont espacées par la fréquence du défaut. Le spectre d'enveloppe calculé directement du signal et celui calculé à partir de l'analyse par ondelettes, confirment tous les deux ce résultat puisqu'ils mettent en évidence la fréquence du défaut et plusieurs de ses harmoniques.



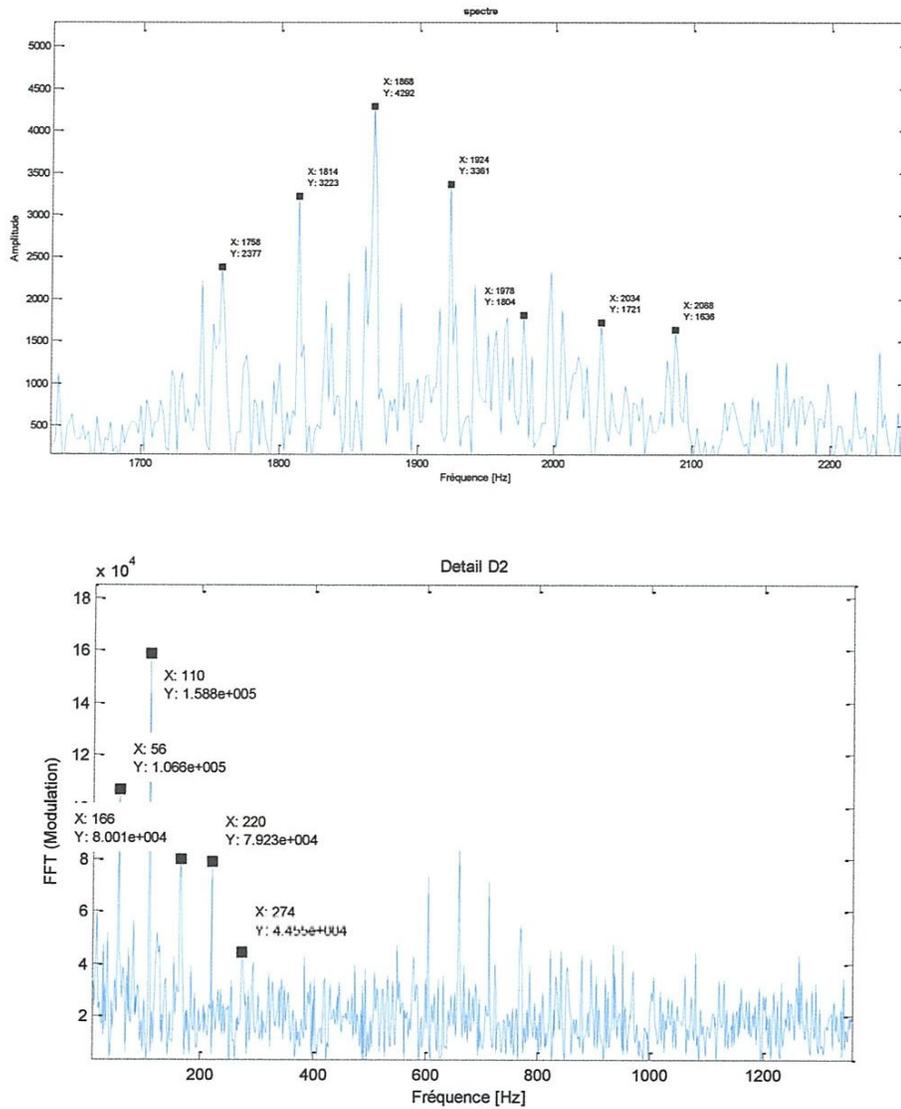


Figure 3. 7: Résultats obtenus dans le cas grand défaut (18 Hz)

IV. 5. Conclusion

Le spectre, son zoom, le cepstre, le spectre d'enveloppe et le spectre d'enveloppe issu de l'analyse en ondelettes ne permettent pas de localiser le défaut créé, dans les deux cas (petit et moyen défaut) et dans chaque vitesse. Le cas d'un grand défaut, contrairement aux cas du petit et du moyen défaut, le signal mesuré montre des chocs clairs dont la période correspond parfaitement à la fréquence caractéristique du défaut créé; le zoom spectral, le spectre d'enveloppe et celui obtenu par l'analyse en ondelettes confirme parfaitement ce résultat.

Chapitre IV

Diagnostic des défauts d'un moteur asynchrone par thermographie

IV. 1. Introduction

L'activité de maintenance des installations industrielles fait appel depuis une vingtaine d'année à des techniques de diagnostic de plus en plus sophistiquées. Plusieurs techniques de détection de défauts sont aujourd'hui à la disposition des ingénieurs de maintenance. Parmi lesquelles, on peut noter : la thermographie infrarouge, pour la détection de défauts d'origine électrique ou mécanique ; l'analyse de lubrifiants ; la détection ultrasonore ; l'analyse des vibrations mécaniques.

La mesure de température basée sur la thermographie infrarouge permet quant à elle de détecter la présence de zones anormalement chaudes sur la surface d'organes mécaniques, tels que paliers, moteurs électriques, etc...

La caméra infrarouge permet de mettre en évidence de multiples phénomènes grâce à la mise en image de la valeur des températures des objets. De ce fait, l'appareil a de nombreuses utilisations possibles (localisation de points chauds, etc.).

IV. 2. Notions de température

La température d'un corps est une grandeur physique qui caractérise le niveau énergétique de ce corps : celle-ci s'exprime en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$) ou en Kelvin (K). L'échelle en Kelvin est référencée au zéro absolu qui vaut $-273,15^{\circ}\text{C}$, à cette température, tout corps a une valeur énergétique nulle.

IV. 3. La caméra infrarouge

La thermographie infrarouge (TIR) est la science de l'acquisition et de l'analyse d'informations thermiques à l'aide de dispositifs d'imagerie thermique à distance. La norme française A 09-400 définit la Thermographie Infrarouge comme « *Technique permettant d'obtenir au moyen d'un appareillage approprié l'image thermique d'une scène thermique dans un domaine spectral de l'infrarouge* ». La thermographie infrarouge est utilisée dans le domaine de la surveillance conditionnelle de fonctionnement pour optimiser les tâches de maintenance sans interrompre le flux de production, et réduire au maximum les coûts d'entretien.

3. 1. Principe

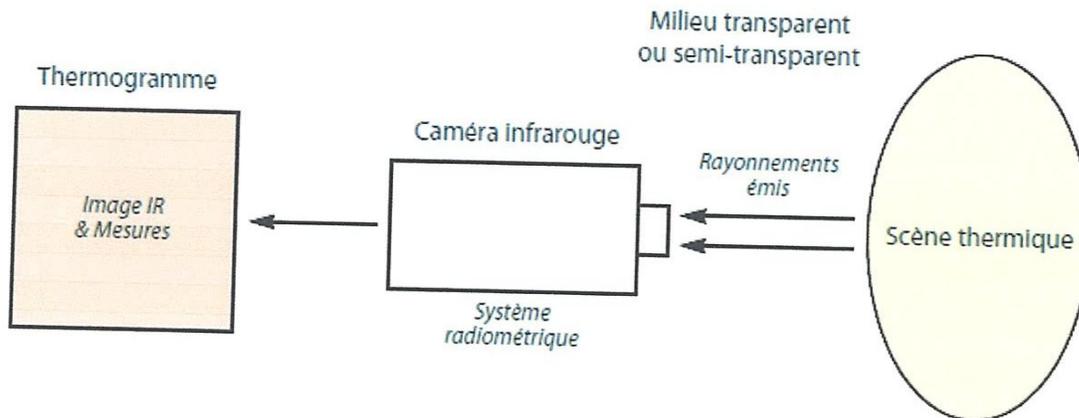


Figure 4.1: schéma de principe de la thermographie Infrarouge

3. 2. Fonctionnement

La caméra infrarouge capte au travers d'un milieu transmetteur (ex : l'atmosphère) les rayonnements émis par une scène thermique. Le système radiométrique convertit la puissance de rayonnement en signaux numériques ou analogiques : ceux-ci sont transcrits en température par le calculateur et transformés en points lumineux sur un écran. L'image ainsi obtenue s'appelle "Thermogramme".

IV. 4. Le rapport d'analyse

Le dossier synthèse doit contenir la liste des installations diagnostiquées avec leur mode de fonctionnement. Les équipements présentant des anomalies thermiques sont identifiés textuellement et visuellement par une photo classique et un thermogramme de la scène thermique où se situe le point chaud. Ceux-ci sont complétés par les conditions et les résultats des mesures, les causes probables des défaillances et les interventions correctives recommandées. Ces interventions sont suggérées dans certains délais établis sur base de la gravité des anomalies thermiques. La gravité d'un défaut dépend principalement des différences de températures mises en évidence. Dans ce contexte, l'ultime décision de réparer les équipements défectueux doit-être prise par le personnel responsable des installations.

IV. 5. Contraintes d'utilisation

- ✓ Personnel doit être formé,
- ✓ Paramètres d'influence (émissivité, etc.),
- ✓ Nécessité d'un étalonnage du récepteur,
- ✓ Équipement coûteux (caméra+logiciel),

IV. 6. Avantages

- ✓ Analyse sans contact, pas d'interférence avec la scène mesurée,
- ✓ Sécurité de l'utilisateur et d'analyse : visualisation et quantification des températures avec respect des distances de sécurité,
- ✓ Tous types matériaux (isolant, conducteur, biologiques...),
- ✓ Large gamme de températures d'utilisation,
- ✓ Variété des contrôles (produits, procédés),
- ✓ Rapidité, précision de la mesure et du diagnostic des installations,
- ✓ Maintenance préventif et l'anticipation de la panne et de l'arrêt des équipements,
- ✓ Automatisation,
- ✓ interventions uniquement sur les éléments défectueux repérés par l'analyse infrarouge,

IV. 7. Applications de la thermographie infrarouge

7. 1. Contribution de la thermographie

La thermographie infrarouge est principalement utilisée dans l'industrie en tant que outil de maintenance. Son avantage décisif est de permettre l'estimation de la qualité d'un équipement ou d'une installation en exploitation normale, et de prévenir les irrégularités de fonctionnement bien avant les pannes effectives.

La thermographie infrarouge peut-être également utilisée dans des applications R&D (recherche et développement), pour le contrôle de procédés de fabrication, pour la surveillance continue de systèmes. Dans ces applications, la thermographie n'est plus classique mais bien spécifique : celle-ci conduit à la mise en œuvre d'appareillages plus adaptés aux conditions d'analyse, donc requière des connaissances bien plus approfondies sur le sujet.

7. 2. Type d'Applications

7. 2.1. Matériaux et mécanique du solide

La recherche en contrôle non destructif (CND) et en détectabilité de défauts dans les matériaux divers ainsi que la mécanique du solide (contrainte, fatigue, rupture, étude des frottements).

7. 2.2. Electrotechnique et électronique

En électrotechnique, on réalise des composants destinés à véhiculer, transformer ou commuter de l'énergie électrique.

Dans les domaines de l'électronique, les usages de la thermographie sont multiples, de la puce de silicium à la carte électronique équipée : comportements thermiques évolutifs, mesure des impédances thermiques, validation des techniques de (soudure, collage).

7. 2.3. Industrie automobile et des transports

L'industrie automobile et l'industrie des transports ainsi que celle des équipements pour l'automobile est une grande utilisatrice de cameras thermiques.

Les sujets d'études sont les moteurs électriques, les paraboles de phares, l'isolation et les fuites des habitacles, les moules de fonderie, les sièges chauffants, les collages de pièces mécaniques, les circuits d'échappement ou de dégivrage, les pièces d'échauffement (radiateurs, climatisation), les pièces de frottement et les pneumatiques...

7. 2.4. Industrie du verre

L'industrie du verre est une forte consommatrice d'énergie que l'on cherche à économiser. Les utilisations des caméras thermiques se rencontrent dans toutes les branches de cette industrie: verre plat (verre a vitre), verre creux (bouteilles, flacons...), fibres isolantes (fibre de verre pour laine de verre), fibre de verre textile, verre automobile ou d'avion, autres produits (ustensiles ménagers, ampoules d'éclairage...).

Les problèmes de mesure sont divers :

- ✓ Mesure de température du verre, à haute température ;
- ✓ Mesure dans des ambiances et environnements difficiles et à température élevée
- ✓ Mesure sur des évènements rapides (ouverture de moules...).

7. 2.5. Papier, textile et plastique

Les caméras sont surtout utilisées en contrôle de procédés. On notera cependant les études des revêtements textiles ou vêtements isolants, les études d'amélioration de procédés dans l'industrie du plastique, le relevé de l'uniformité de séchage du papier.

7. 2.6. Médical et pharmaceutique

La recherche médicale employant la thermographie est largement concomitante des usages cliniques des caméras thermiques. Les données statistiques sur une large population garantissent la validité des méthodes de diagnostic et de mesure définies par la recherche.

Les applications relèvent les températures de surface quand elles sont perturbées par des variations métaboliques ou vasculaires, que ces variations soient d'origine tumorale, nerveuse, inflammatoire ou traumatique : sénologie, dermatologie, rhumatologie, pathologie vasculaire périphérique et cérébrale, neurologie, traumatologie, pharmacologie, vétérinaire.

7. 2.7. Maintenance et prévention

La maintenance et la prévention bénéficient depuis longtemps de l'emploi des caméras thermiques; les gains financiers générés par la thermographie sont très importants, voire inestimables, quand une seule intervention de quelques heures évite des incendies, des arrêts de production.

L'avantage décisif de la thermographie en maintenance est de permettre l'estimation de la qualité d'un équipement ou d'une installation en exploitation normale, sans arrêt des machines et bien avant la défaillance effective.

On distingue l'inspection et la surveillance (bien que ce terme porte désormais à confusion avec l'imagerie thermique). Cette inspection est exécutée périodiquement par un opérateur qui intervient sur le site avec un matériel approprié. La seconde est une inspection permanente destinée à éviter les conséquences d'évènements aléatoires pouvant se produire à tout instant. L'appareil de mesure est alors installé à poste fixe et équipé d'une électronique de seuillage et d'alarme.

7. 2.8. Maintenance électrique

La maintenance électrique est actuellement la plus importante application de la thermographie.

L'inspection va du centre de production d'énergie électrique jusqu'au moindre tableau de distribution, en passant par les réseaux de transport d'énergie sous haute tension inspectés régulièrement. On inspecte les transformateurs, les têtes de disjoncteurs, les raccords et cosses de toutes natures, les contacteurs, les portes fusibles, borniers de connexions et de répartition...

7. 2.9. Maintenance mécanique

Dès qu'il y a échauffement par un frottement devenu anormal (usure, manque de lubrification, déformation dynamique des pièces mécaniques...), la caméra thermique peut dénoncer les points défectueux : paliers de moteurs, roulements à billes, courroies (défauts d'alignement de poulies), chaînes, accouplements.

7. 2.10. Pétrochimie

L'usage spécifique de caméras thermiques en pétrochimie consiste à inspecter les peaux de tube à l'intérieur des fours de craquage des produits pétroliers.

IV. 8. Matériel utilisé

8. 1. Caméra infrarouge RAYCAM CA 1884



Figure 4.2: Caméra infrarouge

- Caméra infrarouge dédiée à un usage industriel.
- Enregistrement de 1000 images radiométriques avec organisation dans 250 dossiers.
- Mesure à partir de 10 cm.
- Recherche automatique de la température la plus chaude ou la plus froide.
- Niveau et échelle pouvant être ajustés automatiquement ou manuellement.
- Ecran LCD TFT 2.5" couleur et orientable.
- Réglage des paramètres influençant la mesure :
 - émissivité réglable
 - ajustement de la distance de mesure
 - paramétrage de l'humidité relative et de la température ambiante

Détecteur	Micro bolomètre UFPA / 7.5 à 14 microns
Champ de vue	20°x15°, IFOV : 2.2 mRad
NETD à 30°C	0.12°C
Humidité relative	20 à 90% (IP54)
Résolution / fréquence trame :	160 x 120 / 50 Hz
NETD à 30°C :	0.1°C

Autonomie : 2 heures :	2h30 minimum
Gamme de température :	- 20°C à +250°C
Humidité relative :	20 à 90% (IP54)
Température d'utilisation:	-25°C à + 50°C
Batterie :	SONY 7.2 V Lithium, 8 à 11 V
Curseur	3 positionnables + 1 détection auto
Poids	< 700g

Tableau 4.1: Caractéristique de la caméra

8. 2. Accessoires

De nombreux accessoires afin de réaliser les mesures dans des conditions optimales :

- ✓ Câble de liaison USB pour transfert des données sur PC,
- ✓ Câble vidéo pour affichage sur écran externe,
- ✓ Logiciel *RayCam Report* pour le traitement des données,
- ✓ Fonctionnement sur batteries internes ou adaptateur secteur,
- ✓ Pare-soleil pour une bonne lisibilité écran en cas de forte luminosité,
- ✓ Adaptateur trépied pour une utilisation en mains libres et en poste fixe,

IV.9. Partie expérimentale

9. 1. Moteur

On s'intéresse à la détermination de la variation de températures du moteur sans défaut et avec défaut de barres rotorique.

La figure (4.3) présente une image d'un moteur sain capturée par une caméra infrarouge, la barre à droite de l'image montre la température max et min (chaque couleur correspond à une température donnée). Le tableau 4.2 donne quelques informations sur la mesure et les conditions de mesure.

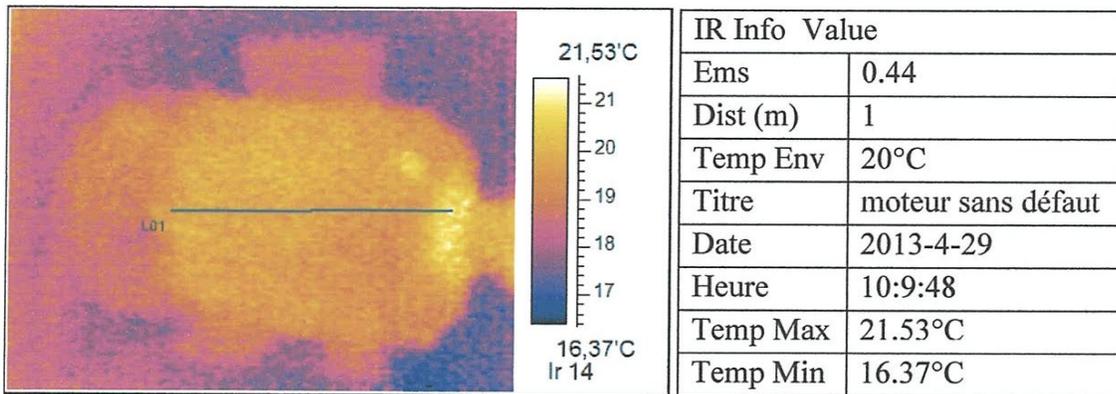


Figure 4.3: Moteur sain vu par caméra infrarouge

Tableau 4.2: Information sur la mesure

Le tracé de ligne LO1 sur la figure (4.3) permet d'élaborer le profil thermique donné dans la figure (4.4). Celui-ci montre la variation de température sur la zone choisi. L'intervalle de la variation est [19.35 - 20.86°C].

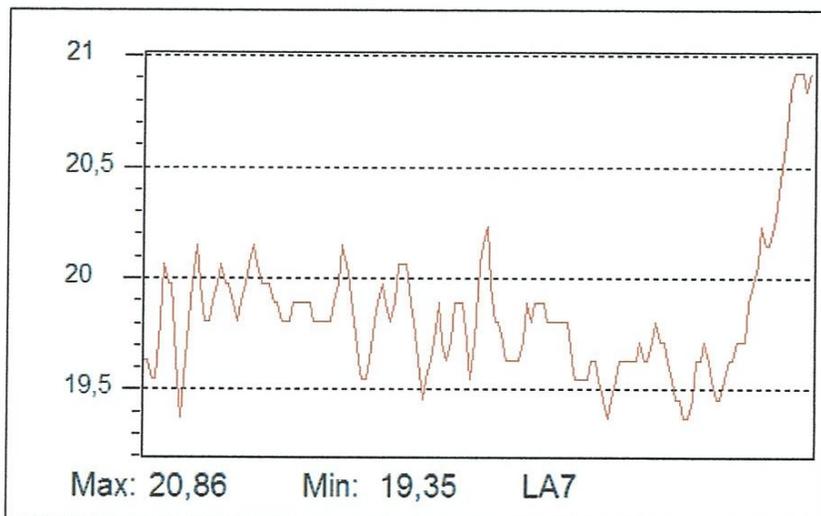


Figure 4.4 : Courbe de la variation de température du moteur sain

La figure (4.5) présente un thermogramme d'un moteur défectueux « trois barres cassées », cette figure montre qu'il y a une augmentation de la température sur le moteur par rapport à la température du moteur sans défaut.

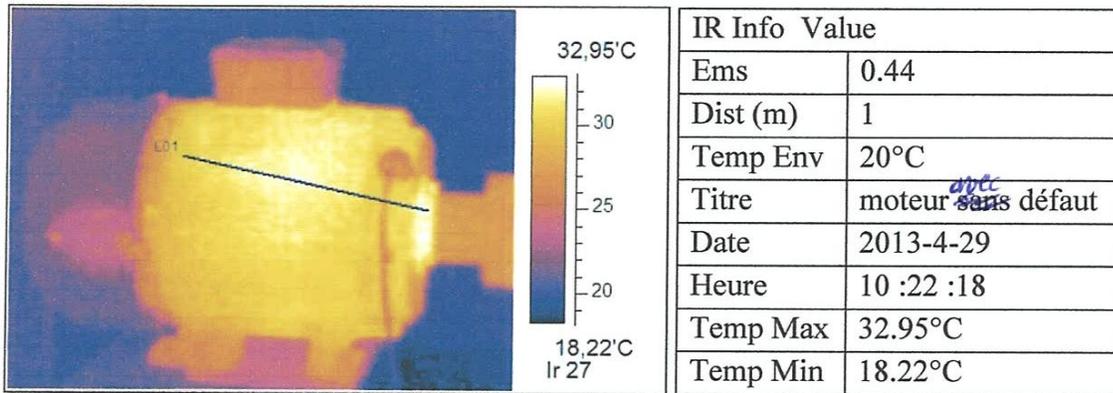


Figure 4.5 : Moteur défectueux vu par caméra infrarouge

Tableau 4.3: Information sur la mesure

Le profil thermique donné dans la figure 4.6, montre une variation de la température différente par rapport à celle constatée dans le cas sain. L'intervalle de la variation devient entre [28.6 - 32.4°C].

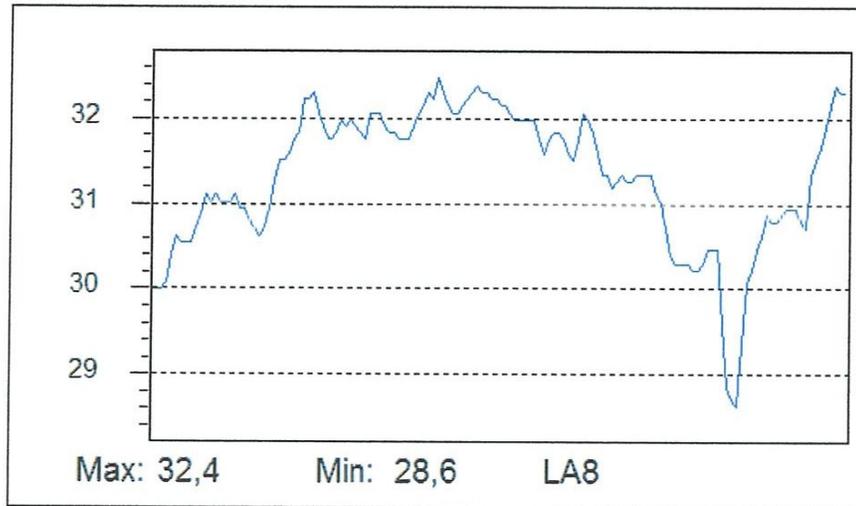


Figure 4.6: Courbe de la variation de température du moteur défectueux

Une comparaison est effectuée sur les thermogrammes du moteur dans le cas sain et défectueux, figure (4.7).

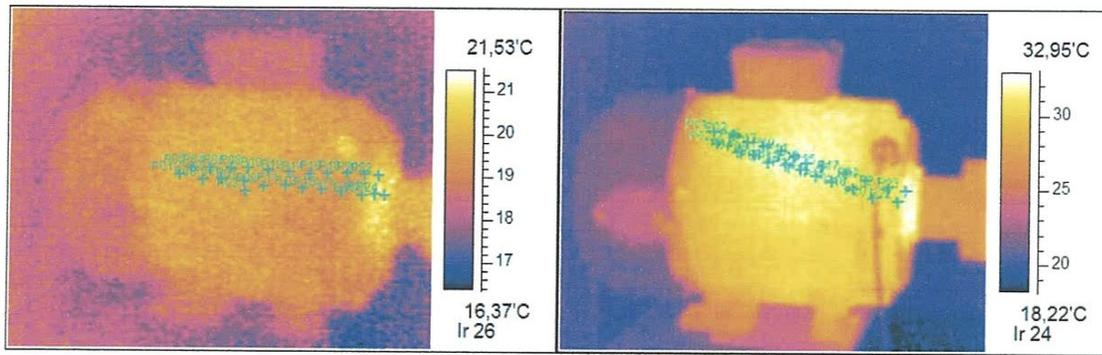


Figure 4.7: Image d'un moteur sain et défectueux

La figure (4.8) présente les courbes de la température en fonction des points choisis sur les deux moteurs. Il est constaté une augmentation notable de la température dans le de défaillance ce qui confirme l'intérêt de l'outil utilisé.

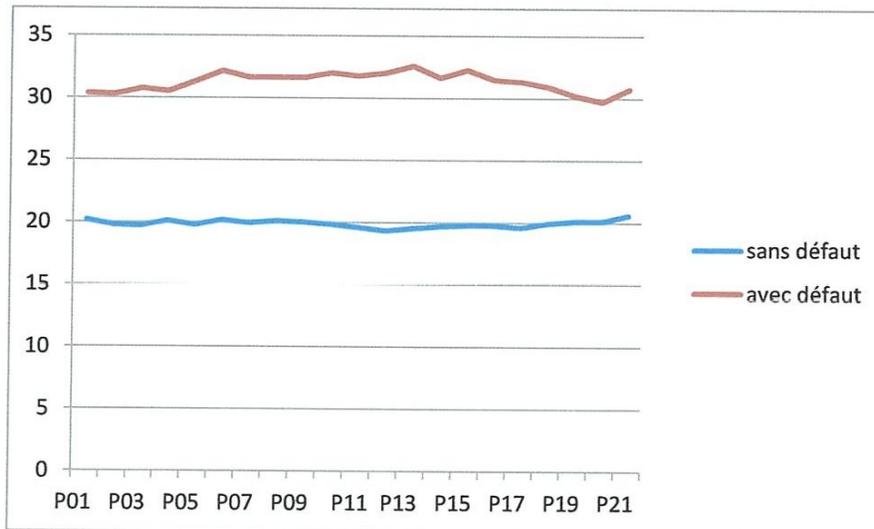


Figure 4.8: Courbes de la variation de la température

La figure (4.9) présente une image isotherme d'un moteur défectueux. Les zones en vert sont les zones où la température est très élevé par rapport aux autres zones.

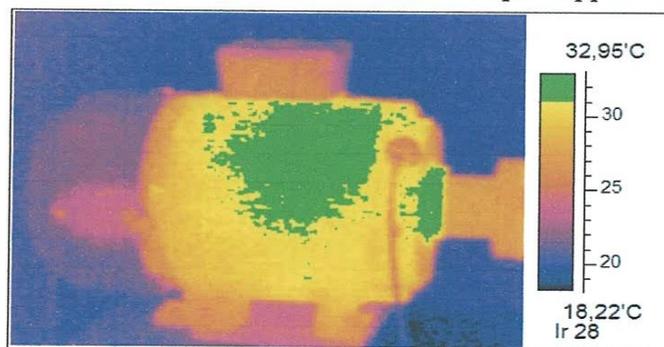


Figure 4.9: Image isotherme du moteur

9. 2.Palier

Des mesures sur un palier à roulement sont effectuées pour voir la possibilité de détecter un défaut de roulement.

La figure (4.10) présente une image thermographique du palier à roulement en tenant compte des informations données dans le tableau (4.4).

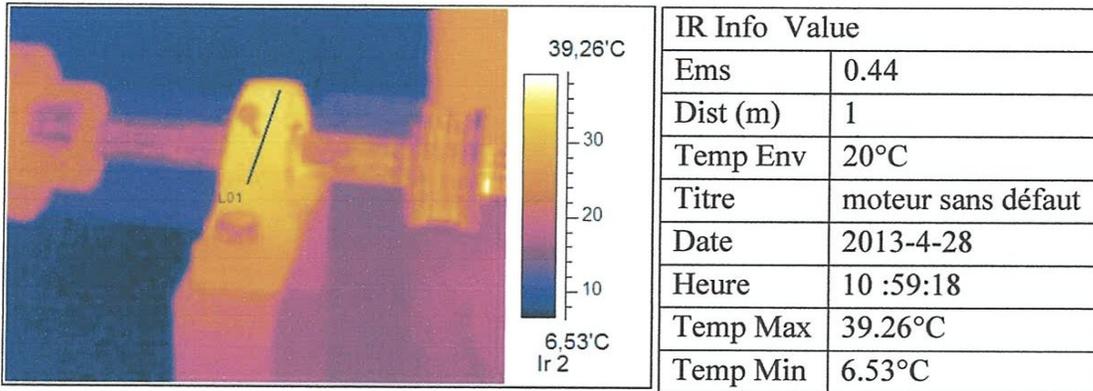


Figure 4.10: Palier sain vu par caméra infrarouge

Tableau 4.4: Information sur la mesure

La figure (4.11) présente la courbe de la variation de la température sur le palier avec un roulement sans défauts (ligne L01).

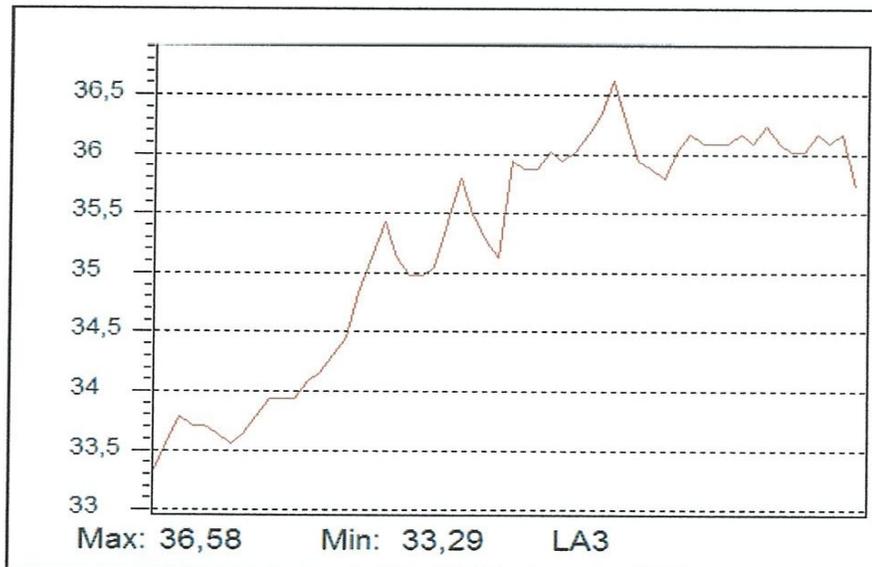


Figure 4.11: Courbe de la variation de température du palier sans défaut

La même mesure est faite sur le palier avec un roulement défectueux. Le thermogramme correspondant est donné dans la figure (4.12).

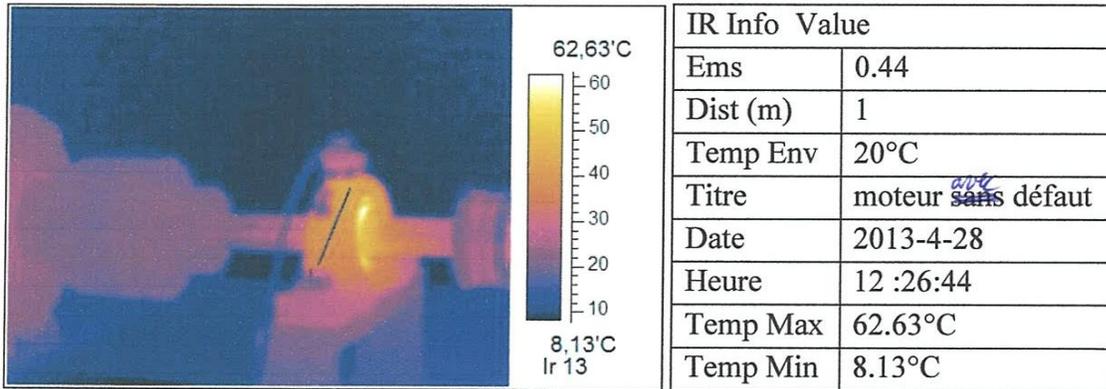


Figure 4.12: Palier défectueux vu par caméra infrarouge

Tableau 4.5: Information sur la mesure

La courbe de la variation de la température caractérisée par la ligne L01, est présentée sur la figure (4.13).

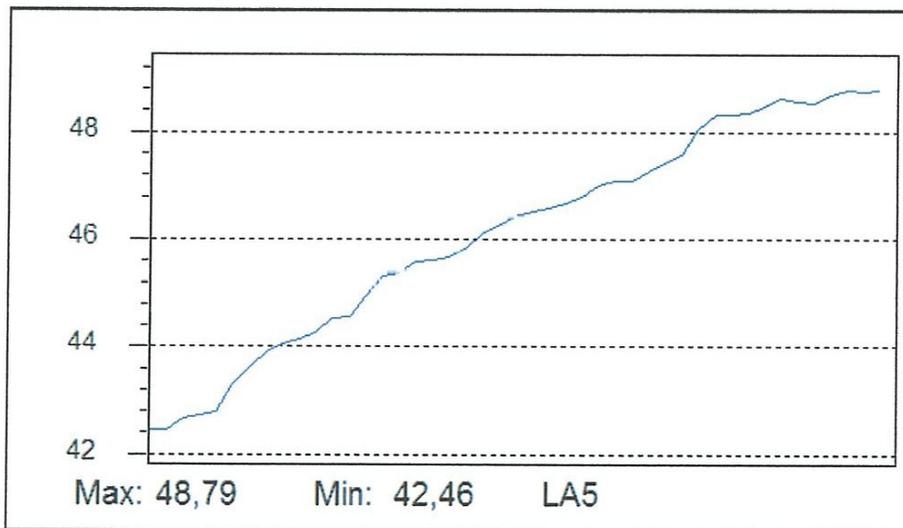


Figure 4.13: Courbe de la variation de température du palier avec défaut de roulement

Les thermogrammes du palier sain et avec défaut de roulement sont donnés dans la figure (4.14). Les courbes relatives aux points choisis P_i sont données dans la figure (4.15).

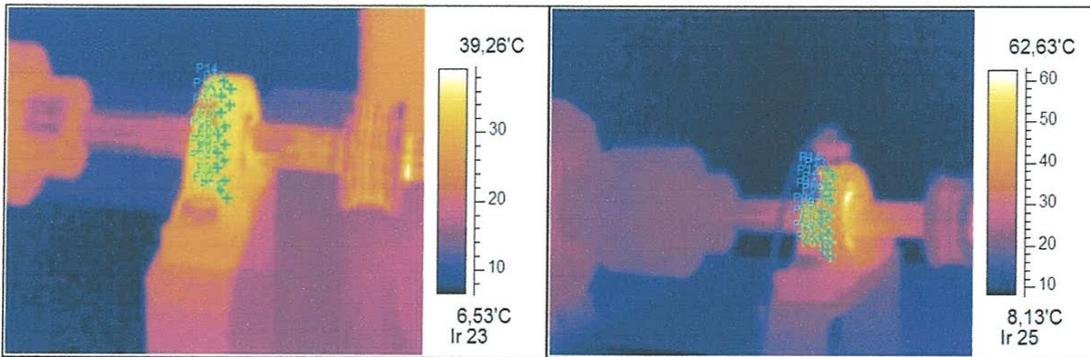


Figure 4.14: Images thermographiques d'un palier sain et avec défaut de roulement

La figure (4.15) présente les courbes de la température en fonction des points choisis sur les deux paliers. Les courbes montrent que l'écart entre les deux valeurs de température est très grand ce qui confirme la présence d'un défaut de roulement.

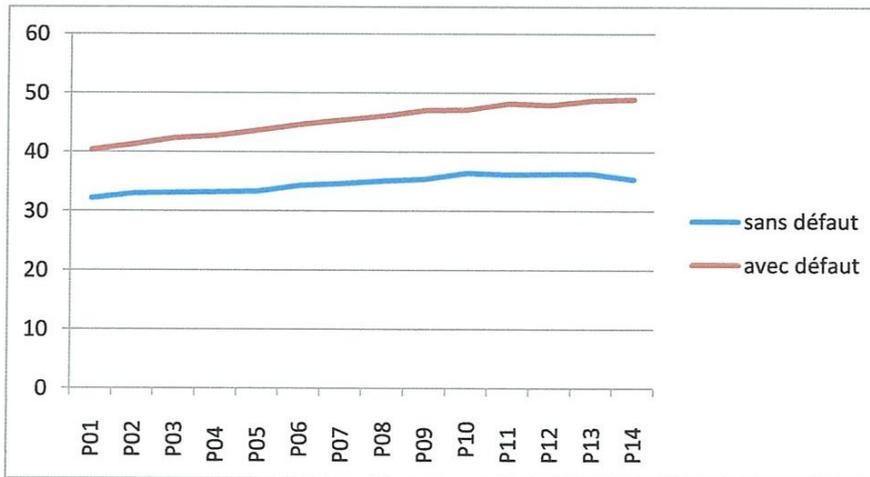


Figure 4.15: Courbes de la variation de la température du palier

La figure (4.16) présente une image isotherme d'un palier avec défaut de roulement, la zone en couleur verte est la plus chaude par rapport aux autres zones.

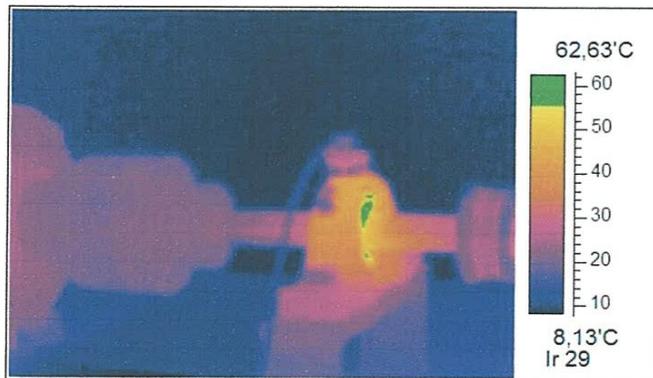


Figure 4.16: Image isotherme du palier

IV. 10. Conclusion

La caméra infrarouge est un outil à la fois simple et pratique a priori, c'est l'outil idéal en effet pour visualiser, mesurer et diagnostiquer instantanément toute scène thermique.

Le défaut vibratoire engendré au roulement et aux barres rotorique conduit à un échauffement de surface parfaitement quantifiable, on peut détecter cet échauffement par la caméra infrarouge. Donc la thermographie est une méthode efficace pour la détection des défauts.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons étudié deux défauts apparaissant dans les moteurs asynchrones, ces défauts sont les cassures des barres rotoriques et les défauts de la bague extérieure du roulement. On a utilisé deux techniques de détection.

L'analyse spectrale nous a permis d'identifier les signatures fréquentielles causées par la rupture des barres rotorique. Elle permet de détecter la présence d'un défaut au niveau de la cage rotorique du moteur par une modulation des harmoniques de fréquence de rotation par la fréquence du défaut ($F_R \pm 2gF_S$).

L'analyse vibratoire nous a permis de localisé le défaut de la bague extérieur, le défaut apparait clairement dans le cas d'un grand défaut, contrairement au cas d'un petit et moyen défaut.

Le défaut vibratoire engendré au roulement et aux barres rotorique conduit à un échauffement de surface parfaitement quantifiable, on peut détecter cet échauffement par la caméra infrarouge.

- [1] A. Aboubou, M. Sahraoui, A. Ghougal, S. E. Zouzou. Analyse du contenu spectral de la tension de neutre de la machine asynchrone en vue de son diagnostic. Courrier du Savoir, Juin 2005, N°06, pp.95-102.
- [2] A. Mellakhi, N. Benouzza, A. Bendiabdellah. Analyse spectrale du courant statorique pour détecter les cassures de barres dans les moteurs asynchrones triphasés à cage en tenant compte des harmoniques d'espace. Revue « Nature et Technologie », Janvier 2010, N° 02, pp. 35-40.
- [3] B. Trajin. Détection automatique et diagnostic des défauts de roulements dans une machine asynchrone par analyse spectrale des courants statoriques. JCGE'08 LYON, décembre 2008.
- [4] M. Sahraoui, S. E. Zouzou, A. Menacer, A. Aboubou Et A. Derghal. Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage. Courrier du savoir, juin 2004, N°05, pp. 57-61.
- [5] A. F. Khatir, K. E. Hemsas. Diagnostic des machines asynchrones : utilisation du modèle multi enroulements. Conférence internationale sur computer Intégrale, 2007.
- [6] M. Benouzza, M. Drif, A. J. Marques Cardos, J. A. Dente. Emploi de l'approche des vecteurs de park pour la détection des défauts de barres dans les moteurs asynchrones à cage d'écureuil. Rev-Energ-Ren, 1999, pp. 71-76.
- [7] F. Tafnine, K. Mokrani, J. Antoni, A. Kabla Et Z. Asradj. Introduction des svm en mcsa. Setit, 2007.
- [8] C. Theys, M. Vieira. Localisation de défauts dans les machines asynchrones par des méthodes mcmc. Dix-septième colloque GRETSI, septembre 1999, pp. 139-142
- [9] A. Idir, A. Belmehdi, D. Chikouche. Recherche de signatures de défaut de la machine à induction en vue de diagnostic. Conférence internationale sur computer Intégrale, 2007.
- [10] P. Granjon, M. Vieira, S. Sieg-Zieba. Surveillance du désalignement d'un moteur asynchrone par analyse du vecteur d'espace courant.
- [11] A. Djebala, N. Ouelaa, N. Hamzaoui Et S. Guenfoud. Optimisation de l'utilisation des indicateurs scalaires dans le cadre de la maintenance prédictive des paliers à roulements. Congrès algérien de mécanique de construction, avril 2007.
- [12] H. Razik. Le contenu spectral du courant absorbe par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art. La revue 3EI, juin 2002, N°29, pp. 48-52.
- [13] M. Boumahdi, J.P Dron, S. Rechak, O. Cousinard. Détection et classification des défauts de roulements en utilisant l'analyse vibratoire et l'arbre de décision. 19^{ème} congrès français de mécanique, août 2009.

Les références bibliographiques

- [14] M. Djouada, R. Ziani, A. Felkaoui, R. Zegadi. Diagnostic des défauts par un couplage réseaux de neurones artificiels - algorithmes génétiques. Conférence internationale sur computer Intégrale, 2007.
- [15] B. Badri, M. Thomas, S. Sassi, I. Zaghbani, V. Songmene. Étude du comportement des roulements dans les rotors tournant à haute vitesse. Revue internationale sur l'ingénierie des risques industriels (ji-iri), 2010;vol.3, N°1.
- [16] C. Pachaud. Contribution de l'analyse de l'intensité du courant électrique à la détection de défauts de machines tournantes. Revue internationale sur l'ingénierie des risques industriels (ji-iri), 2009; vol.2, N°1, pp.75-95.
- [17] A. Djebala, N. Ouelaa, N. Hamzaoui. S. Guenfoud. Application de la transformée en ondelettes discrète dans la détection des défauts de roulements.
- [18] S. Bachir, J.C. Trigeassou, S. Tnani, S.Cauet. Diagnostic des défauts statoriques et rotoriques par identification paramétrique sans capteur de vitesse. Conférence international francophone d'automatique, Nantes, juillet 2002, pp. 447-452.
- [19] V. Lenaerts. Comparaison de différentes méthodes de détection de défauts dans les roulements. Revue Scientifique des ISILF, 2006, N°20.
- [20] A. Mazioud, L. Iboss, Y. Sfaxi. Suivi de dégradation d'un roulement à billes par thermographie infrarouge. Laboratoire CERTES (EA 3481).